

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
6. Dezember 2007 (06.12.2007)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2007/137906 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
B61F 5/38 (2006.01)

Ernst-Barlach-Weg 12, 57076 Siegen (DE). **REIMANN, Uwe** [DE/DE]; Edelweissweg 43, 57072 Siegen (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2007/053688

(74) **Anwalt: COHAUSZ & FLORACK**; Bleichstrasse 14, 40211 Düsseldorf (DE).

(22) Internationales Anmeldedatum:
16. April 2007 (16.04.2007)

(81) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2006 025 773.1 31. Mai 2006 (31.05.2006) DE

(71) **Anmelder** (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **BOMBARDIER TRANSPORTATION GMBH** [—/DE]; Schöneberger Ufer 1, 10785 Berlin (DE).

(72) **Erfinder; und**

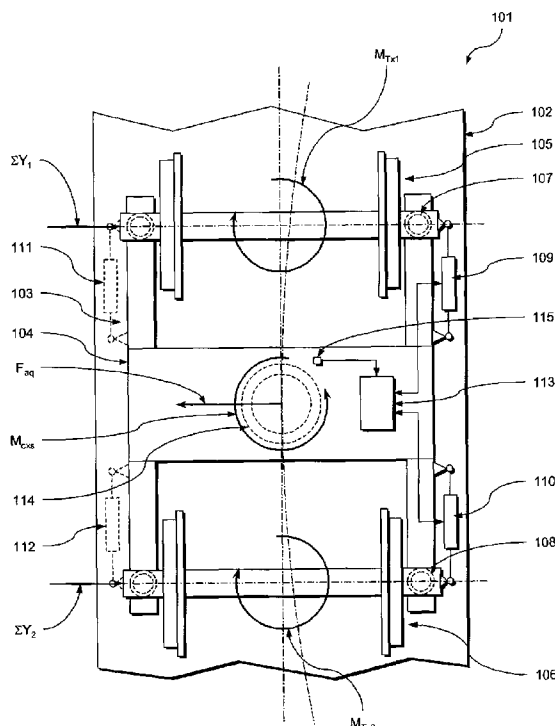
(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG,

(75) **Erfinder/Anmelder** (nur für US): **DEDE, Jani** [DE/DE];

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) **Title:** METHOD FOR REGULATING AN ACTIVE CHASSIS OF A TRACKED VEHICLE

(54) **Bezeichnung:** VERFAHREN ZUR REGELUNG EINES AKTIVEN FAHRWERKS EINES SCHIENENFAHRZEUGS



(57) **Abstract:** Disclosed is a method for regulating an active chassis of a tracked vehicle, said chassis comprising at least one wheel unit (105) with two wheels. According to the inventive method, the turning angle of the first wheel unit (105) about a vertical chassis axis relative to a vehicle structure (102) that is supported on the first wheel unit by means of a first primary spring mechanism (107) is adjusted in a first frequency range with the aid of at least one first actuator (109) which acts between the first wheel unit (105) and the vehicle structure (102), the adjustment being made in accordance with the actual curvature of the track, and/or the turning angle of the first wheel unit (105) about the vertical chassis axis relative to the vehicle structure (102) is adjusted in a second frequency range in such a way that transversal movements at least of the first wheel unit (105) caused by a track displacement or a sinusoidal course are counteracted. In the first frequency range, the turning angle of the first wheel unit (105) is adjusted using a first desired value corresponding to a first ideal value multiplied by a first correction factor (K1), said first ideal value being selected such that the first wheel unit (105) is adjusted at least approximately by the radius of curvature if the first desired value matches the first ideal value (i.e. K1=1), and/or in the second frequency range, the turning angle of the first wheel unit (105) is adjusted using a second desired value which corresponds to a second ideal value multiplied by a predefined second

correction factor (K2), said second ideal value being selected such that transversal movements at least of the first wheel unit (105) caused by a track displacement or a sinusoidal course are essentially compensated if the second desired value matches the second ideal value (i.e. K2=1).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2007/137906 A2



ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Veröffentlicht:

- *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

(57) Zusammenfassung: Verfahren zur Regelung eines wenigstens eine erste Radeinheit (105) mit zwei Rädern umfassenden aktiven Fahrwerks (103) eines Schienenfahrzeugs, bei dem über wenigstens einen ersten Aktuator (109), der zwischen der ersten Radeinheit (105) und einer über eine erste Primärfederung (107) darauf abgestützten Fahrzeugstruktur (102) wirkt, in einem ersten Frequenzbereich eine Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit (105) um eine Fahrwerkshochachse bezüglich der Fahrzeugstruktur (102) in Abhängigkeit von der aktuellen Krümmung des Gleises erfolgt und/oder in einem zweiten Frequenzbereich eine Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit (105) um eine Fahrwerkshochachse bezüglich der Fahrzeugstruktur (102) derart erfolgt, dass durch Gleislagestörungen oder durch einen Sinuslauf verursachten Querbewegungen wenigstens der ersten Radeinheit (105) entgegengewirkt wird, wobei die Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit (105) in dem ersten Frequenzbereich unter Verwendung eines ersten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren ersten Korrekturfaktor (K1) multiplizierten ersten Ideal-Sollwert entspricht, wobei der erste Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des ersten Sollwerts mit dem ersten Ideal-Sollwert (d. h. $K1 = 1$) bei der aktuellen Krümmung des Gleises eine zumindest annähernd bogenradiale Einstellung der ersten Radeinheit (105) vorliegt, und/oder die Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit (105) in dem zweiten Frequenzbereich unter Verwendung eines zweiten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren zweiten Korrekturfaktor (K2) multiplizierten zweiten Ideal-Sollwert entspricht, wobei der zweite Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des zweiten Sollwerts mit dem zweiten Ideal-Sollwert (d. h. $K2 = 1$) durch Gleislagestörungen oder durch einen Sinuslauf verursachte Querbewegungen wenigstens der ersten Radeinheit (105) im Wesentlichen kompensiert werden.

Verfahren zur Regelung eines aktiven Fahrwerks eines Schienenfahrzeugs

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung eines wenigstens eine erste Radeinheit mit zwei Rädern umfassenden aktiven Fahrwerks eines Schienenfahrzeugs, bei dem über wenigstens einen ersten Aktuator, der zwischen der ersten Radeinheit und einer über eine erste Primärfederung darauf abgestützten Fahrzeugstruktur wirkt, in einem ersten Frequenzbereich eine Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit um eine Fahrwerkshochachse bezüglich der Fahrzeugstruktur in Abhängigkeit von der aktuellen Krümmung des Gleises erfolgt und/oder in einem zweiten Frequenzbereich eine Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit um eine Fahrwerkshochachse bezüglich der Fahrzeugstruktur derart erfolgt, dass durch Gleislagestörungen oder durch einen Sinuslauf verursachten Querbewegungen wenigstens der ersten Radeinheit entgegengewirkt wird. Sie betrifft weiterhin eine Vorrichtung zur Regelung eines aktiven Fahrwerks eines Schienenfahrzeugs sowie ein mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung ausgestattetes Schienenfahrzeug.

Fahrwerke von Schienenfahrzeugen unterliegen in der Regel einem Zielkonflikt zwischen der Laufstabilität bei hohen Fahrgeschwindigkeiten in der Geraden und einem guten Bogenlaufverhalten in Kurven. Die Laufstabilität bei hohen Fahrgeschwindigkeiten in der Geraden erfordert eine steife Längsführung der Radeinheiten (Radsätze oder Radpaare), während das gute Bogenlaufverhalten eine bogenradiale Einstellung der Radeinheiten und damit eine weiche Längsanlenkung erfordert. Bei bekannten Lösungen aus dem Vollbahnbereich weisen die Schienenfahrzeuge mit gutem Bogenlaufverhalten daher in der Regel eine stabilitätsbedingte Höchstgeschwindigkeit auf, die erheblich geringer ist als bei Hochgeschwindigkeitszügen, welche für bogenarme Strecken bzw. solche mit sehr großen Bogenradien vorgesehen sind. Die Fahrwerke von Hochgeschwindigkeitszügen sind wiederum wenig bogenfreundlich. Passive Lösungen können naturgemäß immer nur einen Kompromiss zwischen diesen beiden widerstreitenden Anforderungen erreichen.

Bei sehr engen Gleisbögen, wie sie beispielsweise in Straßenbahnnetzen auftreten, versagt darüber hinaus aus physikalischen Gründen die Fähigkeit der Radeinheiten zur bogenradialen Selbsteinstellung. Um diesen Nachteil zu überwinden, wird beispielsweise in der DE 198 61 086 A1 ein aktives System zur bogenradialen Einstellung von Radsätzen

vorgeschlagen, das allerdings keinerlei Beitrag zur Stabilisierung des Laufverhaltens bei – im Straßenbahnbereich ohnehin gar nicht auftretenden – hohen Fahrgeschwindigkeiten liefern kann.

5 Demgegenüber ist aus der DE 101 37 443 A1 eine Lösung bekannt, welche den oben geschilderten Zielkonflikt aufhebt. Für ein Fahrwerk mit lenkbar am Drehgestellrahmen angebrachten Radsätzen wird ein aktives Regelungsverfahren und eine entsprechende Einrichtung beschrieben, welche für beide Aufgaben ein optimiertes Laufverhalten erreicht. So wird durch Regelung in einem ersten, bevorzugt unteren, Frequenzbereich eine Einstellung der Radsätze gemäß der im Bogen vorliegenden Krümmung des Gleises
10 erreicht, während in einem zweiten, bevorzugt höheren, Frequenzbereich die Reaktion auf Gleislagestörungen ausgeglichen und die Anfachung einer Instabilität verhindert wird.

Sowohl hinsichtlich der für die Regelung herangezogenen Eingangsgrößen als auch der Ansteuerung des die Radsätze einstellenden Aktuators sowie dessen Wirkprinzip und Anordnung im Fahrwerk des Schienenfahrzeugs werden in der DE 101 37 443 A1 eine
15 Reihe von alternativen Ausprägungen angegeben, welche alle die gestellte Aufgabe erfüllen.

Ein Nachteil dieser Regelung besteht jedoch darin, dass wegen der Einhaltung der Ideallinie im Fahrbetrieb an den Rädern gegebenenfalls vergleichsweise schnell ein sehr scharf abgegrenztes Verschleißbild entsteht, wodurch die Standzeiten der Räder
20 gegebenenfalls erheblich verringert werden.

Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zu Grunde, ein Verfahren sowie eine Vorrichtung der eingangs genannten Art zur Verfügung zu stellen, welches bzw. welche die oben genannten Nachteile nicht oder zumindest in geringerem Maße aufweist und insbesondere auf einfache und zuverlässige Weise eine Verbesserung des
25 Verschleißverhaltens der Räder ermöglicht.

Die vorliegende Erfindung löst diese Aufgabe ausgehend von einem Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1 durch die im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 angegebenen Merkmale. Sie löst diese Aufgabe weiterhin ausgehend von einer Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 25 durch die im kennzeichnenden Teil
30 des Anspruchs 25 angegebenen Merkmale.

Der vorliegenden Erfindung liegt die technische Lehre zu Grunde, dass man auf einfache und zuverlässige Weise eine Verbesserung des Verschleißverhaltens der Räder erzielen kann, wenn in dem jeweiligen Frequenzbereich für die Regelung ein Sollwert verwendet werden, der einem mit einem vorgebbaren Korrekturfaktor multiplizierten Ideal-Sollwert entspricht. Über den Korrekturfaktor ist es dann möglich, die Regelung gegenüber der an den Rädern lokal sehr verschleißträchtigen Ideal-Regelung gezielt zu verstimmen, ohne die Vorteile der Ideal-Regelung aufgeben zu müssen. Es hat sich gezeigt, dass schon mit kleinen, definierten Abweichungen von der Idealregelung bei nach wie vor gutem Bogenlaufverhalten und guter Stabilisierung im geraden Gleis eine deutlich bessere Verteilung des Verschleißes auf Radlauflächen erzielen lässt, wodurch sich ein deutlich günstigeres Verschleißbild und damit längere Standzeiten ergeben.

Dabei kann vorgesehen sein, dass gegebenenfalls auch über längere Strecken die Ideal-Regelung ausgeführt wird, d. h. der betreffende Korrekturfaktor gleich Eins gewählt wird, und nur von Zeit zu Zeit die Regelung gegenüber der Ideal-Regelung definiert verstimmt wird, d. h. der betreffende Korrekturfaktor ungleich Eins gewählt wird. Weiterhin kann vorgesehen sein, dass die Verstimmung der Regelung gegenüber der Ideal-Regelung über den Korrekturfaktor nach einem vorgegebenen zeitlichen Verlauf, beispielsweise stetig, verändert wird. Hierdurch lassen sich beliebige Verschleißverteilungen erzielen.

Die Stellbewegungen in den beiden Frequenzbereichen können einander in der bekannten Weise überlagert werden, wobei sie an der jeweiligen Radeinheit gegebenenfalls durch einen einzigen Aktuator bewirkt werden können.

Erfindungsgemäß ist daher vorgesehen, dass die Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit in dem ersten Frequenzbereich unter Verwendung eines ersten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren ersten Korrekturfaktor (K_1) multiplizierten ersten Ideal-Sollwert entspricht, wobei der erste Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des ersten Sollwerts mit dem ersten Ideal-Sollwert (d. h. $K_1 = 1$) bei der aktuellen Krümmung des Gleises eine zumindest annähernd bogenradiale Einstellung der ersten Radeinheit vorliegt. Zusätzlich oder alternativ ist vorgesehen, dass die Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit in dem zweiten Frequenzbereich unter Verwendung eines zweiten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren zweiten Korrekturfaktor (K_2) multiplizierten zweiten Ideal-Sollwert entspricht, wobei der erste Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des ersten Sollwerts mit dem ersten Ideal-Sollwert (d. h. $K_1 = 1$) durch Gleislagestörungen oder

durch einen Sinuslauf verursachte Querbewegungen wenigstens der ersten Radeinheit im Wesentlichen kompensiert werden.

Bevorzugt liegt im Fall einer Übereinstimmung des ersten Sollwerts mit dem ersten Ideal-Sollwert bei der aktuellen Krümmung des Gleises eine exakt bogenradiale Einstellung der ersten Radeinheit vor und das Rückstell-Wendemoment der ersten Primärfederung ist mit dem aus der Rad-Schiene-Paarung resultierenden Wendemoment im Wesentlichen im Gleichgewicht, sodass der wenigstens eine erste Aktuator momentan im Wesentlichen kein Wendemoment aufbringen muss.

Mit anderen Worten wird bei Bogenfahrt in dem ersten Frequenzbereich bevorzugt zugelassen, dass der Aktuator der durch die Gleiskrümmung bedingten Ausdrehbewegung der Radeinheit folgt, bis sich wie bei einem passiven bogenfreundlichen Fahrwerk eine zumindest annähernd bogenradiale Einstellung der Radeinheit einstellt. Hierdurch kann gegebenenfalls eine Messung oder anderweitige Ermittlung der aktuellen Gleiskrümmung entfallen, sondern gegebenenfalls nur anhand der im ersten Frequenzbereich vorliegenden Last am Aktuator festgestellt werden, dass die bogenradiale Einstellung vorliegt, bzw. anhand der Parameter des Fahrwerks und des aktuellen Fahrzustands (Fahrgeschwindigkeit, Querbeschleunigung etc.) auf den für die exakt bogenradiale Einstellung erforderlichen Wendewinkel geschlossen. Dies hat den Vorteil, dass im Vergleich zu einer in der Regel mehr oder weniger aufwändigen Ermittlung der aktuellen Gleiskrümmung eine deutlich geringere Zeitverzögerung in der Nachführung erzielt werden kann.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass dieses Zulassen bzw. Folgen der passiven Ausdrehbewegung der Radeinheit einen von der Verwendung der Korrekturfaktoren unabhängigen, eigenständig schutzfähigen Erfindungsgedanken darstellt.

Bei bevorzugten Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens ist vorgesehen, dass der wenigstens eine erste Aktuator in dem ersten Frequenzbereich einer durch eine Änderung der Krümmung des Gleises bedingten Wendebewegung der ersten Radeinheit derart nachgeführt wird, dass der wenigstens eine erste Aktuator im Fall einer Übereinstimmung des ersten Sollwerts mit dem ersten Ideal-Sollwert bei der aktuellen Krümmung des Gleises momentan in dem ersten Frequenzbereich im Wesentlichen kein Wendemoment aufbringt.

Für den ersten Frequenzbereich, also die Anpassung des Wendewinkels an den Bogenlauf, basiert das Regelkonzept auf der Momentenbilanz der um eine Fahrzeughochachse wirkenden Wendemomente (bzw. Kräftepaare) an der jeweiligen Radeinheit bei bogenradialer Einstellung der Radeinheit. Diese berechnet sich zu:

$$M_{Tx} + M_{cxp} + M_{Akt} = 0, \quad (1)$$

wobei: M_{Tx} : Wendemoment aus dem aus der Rad-Schiene-Paarung in beiden Radaufstandspunkten resultierenden Kräftepaar (z. B. Kräftepaar der Längsschlupfkräfte);

M_{cxp} : Wendemoment aus den Rückstellkräften der Primärfederung;

10 M_{Akt} : Wendemoment aus den Anteilen der Stellkräfte des Aktuators im ersten Frequenzbereich.

Bei der soeben beschriebenen Nachführung des ersten Aktuators mit der Lastfreiheit ($M_{Akt} = 0$) beim ersten Ideal-Sollwert ergibt sich aus Gleichung (1) somit:

$$M_{Tx} = -M_{cxp}. \quad (2)$$

15 Diese Variante der erfindungsgemäßen Regelung bedeutet letztlich, dass das Wendemoment aus den Rückstellkräften der Primärfederung das aus der Rad-Schiene-Paarung resultierende Wendemoment kompensiert, wie dies bei einem passiven bogenfreundlichen Fahrwerk (ohne einen Aktuator) der Fall ist. Hierbei wird mit anderen Worten ein passives bogenfreundliches Fahrwerk nachgebildet, wobei am Aktuator für das
20 Ausdrehen aus der jeweiligen Lage anders als bei einem Verfahren mit aktiver gleiskrümmungsabhängiger Nachführung des Wendewinkels in vorteilhafter Weise gegebenenfalls nur ein minimaler Energieaufwand zu betreiben ist. Gegebenenfalls wird der Aktuator nur annähernd lastfrei in die jeweilige Position mitgenommen. Während passive bogenfreundliche Fahrwerke aber wegen der reduzierten Längssteifigkeit der
25 Radsatzanlenkung nur eine beschränkte Stabilität aufweisen, ist dieser Nachteil bei der erfindungsgemäßen aktiven Regelung behoben.

Über den ersten Korrekturfaktor K_1 kann der bei der Regelung verwendete erste Sollwert gegenüber dem ersten Ideal-Sollwert verstimmt werden. Dadurch kann wie erwähnt auch eine Über- bzw. Unterkompensation erreicht werden, was jedoch mit einem

Energieaufwand verbunden ist und $M_{Akt} \neq 0$ zur Folge hat. Mit $K_1 = 0$ kann z. B. sogar eine starre Radsatzanlenkung wie beim konventionellen passiven Fahrzeug realisiert werden.

Dem Aktuator kann hierbei intermittierend oder kontinuierlich ein neuer Ideal-Sollwert für seine Auslenkung vorgegeben werden, bei dem dann die zu erzielende Lastfreiheit erreicht wird. Mit anderen Worten kann der Ideal-Sollwert intermittierend oder
5 kontinuierlich der Ausdrehbewegung und damit der aktuellen Gleiskrümmung nachgeführt werden. Als Führungsgröße für die Nachführung des Ideal-Sollwerts kann eine beliebige Größe verwendet werden, welche für die Lastfreiheit des Aktuators repräsentativ ist. So wird diese Größe bevorzugt in Abhängigkeit von dem Messprinzip gewählt, mit dem die
10 Aktuatorlast bestimmt wird.

Das der Krümmung des Gleises entsprechende Nachführen des ersten Ideal-Sollwerts kann auf beliebige geeignete Weise erfolgen. Bevorzugt werden der Wendewinkel der ersten Radeinheit und eine für die Last am Aktuator repräsentative Größe (z. B. eine Kraftwert, ein Momentenwert, ein Druckwert, ein Stromwert etc.) erfasst. Es wird ein
15 entsprechender neuer erster Ideal-Sollwert vorgegeben, falls die Last am Aktuator von Null abweicht. Dies kann intermittierend oder kontinuierlich erfolgen, wobei beispielsweise über eine zeitliche Integration der für die Last am Aktuator repräsentativen Größe sichergestellt werden kann, dass nur die Lastsituation am Aktuator in dem ersten Frequenzbereich erfasst wird.

Bei dem ersten Ideal-Sollwert kann es sich um eine beliebige geeignete Größe handeln, über welche die gewünschte Einstellung der Radeinheit erzielt werden kann. Insbesondere kann gegebenenfalls auch direkt eine für die Lastfreiheit des Aktuators repräsentative Größe verwendet werden. Bevorzugt ist der erste Ideal-Sollwert ein erster Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z1si}), welcher der Krümmung des Gleises nachgeführt wird.

Wie bereits oben erwähnt, kann vorgesehen sein, dass der erste Korrekturfaktor (K_1) zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt wird, um eine Verteilung des Verschleißes über die Radlaufflächen zu erzielen. Zusätzlich oder alternativ kann vorgesehen sein, dass der erste Korrekturfaktor (K_1) zumindest zeitweise gleich Eins gewählt wird, um in dieser Zeit ein der Ideallinie zumindest angenähertes Fahrverhalten zu erzielen. Ebenso kann
25 zusätzlich oder alternativ vorgesehen sein, dass der erste Korrekturfaktor (K_1) nach einem vorgebbaren Verlauf variiert wird, wobei insbesondere eine stetige Variation möglich ist, um eine günstige Verschleißverteilung zu erzielen.
30

Die vorbeschriebene Regelung kann in einer bevorzugten ersten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens für alle Radeinheiten des Fahrwerks erfolgen, sodass bei allen letztlich ein Bogenlaufverhalten wie bei einem passiven bogenfreundlichen Fahrwerk nachgebildet werden kann. Wie insbesondere aus Gleichung (1) ersichtlich wird, ist mit dieser Regelung die Idealvorstellung eines Bogenlaufs mit $M_{Tx} = 0$ (d. h. ohne aus der Rad-Schiene-Paarung resultierendes Wendemoment) und ausgeglichenen bogenradialen Gleisquerkräften zwar nicht erreicht, es lassen sich jedoch bei hoher erzielbarer Fahrstabilität mit sehr geringem Energieaufwand sehr gute Bogenlauf- und Verschleißeigenschaften erzielen.

- 10 Die Summe der bogenradialen lateralen Gleisquerkräfte lässt sich beispielsweise bei einem typischen Schienenfahrzeug, dessen Fahrzeugkörper über je eine Sekundärfederung auf zwei Fahrwerken mit je zwei Radeinheiten abgestützt ist, für das in Fahrtrichtung vorlaufende Fahrwerk jeweils berechnen zu:

$$\sum Y_1 = \frac{F_{aq}}{2} + \frac{M_{cxs}}{2a} - \frac{(M_{Tx1} + M_{Tx2})}{2a}, \quad (3)$$

15
$$\sum Y_2 = \frac{F_{aq}}{2} - \frac{M_{cxs}}{2a} + \frac{(M_{Tx1} + M_{Tx2})}{2a} \quad (4)$$

und für das in Fahrtrichtung nachlaufende Fahrwerk jeweils berechnen zu:

$$\sum Y_1 = \frac{F_{aq}}{2} - \frac{M_{cxs}}{2a} - \frac{(M_{Tx1} + M_{Tx2})}{2a}, \quad (5)$$

$$\sum Y_2 = \frac{F_{aq}}{2} + \frac{M_{cxs}}{2a} + \frac{(M_{Tx1} + M_{Tx2})}{2a}, \quad (6)$$

wobei: $\sum Y_1$: Summe der lateralen Gleiskräfte an der jeweiligen in Fahrtrichtung vorlaufenden Radeinheit;

$\sum Y_2$: Summe der lateralen Gleiskräfte an der jeweiligen in Fahrtrichtung nachlaufenden Radeinheit;

F_{aq} : Fliehkraft, die auf das Schienenfahrzeug wirkt;

M_{Tx1} : Wendemoment aus der Rad-Schiene-Paarung an der jeweiligen in Fahrtrichtung vorlaufenden Radeinheit;

M_{Tx2} : Wendemoment aus der Rad-Schiene-Paarung an der jeweiligen in Fahrtrichtung nachlaufenden Radeinheit;

M_{cxs} : Wendemoment aus den Rückstellkräften der jeweiligen; Sekundärfederung;

5 2a : Achsabstand der Radeinheiten am jeweiligen Fahrwerk.

Es hat sich gezeigt, dass eine Verbesserung gegenüber dem passiv radial einstellbaren Bogenlauf ($M_{Akt} = 0$ und $M_{Tx} = -M_{cxp}$) nur mit nennenswertem Energieaufwand am Aktuator ($M_{Akt} \gg 0$) möglich ist, um sich der Idealvorstellung eines Bogenlaufs (mit $M_{Tx} = 0$ und $\Sigma Y_1 = \Sigma Y_2$) anzunähern. Allerdings ist es mit den nachfolgend beschriebenen Varianten
10 des erfindungsgemäßen Verfahrens möglich, durch entsprechend reduzierten Energieeinsatz eine gute Annäherung an den idealen Bogenlauf zu erzielen.

So ist bei einer bevorzugten zweiten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens vorgesehen, dass das Fahrwerk eine der ersten Radeinheit nachlaufende zweite Radeinheit mit zwei Rädern umfasst, auf der die Fahrzeugstruktur über eine zweite
15 Primärfederung abgestützt ist. Der Wendewinkel der zweiten Radeinheit wird über wenigstens einen zwischen der zweiten Radeinheit und der Fahrzeugstruktur wirkenden zweiten Aktuator eingestellt. Während die Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit gemäß der obigen ersten Variante erfolgt (d. h. $M_{Akt} = 0$), erfolgt die Einstellung des Wendewinkels der zweiten Radeinheit in dem ersten Frequenzbereich unter
20 Verwendung eines dritten Sollwerts, der einem mit einem vorgebbaren dritten Korrekturfaktor (K_3) multiplizierten dritten Ideal-Sollwert entspricht. Dabei wird der dritte Ideal-Sollwert so gewählt, dass im Fall einer Übereinstimmung des dritten Sollwerts mit dem dritten Ideal-Sollwert (d. h. $K_3 = 1$) das bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierende Wendemoment an der ersten Radeinheit
25 entgegengesetzt gleich dem bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierenden Wendemoment an der zweiten Radeinheit ist (d. h. $M_{Tx1} = -M_{Tx2}$).

Aus den Gleichungen (3) bis (6) folgt hiermit:

$$\sum Y_i = \frac{F_{aq}}{2} \pm \frac{M_{cxs}}{2a}, \quad (7)$$

$$\sum Y_2 = \frac{F_{aq}}{2} \mp \frac{M_{cxs}}{2a}. \quad (8)$$

Hierdurch wird mit anderen Worten erreicht, dass die Summen der lateralen Gleiskräfte ΣY_1 und ΣY_2 bis auf den Anteil der Rückstellkräfte der jeweiligen Sekundärfederung ausgeglichen sind.

- 5 Bei dem dritten Ideal-Sollwert kann es sich wiederum um eine beliebige geeignete Größe handeln, über welche die gewünschte Einstellung der Radeinheit erzielt werden kann. Bevorzugt ist der dritte Ideal-Sollwert ein dritter Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z3si}), der sich bevorzugt aus dem bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierenden Wendemoment (M_{Tx1}) an der ersten Radeinheit, einer für das
- 10 Fahrwerk vorgegebenen Abhängigkeit des Wendemoments (M_{cxp2}) der zweiten Primärfederung von dem Wendewinkel (φ_{z3}) der zweiten Radeinheit und einer für das Fahrwerk vorgegebenen Abhängigkeit des Wendemoments (M_{Akt2}) des zweiten Aktuators von dem Wendewinkel (φ_{z3}) der zweiten Radeinheit berechnet. Eine solche Abhängigkeit des Wendemoments (M_{Akt2}) des zweiten Aktuators von dem Wendewinkel (φ_{z3}) der zweiten
- 15 Radeinheit kann in beliebiger Weise vorgegeben sein, beispielsweise durch eine vorab bestimmte Gleichung, eine Kennlinie oder ein Kennfeld etc., die bzw. das vorab für das Fahrzeug bestimmt wurde.

- Auch hier kann über den dritten Korrekturfaktor (K_3) wieder eine beliebige, gegebenenfalls zeitabhängige Verstimmung des verwendeten dritten Sollwerts gegenüber dem dritte
- 20 Ideal-Sollwert erzielt werden. So kann der dritte Korrekturfaktor (K_3) ähnlich dem ersten Korrekturfaktor (K_1) zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt werden und/oder zumindest zeitweise gleich Eins gewählt werden und/oder nach einem vorgebbaren Verlauf variiert werden.

- Bei einer bevorzugten dritten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens ist vorgesehen,
- 25 dass der wenigstens eine erste Aktuator in dem ersten Frequenzbereich einer durch eine Änderung der Krümmung des Gleises bedingten Wendebewegung der ersten Radeinheit derart nachgeführt wird, dass der wenigstens eine erste Aktuator bei Übereinstimmung des ersten Sollwerts mit dem ersten Ideal-Sollwert bei der aktuellen Krümmung des Gleises momentan in dem ersten Frequenzbereich ein Wendemoment aufbringt, welches
- 30 entgegengesetzt gleich dem Wendemoment der ersten Primärfederung ist (d. h. $M_{Akt1} = -M_{cxp1}$).

Bei einer bevorzugten Weiterbildung der dritten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens weist das Fahrwerk eine der ersten Radeinheit nachlaufende zweite Radeinheit mit zwei Rädern auf, auf der die Fahrzeugstruktur über eine zweite Primärfederung abgestützt ist, und der Wendewinkel der zweiten Radeinheit wird über
 5 wenigstens einen zwischen der zweiten Radeinheit und der Fahrzeugstruktur wirkenden zweiten Aktuator eingestellt. Hierbei ist vorgesehen, dass auch die zweite Radeinheit nach der dieser dritten Variante geregelt wird. Die Einstellung des Wendewinkels der zweiten Radeinheit in dem ersten Frequenzbereich erfolgt daher unter Verwendung eines dritten Sollwerts, der einem mit einem vorgebbaren dritten Korrekturfaktor (K_3) multiplizierten
 10 dritten Ideal-Sollwert entspricht. Der dritte Ideal-Sollwert wird wiederum so gewählt, dass im Fall einer Übereinstimmung des dritten Sollwerts mit dem dritten Ideal-Sollwert (d. h. $K_3 = 1$) der wenigstens eine zweite Aktuator in dem ersten Frequenzbereich einer durch eine Änderung der Krümmung des Gleises bedingten Wendebewegung der zweiten Radeinheit derart nachgeführt wird, dass der wenigstens eine zweite Aktuator bei der
 15 aktuellen Krümmung des Gleises momentan in dem ersten Frequenzbereich ein Wendemoment aufbringt, welches entgegengesetzt gleich dem Wendemoment der zweiten Primärfederung ist (d. h. $M_{Akt2} = -M_{cxp2}$).

Es ergibt sich hier aus Gleichung (1) also bei bogenradialer Einstellung der ersten Radeinheit ein Verschwinden des Wendemoments aus der Rad-Schiene-Paarung (d. h. $M_{Tx2} = 0$) und aus den Gleichungen (3) bis (6) wiederum:

$$\sum Y_1 = \frac{F_{aq}}{2} \pm \frac{M_{cxs}}{2a}, \quad (7)$$

$$\sum Y_2 = \frac{F_{aq}}{2} \mp \frac{M_{cxs}}{2a}. \quad (8)$$

Mit anderen Worten wird auch hiermit erreicht, dass die Summen der lateralen Gleiskräfte ΣY_1 und ΣY_2 bis auf den Anteil der Rückstellkräfte der jeweiligen Sekundärfederung
 25 ausgeglichen sind.

Bei dem ersten und/oder dritten Ideal-Sollwert kann es sich wiederum um eine beliebige geeignete Größe handeln, über welche die gewünschte Einstellung der betreffenden Radeinheit erzielt werden kann. Bevorzugt ist auch hier der erste und/oder dritte Ideal-

Sollwert ein erster und/oder dritter Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z1si} , φ_{z3si}), welcher der Krümmung des Gleises nachgeführt wird.

Das der Krümmung des Gleises entsprechende Nachführen des erste Ideal-Sollwerts bzw. des ersten Ideal-Soll-Wendewinkels (φ_{z1i}) kann auf beliebige geeignete Weise erfolgen.

- 5 Bevorzugt werden der Wendewinkel der ersten Radeinheit und eine für die Last am Aktuator repräsentative Größe (z. B. eine Kraftwert, ein Momentenwert, ein Druckwert, ein Stromwert etc.) erfasst. Es wird ein neuer erster Ideal-Sollwert bzw. Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z1i}) vorgegeben, falls die Last am Aktuator von derjenigen abweicht, welche sich bei diesem Wendewinkel aus dem Rückstellmoment der Primärfederung
10 ergeben würde.

- Auch hier kann über den ersten Korrekturfaktor (K_1) wie oben beschrieben wieder eine beliebige, gegebenenfalls zeit-, fahrsituations- und/oder streckensituationsabhängige Verstimmung des verwendeten ersten Sollwerts gegenüber dem ersten Ideal-Sollwert erzielt werden. So kann der erste Korrekturfaktor (K_1) zumindest zeitweise ungleich Eins
15 gewählt werden und/oder zumindest zeitweise gleich Eins gewählt werden und/oder nach einem vorgebbaren Verlauf variiert werden.

- Bei einer bevorzugten vierten bzw. fünften Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens weist das Fahrwerk eine der ersten Radeinheit nachlaufende zweite Radeinheit mit zwei Rädern auf, auf der die Fahrzeugstruktur über eine zweite Primärfederung abgestützt ist,
20 und der Wendewinkel der zweiten Radeinheit wird über wenigstens einen zwischen der zweiten Radeinheit und der Fahrzeugstruktur wirkenden zweiten Aktuator eingestellt. Weiterhin ist die Fahrzeugstruktur über eine Sekundärfederung auf der ersten Radeinheit und der zweiten Radeinheit abgestützt. Hierbei ist vorgesehen, dass die erste Radeinheit nach der obigen ersten Variante ($M_{Akt1} = 0$) bzw. dritten Variante ($M_{Akt1} = -M_{cxp1}$) geregelt
25 wird, während die Einstellung des Wendewinkels der zweiten Radeinheit in dem ersten Frequenzbereich unter Verwendung eines dritten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren dritten Korrekturfaktor (K_3) multiplizierten dritten Ideal-Sollwert entspricht. Der dritte Ideal-Sollwert wird dabei so gewählt, dass im Fall einer Übereinstimmung des dritten Sollwerts mit dem dritten Ideal-Sollwert (d. h. $K_3 = 1$) das bei der aktuellen Krümmung des
30 Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierende Wendemoment an der zweiten Radeinheit der Wendemoment-Differenz entspricht, die sich aus dem Produkt eines Laufrichtungsfaktors (L) mit dem aktuell vorliegenden Rückstell-Wendemoment aus der Sekundärfederung und dem Betrag des bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der

Rad-Schiene-Paarung resultierenden Wendemoments an der ersten Radeinheit ergibt, wobei der Laufrichtungsfaktor (L) für ein vorlaufendes Fahrwerk gleich 1 ist und für ein nachlaufendes Fahrwerk gleich -1 ist (d. h. $M_{Tx2} = M_{cxs} - M_{Tx1}$ für ein vorlaufendes Fahrwerk bzw. $M_{Tx2} = -M_{cxs} - M_{Tx1}$ für ein nachlaufendes Fahrwerk).

- 5 Bei der vierten Variante ($M_{Akt1} = 0$ und $M_{Tx2} = \pm M_{cxs} - M_{Tx1}$) und bei der fünften Variante ($M_{Akt1} = -M_{cxp1}$ und $M_{Tx2} = \pm M_{cxs} - M_{Tx1}$) ergibt sich hier aus den Gleichungen (3) bis (6) jeweils:

$$\sum Y_1 = \frac{F_{aq}}{2} \pm \frac{M_{cxs}}{2a} \mp \frac{M_{cxs}}{2a} = \frac{F_{aq}}{2}, \quad (9)$$

$$\sum Y_2 = \frac{F_{aq}}{2} \mp \frac{M_{cxs}}{2a} \pm \frac{M_{cxs}}{2a} = \frac{F_{aq}}{2}. \quad (10)$$

- 10 Mit anderen Worten wird auch hiermit erreicht, dass die Summen der lateralen Gleiskräfte ΣY_1 und ΣY_2 ausgeglichen sind (d. h. $\Sigma Y_1 = \Sigma Y_2$).

Bevorzugt umfasst das Fahrwerk dabei einen Fahrwerksrahmen, der über jeweils eine Primärfederung auf der ersten Radeinheit und der zweiten Radeinheit abgestützt ist, wobei die Fahrzeugstruktur über die Sekundärfederung auf dem Fahrwerksrahmen abgestützt ist. Zur Ermittlung des Rückstell-Wendemoments aus der Sekundärfederung wird der Wendewinkel zwischen dem Fahrwerksrahmen und der Fahrzeugstruktur ermittelt.

- 15

Bei dem dritten Ideal-Sollwert kann es sich wiederum um eine beliebige geeignete Größe handeln, über welche die gewünschte Einstellung der zweiten Radeinheit erzielt werden kann. Bevorzugt ist auch hier der dritte Ideal-Sollwert ein dritter Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z3si}), welcher der Krümmung des Gleises nachgeführt wird.

- 20

Auch hier kann über den dritten Korrekturfaktor (K_3) wie oben beschrieben wieder eine beliebige, gegebenenfalls zeitabhängige Verstimmung des verwendeten dritten Sollwerts gegenüber dem dritten Ideal-Sollwert erzielt werden. So kann der dritte Korrekturfaktor (K_3) zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt werden und/oder zumindest zeitweise gleich Eins gewählt werden und/oder nach einem vorgebbaren Verlauf variiert werden.

- 25

Der erste Frequenzbereich kann grundsätzlich auf einem beliebigen für die bogenradiale Einstellung der Radeinheiten geeignet niedrigen Niveau liegen. Bevorzugt umfasst der erste Frequenzbereich 0 bis 1 Hz, insbesondere 0 bis 0,5 Hz.

Der zweite Frequenzbereich kann grundsätzlich auf einem beliebigen für die

- 5 Stabilitätsregelung der Radeinheiten im geraden Gleis aber auch im Gleisbogen geeigneten Niveau liegen. Bevorzugt liegt der zweite Frequenzbereich zumindest teilweise oberhalb des ersten Frequenzbereichs, um eine einfache Trennung zwischen den beiden Frequenzbereichen zu ermöglichen. Bevorzugt umfasst der zweite Frequenzbereich 4 bis 8 Hz.

- 10 Für die Stabilitätsregelung der Radeinheiten im geraden Gleis aber auch im Gleisbogen ist bevorzugt vorgesehen, dass die momentane Quergeschwindigkeit der ersten Radeinheit sowie die momentane Fahrgeschwindigkeit des Schienenfahrzeugs ermittelt werden. Aus der ermittelten momentanen Quergeschwindigkeit der ersten Radeinheit und der momentanen Fahrgeschwindigkeit des Schienenfahrzeugs wird für den zweiten
- 15 Frequenzbereich als zweiter Ideal-Sollwert ein zweiter Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z2s}) berechnet. Dabei wird der zweite Ideal-Soll-Wendewinkel so gewählt, dass im Fall einer Übereinstimmung eines den zweiten Sollwert darstellenden zweiten Soll-Wendewinkels mit dem zweiten Ideal-Soll-Wendewinkel (d. h. $K_2 = 1$) eine zur ermittelten Quergeschwindigkeit der ersten Radeinheit entgegengesetzt gleiche Quergeschwindigkeit
- 20 der ersten Radeinheit bewirkt wird. Hiermit kann mit anderen Worten die resultierende Quergeschwindigkeit der Radeinheit zu Null geregelt werden.

- Bevorzugt ist hierbei vorgesehen, dass die momentane Quergeschwindigkeit der ersten Radeinheit über einen Geschwindigkeitssensor erfasst wird oder eine von einem Beschleunigungssensor erfasste momentane Querbeschleunigung der ersten Radeinheit
- 25 zur momentanen Quergeschwindigkeit des Radsatzes integriert wird. Zusätzlich oder alternativ wird als momentane Fahrgeschwindigkeit des Schienenfahrzeugs eine aus einem übergeordneten Zugleitsystem zur Verfügung gestellte Fahrgeschwindigkeit verwendet. Zusätzlich oder alternativ wird die momentane Fahrgeschwindigkeit des Schienenfahrzeugs aus einer Messung der Drehzahl mindestens eines Rades des
- 30 Schienenfahrzeugs ermittelt.

Auch hier kann über den zweiten Korrekturfaktor (K_2) wie oben für die bogenradiale Einstellung beschrieben auch für die Stabilitätsregelung wieder eine beliebige,

gegebenenfalls zeitabhängige Verstimmung des verwendeten zweiten Sollwerts gegenüber dem zweiten Ideal-Sollwert erzielt werden. So kann der zweite Korrekturfaktor (K_2) zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt werden und/oder zumindest zeitweise gleich Eins gewählt werden und/oder nach einem vorgebbaren Verlauf variiert werden.

- 5 Die vorliegende Erfindung betrifft weiterhin eine Vorrichtung zur Regelung eines wenigstens eine erste Radeinheit mit zwei Rädern umfassenden aktiven Fahrwerks eines Schienenfahrzeugs, umfassend eine Regeleinrichtung und wenigstens einen durch eine Regeleinrichtung geregelten ersten Aktuator, der zwischen der ersten Radeinheit und einer über eine erste Primärfederung darauf abgestützten Fahrzeugstruktur wirkt. Dabei
- 10 nimmt die Regeleinrichtung über den wenigstens einen ersten Aktuator in einem ersten Frequenzbereich eine Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit um eine Fahrwerkshochachse bezüglich der Fahrzeugstruktur in Abhängigkeit von der aktuellen Krümmung des Gleises vor. Zusätzlich oder alternativ wirkt die Regeleinrichtung über den wenigstens einen ersten Aktuator in einem zweiten Frequenzbereich durch
- 15 Gleislagestörungen oder durch einen Sinuslauf verursachten Querbewegungen wenigstens der ersten Radeinheit entgegen. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass die Regeleinrichtung derart ausgebildet ist, dass die Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit in dem ersten Frequenzbereich unter Verwendung eines ersten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren ersten Korrekturfaktor (K_1) multiplizierten ersten
- 20 Ideal-Sollwert entspricht, wobei der erste Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des ersten Sollwerts mit dem ersten Ideal-Sollwert (d. h. $K_1 = 1$) bei der aktuellen Krümmung des Gleises eine zumindest annähernd bogenradiale Einstellung der ersten Radeinheit vorliegt. Zusätzlich oder alternativ ist erfindungsgemäß vorgesehen, dass die Regeleinrichtung derart ausgebildet ist, dass die Einstellung des Wendewinkels
- 25 der ersten Radeinheit in dem zweiten Frequenzbereich unter Verwendung eines zweiten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren zweiten Korrekturfaktor (K_2) multiplizierten zweiten Ideal-Sollwert entspricht, wobei der zweite Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des zweiten Sollwerts mit dem zweiten Ideal-Sollwert (d. h. $K_2 = 1$) durch Gleislagestörungen oder durch einen Sinuslauf verursachte
- 30 Querbewegungen wenigstens der ersten Radeinheit im Wesentlichen kompensiert werden.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung eignet sich zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung lassen sich die oben beschriebenen

Varianten und Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens in demselben Maße realisieren, sodass hier auf die obigen Ausführungen verwiesen werden soll.

Die vorliegende Erfindung betrifft weiterhin ein Schienenfahrzeug mit einem wenigstens eine erste Radeinheit mit zwei Rädern umfassenden aktiven Fahrwerk und einer
5 erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Regelung des aktiven Fahrwerks. Auch mit dem erfindungsgemäßen Schienenfahrzeug lassen sich die oben beschriebenen Varianten und Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens in demselben Maße realisieren, sodass hier ebenfalls auf die obigen Ausführungen verwiesen werden soll.

Weitere bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den
10 Unteransprüchen bzw. der nachstehenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele, welche auf die beigefügten Zeichnungen Bezug nimmt. Es zeigen:

Figur 1 eine schematische Ansicht eines Teils einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Schienenfahrzeugs von unten;

15 Figur 2 eine schematische Ansicht eines Details des Schienenfahrzeugs aus Figur 1 zur Erläuterung der Bogenlaufregelung im ersten Frequenzbereich;

Figur 3 eine schematische Ansicht eines Details des Schienenfahrzeugs zur Erläuterung der Stabilitätsregelung im zweiten Frequenzbereich.

Die vorliegende Erfindung wird nachfolgend anhand mehrerer Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Verfahrens beschrieben, welche jeweils bei dem Schienenfahrzeug
20 aus den Figuren 1 bis 3 zur Anwendung kommen können.

Figur 1 zeigt – in einer Ansicht von unten, d. h. aus Richtung des Gleisbetts – einen Teil eines erfindungsgemäßen Schienenfahrzeugs 101 mit einem Wagenkasten 102, der sich auf einem aktiven Fahrwerk in Form eines Drehgestells 103 abstützt. Das Drehgestell 103 umfasst einen Drehgestellrahmen 104, eine erste Radeinheit in Form eines ersten
25 Radsatzes 105 und eine zweite Radeinheit in Form eines zweiten Radsatzes 106. Der Drehgestellrahmen 104 ist dabei über eine erste Primärfederung 107 auf dem ersten Radsatz 105 und über eine zweite Primärfederung 108 auf dem zweiten Radsatz 106 abgestützt.

Zur aktiven Beeinflussung des Fahrverhaltens des Drehgestells 103 wirkt zwischen dem ersten Radsatz 105 und dem Drehgestellrahmen 104 ein erster Aktuator 109, während zwischen dem zweiten Radsatz 106 und dem Drehgestellrahmen 104 ein zweiter Aktuator 110 wirkt. Hierzu ist der jeweilige Aktuatoren 109, 110 einerseits am Drehgestellrahmen 104 und andererseits an einem der Radlagergehäuse des zugehörigen Radsatzes 105, 106 angelenkt.

Die beiden Aktuatoren 109, 110 erzeugen aktiv Wendebewegungen des zugehörigen Radsatzes 105, 106 um eine senkrecht zur Zeichnungsebene der Figur 1 verlaufende Hochachse des Schienenfahrzeugs 101. Die beiden Aktuatoren 109, 110 beeinflussen mit anderen Worten aktiv den Wendewinkel des zugehörigen Radsatzes 105, 106 um eine senkrecht zur Zeichnungsebene der Figur 1 verlaufende Hochachse des Schienenfahrzeugs 101.

Hierzu erzeugt der jeweilige Aktuator 109, 110 am zugehörigen Radsatz 105, 106 ein Wendemoment um die Hochachse des Schienenfahrzeugs 101. Im gezeigten Beispiel mit nur einem Aktuator 109, 110 je Radsatz 105, 106 wird dabei die zweite Komponente des Kräftepaares am jeweiligen Radsatz 105, 106 von der Stützkraft aufgebracht, die an einem entsprechenden Anlenkpunkt (Anschläge etc.) des jeweiligen gegenüberliegenden Radlagergehäuses am Drehgestellrahmen 104 wirkt.

Es versteht sich hierbei, dass bei anderen Varianten der Erfindung auch mehrere Aktuatoren je Radsatz vorgesehen sein können, wie dies in Figur 1 durch die gestrichelten Konturen 111, 112 abgedeutet ist. Die Aktuatoren 109, 110 sind in Figur 1 der Einfachheit halber als Linearaktuatoren dargestellt. Es versteht sich jedoch, dass auch beliebige andere lineare oder rotatorische Aktuatoren sowie auch beliebige andere Anlenkungen bzw. Getriebe zwischen den Radsätzen und dem Drehgestellrahmen vorgesehen sein können. Eine Reihe möglicher Beispiele hierfür findet sich beispielsweise in der eingangszitierten DE 101 37 443 A1. Weiterhin können die Aktuatoren 109, 110 auf einem beliebigen Wirkprinzip basieren. So können hydromechanische, elektromechanische Wirkprinzipien oder beliebige Kombinationen hieraus vorgesehen sein.

Die Regelung des Drehgestells erfolgt über eine Regeleinrichtung 113, welche mit dem jeweiligen Aktuator 109, 110 verbunden ist und diesen jeweils entsprechend ansteuert. Dabei können unterschiedliche Varianten der erfindungsgemäßen Regelung verfolgt werden, welche nachfolgend beispielhaft beschrieben werden.

Allen diesen Varianten ist gemeinsam, dass in einem ersten Frequenzbereich eine Einstellung des Wendewinkels des jeweiligen Radsatzes 105, 106 in Abhängigkeit von der aktuellen Krümmung des Gleises erfolgt und in einem zweiten Frequenzbereich eine überlagerte Einstellung des Wendewinkels des jeweiligen Radsatzes 105, 106 derart erfolgt, dass durch Gleislagestörungen oder durch einen Sinuslauf verursachten Querbewegungen entgegengewirkt wird.

Mit anderen Worten erfolgt in dem ersten Frequenzbereich also eine Bogenlaufregelung während in dem zweiten Frequenzbereich eine überlagerte Stabilitätsregelung erfolgt. Der erste Frequenzbereich reicht dabei von 0 bis 0,5 Hz, während der zweite Frequenzbereich von 4 bis 8 Hz reicht. Hierdurch ist es möglich, das Fahrverhalten des Drehgestells und damit des Schienenfahrzeugs sowohl im Gleisbogen als auch bei hohen Geschwindigkeiten im geraden Gleis zu optimieren.

Erstes Ausführungsbeispiel

Bei einer ersten bevorzugten erfindungsgemäßen Regelungsvariante erfolgt die Bogenlaufregelung, also die Einstellung des Wendewinkels des ersten Radsatzes 105 in dem ersten Frequenzbereich, durch die Regeleinrichtung 113 unter Verwendung eines ersten Soll-Wendewinkels φ_{z1s} , der einem mit einem vorgebbaren ersten Korrekturfaktor K_1 multiplizierten ersten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z1si} entspricht, d. h. es gilt:

$$\varphi_{z1s} = K_1 \cdot \varphi_{z1si} \quad (11)$$

Der erste Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z1si} wird dabei so gewählt, dass bei $K_1 = 1$, d. h. im Fall einer Übereinstimmung des ersten Soll-Wendewinkels φ_{z1s} mit dem ersten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z1si} bei der aktuellen Krümmung des Gleises eine bogenradiale Einstellung des ersten Radsatzes 105 vorliegt.

Weiterhin erfolgt die Regelung so, dass der erste Aktuator 109 im ersten Frequenzbereich momentan im Wesentlichen kein Wendemoment aufbringen muss, d. h. es gilt $M_{Ak1} = 0$. Wie sich aus der Momentenbilanz gemäß Gleichung (1) mit den in Figur 2 am ersten Radsatz 105 dargestellten Wendemomenten ergibt, gilt somit, dass das Rückstell-Wendemoment M_{cxp1} der ersten Primärfederung 107 mit dem aus der Rad-Schiene-Paarung resultierenden Wendemoment M_{rx1} am ersten Radsatz 105 im Wesentlichen im

Gleichgewicht ist, wie dies bei einem passiven bogenfreundlichen Fahrwerk der Fall ist, d. h. es gilt:

$$M_{Tx1} = -M_{cxp1} . \quad (2)$$

Bei dieser Variante wird bei Bogenfahrt in dem ersten Frequenzbereich mit anderen Worten zugelassen, dass der erste Aktuator 109 der durch die Gleiskrümmung bedingten Ausdrehbewegung des ersten Radsatzes 105 folgt, bis sich wie bei einem passiven bogenfreundlichen Fahrwerk eine zumindest annähernd bogenradiale Einstellung des ersten Radsatzes 105 einstellt.

Für den ersten Aktuator 109 wird beim Ausdrehen des ersten Radsatzes 105 aus einer aktuellen Position intermittierend oder kontinuierlich ein neuer erster Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z1si} vorgegeben, bei dem die zu erzielende Lastfreiheit angesichts der aktuellen Last am ersten Aktuator 109 erwartet wird. Mit anderen Worten kann der erste Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z1si} intermittierend oder kontinuierlich der Ausdrehbewegung und damit der aktuellen Gleiskrümmung nachgeführt werden. Als Führungsgröße für die Nachführung des ersten Ideal-Soll-Wendewinkels φ_{z1si} kann eine beliebige Größe verwendet werden, welche für die Lastfreiheit des Aktuators repräsentativ ist. So wird diese Größe bevorzugt in Abhängigkeit von dem Messprinzip gewählt, mit dem die Aktuatorlast bestimmt wird.

Bevorzugt werden der aktuelle Wendewinkel des ersten Radsatzes 105 und eine für die aktuelle Last am ersten Aktuator 109 repräsentative Größe (z. B. eine Kraftwert, ein Momentenwert, ein Druckwert, ein Stromwert etc.) über geeignete Sensoren erfasst. Es wird dann ein entsprechender neuer erster Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z1si} vorgegeben, falls die Last am ersten Aktuator 109 von Null abweicht. Dies kann intermittierend oder kontinuierlich erfolgen, wobei beispielsweise über eine zeitliche Integration der für die Last am Aktuator 109 repräsentativen Größe sichergestellt werden kann, dass nur die Lastsituation am Aktuator 109 in dem ersten Frequenzbereich erfasst wird.

Hierdurch kann eine Messung oder anderweitige Ermittlung der aktuellen Gleiskrümmung entfallen, sondern gegebenenfalls nur anhand der im ersten Frequenzbereich vorliegenden Last am ersten Aktuator 109 festgestellt werden, dass die bogenradiale Einstellung vorliegt, bzw. anhand der Parameter des Drehgestells 103 und des aktuellen Fahrzustands (Fahrgeschwindigkeit, Querbeschleunigung etc.) auf den für die exakt

bogenradiale Einstellung erforderlichen Wendewinkel geschlossen. Dies hat den Vorteil, dass im Vergleich zu einer in der Regel mehr oder weniger aufwändigen Ermittlung der aktuellen Gleiskrümmung eine deutlich geringere Zeitverzögerung in der Nachführung erzielt werden kann.

- 5 Über den ersten Korrekturfaktor K_1 kann der bei der Regelung verwendete erste Soll-Wendewinkel φ_{z1s} gegenüber dem ersten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z1si} gezielt verstimmt werden. Dadurch kann auch eine Über- bzw. Unterkompensation erreicht werden, was jedoch mit einem Energieaufwand verbunden ist und $M_{Akt} \neq 0$ zur Folge hat. Mit $K_1 = 0$ kann z. B. sogar eine starre Radsatzanlenkung wie beim konventionellen passiven
10 Fahrzeug realisiert werden.

- Hiermit ist es möglich, die Regelung gegenüber der an den Rädern lokal sehr verschleißträchtigen Ideal-Regelung mit dem ersten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z1si} gezielt zu verstimmen, ohne die Vorteile der Ideal-Regelung aufgeben zu müssen. Es hat sich gezeigt, dass schon mit kleinen, definierten Abweichungen von der Idealregelung bei nach
15 wie vor gutem Bogenlaufverhalten und guter Stabilisierung im geraden Gleis eine deutlich bessere Verteilung des Verschleißes auf den Radlaufflächen erzielen lässt, wodurch sich ein deutlich günstigeres Verschleißbild und damit längere Standzeiten ergeben.

- Dabei kann vorgesehen sein, dass gegebenenfalls auch über längere Strecken die Ideal-Regelung ausgeführt wird, d. h. der Korrekturfaktor $K_1 = 1$ gewählt wird, und nur von Zeit
20 zu Zeit die Regelung gegenüber der Ideal-Regelung definiert verstimmt wird, d. h. der betreffende $K_1 \neq 1$ gewählt wird. Weiterhin kann vorgesehen sein, dass die Verstimmung der Regelung gegenüber der Ideal-Regelung über den Korrekturfaktor K_1 nach einem vorgegebenen zeitlichen Verlauf, beispielsweise stetig, verändert wird. Ebenso kann der Korrekturfaktor K_1 natürlich auch in Abhängigkeit von dem aktuellen oder zu erwartenden
25 Fahrzustand (Geschwindigkeit etc.) oder dem aktuellen oder zu erwartenden Streckenzustand (Streckenprofil etc.) variiert werden. Hierdurch lassen sich beliebige Verschleißverteilungen erzielen.

- Die vorbeschriebene Regelung erfolgt bei der ersten Regelungsvariante auch für den zweiten Radsatz 106 des Drehgestells 103, sodass bei allen Radsätzen letztlich ein
30 Bogenlaufverhalten wie bei einem passiven bogenfreundlichen Fahrwerk nachgebildet werden kann. Wie insbesondere aus der obigen Gleichung (1) ersichtlich wird, ist mit dieser Regelung die Idealvorstellung eines Bogenlaufs mit $M_{Tx} = 0$ (d. h. ohne aus der

Rad-Schiene-Paarung resultierendes Wendemoment) und ausgeglichenen bogenradialen Gleisquerkräften zwar nicht erreicht, es lassen sich jedoch bei hoher erzielbarer Fahrstabilität mit sehr geringem Energieaufwand sehr gute Bogenlauf- und Verschleißeigenschaften erzielen.

- 5 Der erste Radsatz 105 des fahrenden Schienenfahrzeugs 101 erfährt bei Überfahren einer lateralen Störstelle des Gleises eine bestimmte laterale Abweichung seiner Mitte von der mittleren Gleislage sowie daraus resultierend eine seitliche Beschleunigung, die zu einer Quergeschwindigkeit des ersten Radsatzes 105 zum Gleis führt. Bei entsprechender Profilkombination von Rädern und Schienen würde sich durch die Drehzahlkopplung der
 10 beiden starr auf der sie verbindenden Achswelle aufsitzenden Räder bei schwacher Bedämpfung eine sinusförmige Quer- und Wendebewegung des Radsatzes 105 – bei wie hier in dem Drehgestell 103 geführten Radsätzen 105, 106 auch des gesamten Fahrwerks – um seine Mittenposition resultieren. Diese Quer- und Wendebewegung würde bei
 15 Instabilität führen. Gleiches gilt für einen aus einer zufälligen lateralen Anfangsauslenkung resultierenden, immer weiter zunehmenden Sinuslauf, der zum instabilen Zick-Zack-Lauf entartet. Derartige Phänomene führen zu erhöhten Querkräften zwischen Rädern und Schienen, die zu verstärktem Verschleiß bis hin zu einer Verschiebung des Gleisrosts bzw. zu Entgleisungsgefahr führen können.
- 20 Um dies zu vermeiden, erfolgt bei der ersten Regelungsvariante eine Stabilitätsregelung des ersten Radsatzes 105 im geraden Gleis aber auch im Gleisbogen, also die Einstellung des Wendewinkels des ersten Radsatzes 105 in dem zweiten Frequenzbereich, durch die Regeleinrichtung 113 unter Verwendung eines zweiten Soll-Wendewinkels φ_{z2s} , der einem mit einem vorgebbaren zweiten Korrekturfaktor K_2 multiplizierten zweiten Ideal-Soll-
 25 Wendewinkel φ_{z2si} entspricht, d. h. es gilt:

$$\varphi_{z2s} = K_2 \cdot \varphi_{z2si} \quad (12)$$

- Der zweite Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z2si} wird dabei so gewählt, dass bei $K_2 = 1$, d. h. im Fall einer Übereinstimmung des zweiten Soll-Wendewinkels φ_{z2s} mit dem zweiten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z2si} , durch Gleislagestörungen oder durch einen Sinuslauf verursachte
 30 Querbewegungen des ersten Radsatzes 105 im Wesentlichen kompensiert werden.

Hierfür ist vorgesehen, dass die momentane Quergeschwindigkeit des ersten Radsatzes 105 sowie die momentane Fahrgeschwindigkeit des Schienenfahrzeugs 101 ermittelt werden. Aus der ermittelten momentanen Quergeschwindigkeit des ersten Radsatzes 105 und der momentanen Fahrgeschwindigkeit des Schienenfahrzeugs wird für den zweiten Frequenzbereich als zweiter Ideal-Sollwert ein zweiter Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z2si} berechnet. Dabei wird der zweite Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z2si} so gewählt, dass im Fall einer Übereinstimmung eines den zweiten Sollwert darstellenden zweiten Soll-Wendewinkels mit dem zweiten Ideal-Soll-Wendewinkel (d. h. $K_2 = 1$) eine zur ermittelten Quergeschwindigkeit des ersten Radsatzes 105 der ersten Radeinheit entgegengesetzt gleiche Quergeschwindigkeit des ersten Radsatzes 105 der ersten Radeinheit bewirkt wird. Hiermit kann mit anderen Worten die resultierende Quergeschwindigkeit des ersten Radsatzes 105 der Radeinheit zu Null geregelt werden.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird dagegen die momentane Quergeschwindigkeit des Radsatzes v_y durch geeignete Sensoren erfasst, welche z. B. an den Achslagern angebracht sind. Hierbei kann es sich beispielsweise um lateral wirkende Beschleunigungssensoren handeln, deren Signale zeitintegriert werden. Außerdem wird in die Regelung die momentane Fahrgeschwindigkeit v des Schienenfahrzeugs eingespeist, die beispielsweise aus dem übergeordneten Zugleitsystem oder von allgemein bekannten Geschwindigkeitsmessgeräten aufgenommen wird.

Ziel der Ideal-Regelung ($K_2 = 1$) ist es wie erwähnt, dem ersten Radsatz 105 mit seiner durch die Störung oder den Sinuslauf induzierten Quergeschwindigkeit v_y über den ersten Aktuator 109 eine entgegengesetzt gleiche Quergeschwindigkeit aufzuprägen. Dies geschieht, indem laufend ein momentaner zweiter Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z2si} als Führungsgröße berechnet wird, welcher bei entsprechender Einstellung des ersten Radsatzes 105 relativ zu seiner aktuellen Anlenkung, z.B. zum Fahrwerksrahmen, zur gewünschten gleich großen, aber entgegengesetzten Quergeschwindigkeit v_{yc} führt (vgl. Figur 3).

Dieser berechnete Wert des Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z2si} wird der Regeleinrichtung 113 des zu hinreichend hoher Dynamik bei hinreichend geringer Phasenverschiebung fähigen ersten Aktuators 109 zugeführt. Durch dessen Wirkung wird die durch die Gleislagestörung bzw. den Sinuslauf entstehende Querbewegung schon im Keim erstickt, so dass der erste Radsatz 105 trotz längsweicher Anlenkung seitlich und hinsichtlich seiner Wendebewegung in Ruhe bleibt.

Der zweite Radsatz 106 des Drehgestells 103 wird ebenfalls nach diesem Stabilitätsregelungsverfahren geregelt, um ihn trotz längsweicher Anlenkung seitlich und hinsichtlich seiner Wendebewegung in Ruhe zu halten.

- 5 Auch bei der Stabilitätsregelung kann über den zweiten Korrekturfaktor (K_2), wie oben für die bogenradiale Einstellung beschrieben, wieder eine beliebige, gegebenenfalls zeitabhängige Verstimmung des verwendeten zweiten Sollwerts gegenüber dem zweiten Ideal-Sollwert erzielt werden. So ist es also auch für die Stabilitätsregelung möglich, die Regelung gegenüber der an den Rädern lokal sehr verschleißträchtigen Ideal-Regelung mit dem zweiten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z2si} gezielt zu verstimmen, ohne die Vorteile der
- 10 Ideal-Regelung aufgeben zu müssen. Es hat sich gezeigt, dass schon mit kleinen, definierten Abweichungen von der Idealregelung bei nach wie vor gutem Bogenlaufverhalten und guter Stabilisierung im geraden Gleis eine bessere Verteilung des Verschleißes auf den Radlaufflächen erzielen lässt, wodurch sich ein deutlich günstigeres Verschleißbild und damit längere Standzeiten ergeben.
- 15 Dabei kann vorgesehen sein, dass gegebenenfalls auch über längere Strecken die Ideal-Regelung ausgeführt wird, d. h. der zweite Korrekturfaktor $K_2 = 1$ gewählt wird, und nur von Zeit zu Zeit die Regelung gegenüber der Ideal-Regelung definiert verstimmt wird, d. h. $K_2 \neq 1$ gewählt wird. Weiterhin kann vorgesehen sein, dass die Verstimmung der Regelung gegenüber der Ideal-Regelung über den Korrekturfaktor K_2 nach einem vorgegebenen
- 20 zeitlichen Verlauf, beispielsweise stetig, verändert wird. Ebenso kann der Korrekturfaktor K_2 natürlich auch in Abhängigkeit von dem aktuellen oder zu erwartenden Fahrzustand (Geschwindigkeit etc.) oder dem aktuellen oder zu erwartenden Streckenzustand (Streckenprofil etc.) variiert werden. Hierdurch lassen sich beliebige Verschleißverteilungen erzielen.
- 25 So kann bei schlechter Gleisqualität, d. h. hohen Amplituden und großer Dichte der Gleislagestörungen, oder in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit die Parametrierung des Regelgesetzes angepasst werden. Der Regler 113 kann z. B. bei schlechter Gleisqualität „schärfer“ eingestellt werden, um stärker zu reagieren oder z. B. bei niedriger Fahrgeschwindigkeit „weicher“ eingestellt werden, um eine zu starke Belastung des
- 30 jeweiligen Aktuators 109, 110 zu verhindern.

Das Stabilitätsregelungsverfahren hat den Vorteil großer Einfachheit, da keine Zeithistorie aufgezeichnet werden muss, sondern zu jedem Zeitpunkt nur der momentane Bewegungszustand des ersten Radsatzes 105 betrachtet wird.

Außerdem kann jeder Radsatz 105, 106 unabhängig vom anderen Radsatz desselben Fahrwerks 103 bzw. Fahrzeugs 101 geregelt werden. Reaktionen auf Störungen im Gleis und evtl. Instabilitäten werden am Radsatz 105, 106 durch die Regelung sofort beseitigt. Der Radsatz 105, 106 bleibt trotz längsweicher Radsatzführung hinsichtlich seiner Bewegungen in Querrichtung und um seine Hochachse in Ruhe, d. h. stabil. Daher sind keine Dämpfungsmittel gegen Drehbewegungen um die Hochachse zwischen Radsatz 105, 106 und Fahrwerk 103 bzw. zwischen Fahrwerk 103 und Wagenkasten 102 bzw. Radsatz 105, 106 und Wagenkasten 102 erforderlich. Da anstelle einer Dämpfung von Instabilität eine solche gar nicht erst entstehen kann, verhält sich auch der Wagenkasten 102 deutlich ruhiger als bei konventionellen Lösungen.

Es hat sich gezeigt, dass eine Verbesserung gegenüber dem passiv radial einstellbaren Bogenlauf ($M_{Akt} = 0$ und $M_{Tx} = -M_{cxp}$), wie er mit der vorstehend beschriebenen ersten Regelungsvariante erzielbar ist, nur mit nennenswertem Energieaufwand am jeweiligen Aktuator 109, 110 ($M_{Akt} \gg 0$) möglich ist, um sich der Idealvorstellung eines Bogenlaufs (mit $M_{Tx} = 0$ und $\Sigma Y_1 = \Sigma Y_2$) anzunähern. Allerdings ist es mit den nachfolgend beschriebenen Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens möglich, durch entsprechend reduzierten Energieeinsatz eine gute Annäherung an den idealen Bogenlauf zu erzielen.

Zweites Ausführungsbeispiel

So ist bei einer bevorzugten zweiten Regelungsvariante vorgesehen, dass die Einstellung des Wendewinkels des ersten Radsatzes 105 zwar ebenfalls gemäß der obigen ersten Regelungsvariante erfolgt (d. h. $M_{Akt1} = 0$), die Einstellung des Wendewinkels des zweiten Radsatzes 106 erfolgt aber in dem ersten Frequenzbereich unter Verwendung eines dritten Soll-Wendewinkels φ_{z3s} , der einem mit einem vorgebbaren dritten Korrekturfaktor K_3 multiplizierten dritten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z3si} entspricht. Dabei wird der dritte Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z3si} so gewählt, dass bei $K_3 = 1$, also im Fall einer Übereinstimmung des dritten Soll-Wendewinkels φ_{z3s} mit dem dritten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z3si} das bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierende Wendemoment M_{Tx1} an dem ersten Radsatz 105 entgegengesetzt gleich dem bei der

aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierenden Wendemoment M_{Tx2} an der zweiten Radeinheit ist (d. h. $M_{Tx1} = -M_{Tx2}$).

Aus den obigen Gleichungen (3) bis (6) folgen hiermit die oben dargelegten Beziehungen:

$$\sum Y_1 = \frac{F_{aq}}{2} \pm \frac{M_{cxs}}{2a}, \quad (7)$$

$$\sum Y_2 = \frac{F_{aq}}{2} \mp \frac{M_{cxs}}{2a}. \quad (8)$$

Hierdurch wird mit anderen Worten erreicht, dass die Summen der lateralen Gleiskräfte $\sum Y_1$ am ersten Radsatz 105 und $\sum Y_2$ am zweiten Radsatz 106 bis auf den Anteil des Rückstell-Wendemoments M_{cxs} der Sekundärfederung 114 ausgeglichen sind, über die der Wagenkasten 102 auf dem Drehgestellrahmen 104 abgestützt ist.

- 10 Die Regeleinrichtung 113 berechnet den dritten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z3si} bevorzugt aus dem bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierenden Wendemoment M_{Tx1} am ersten Radsatz 105, einer für das Drehgestell 103 vorgegebenen Abhängigkeit des Wendemoments M_{Cxp2} der zweiten Primärfederung 108 von dem Wendewinkel φ_{z3} des zweiten Radsatzes 106 und einer für das Drehgestell 103
- 15 vorgegebenen Abhängigkeit des Wendemoments M_{Akt2} des zweiten Aktuators 110 von dem Wendewinkel φ_{z3} des zweiten Radsatzes 106. Eine solche Abhängigkeit des Wendemoments M_{Akt2} des zweiten Aktuators 110 von dem Wendewinkel φ_{z3} des zweiten Radsatzes 106 kann in beliebiger Weise vorgegeben sein, beispielsweise durch eine vorab bestimmte Gleichung, eine Kennlinie oder ein Kennfeld etc., die bzw. das vorab für
- 20 das Drehgestell 103 bzw. das Fahrzeug 101 bestimmt wurde.

Auch hier kann über den dritten Korrekturfaktor K_3 – in gleicher Weise wie oben schon im Zusammenhang mit dem ersten Korrekturfaktor K_1 beschrieben – wieder eine beliebige, gegebenenfalls zeit-, fahrsituations- und/oder streckensituationsabhängige Verstimmung des verwendeten dritten Soll-Wendewinkel φ_{z3s} gegenüber dem dritten Ideal-Soll-

- 25 Wendewinkel φ_{z3si} erzielt werden. So kann der dritte Korrekturfaktor K_3 ähnlich dem ersten Korrekturfaktor K_1 zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt werden und/oder zumindest zeitweise gleich Eins gewählt werden und/oder nach einem vorgebbaren Verlauf variiert werden.

Um instabile Fahrsituationen zu vermeiden, erfolgt wie bei der ersten Regelungsvariante eine Stabilitätsregelung der Radsätze 105, 106 im geraden Gleis aber auch im Gleisbogen, also eine Einstellung des Wendewinkels des ersten und zweiten Radsatzes 105, 106 in dem zweiten Frequenzbereich. Die Regeleinrichtung 113 verfährt hier wie
 5 oben im Zusammenhang mit der ersten Regelungsvariante beschriebene, d. h. unter Verwendung eines zweiten Soll-Wendewinkels φ_{z2s} , der einem mit einem vorgebbaren zweiten Korrekturfaktor K_2 multiplizierten zweiten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z2si} entspricht. Es soll daher an dieser Stelle lediglich auf die obigen Ausführungen verwiesen werden.

Drittes Ausführungsbeispiel

- 10 Bei einer bevorzugten dritten Regelungsvariante erfolgt die Bogenlaufregelung, also die Einstellung des Wendewinkels des ersten Radsatzes 105 in dem ersten Frequenzbereich, durch die Regeleinrichtung 113 unter Verwendung eines ersten Soll-Wendewinkels φ_{z1s} , der wiederum einem mit einem vorgebbaren ersten Korrekturfaktor K_1 multiplizierten ersten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z1si} entspricht, d. h. es gilt auch hier :

$$15 \quad \varphi_{z1s} = K_1 \cdot \varphi_{z1si} \quad (11)$$

Dabei ist vorgesehen, dass der erste Aktuator 109 in dem ersten Frequenzbereich einer durch eine Änderung der Krümmung des Gleises bedingten Wendebewegung der ersten Radeinheit derart nachgeführt wird, dass der erste Aktuator 109 bei $K_1 = 1$, d. h. bei Übereinstimmung des ersten Soll-Wendewinkels φ_{z1s} mit dem ersten Ideal-Soll-

- 20 Wendewinkel φ_{z1si} , bei der aktuellen Krümmung des Gleises momentan in dem ersten Frequenzbereich ein Wendemoment M_{Akt1} aufbringt, welches entgegengesetzt gleich dem Wendemoment M_{cxp1} der ersten Primärfederung 107 ist (d. h. $M_{Akt1} = -M_{cxp1}$).

Der zweite Radsatz 106 wird ebenfalls nach diesem Verfahren geregelt. Die Einstellung des Wendewinkels des zweiten Radsatzes 106 in dem ersten Frequenzbereich erfolgt

- 25 daher unter Verwendung eines dritten Soll-Wendewinkels φ_{z3s} , der einem mit einem vorgebbaren dritten Korrekturfaktor K_3 multiplizierten dritten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z3si} entspricht. Der dritte Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z3si} wird wiederum so gewählt, dass bei $K_3 = 1$, d. h. im Fall einer Übereinstimmung des dritten Soll-Wendewinkels φ_{z3s} mit dem dritten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z3si} , der wenigstens zweite Aktuator 110 in dem ersten
 30 Frequenzbereich einer durch eine Änderung der Krümmung des Gleises bedingten

Wendebewegung der zweiten Radeinheit derart nachgeführt wird, dass der zweite Aktuator 110 bei der aktuellen Krümmung des Gleises momentan in dem ersten Frequenzbereich ein Wendemoment M_{Akt2} aufbringt, welches entgegengesetzt gleich dem Wendemoment M_{exp2} der ersten Primärfederung 108 ist (d. h. $M_{Akt2} = -M_{exp2}$).

- 5 Es ergibt sich hier aus Gleichung (1), also bei bogenradialer Einstellung des ersten Radsatzes 105 und des zweiten Radsatzes 106 ein Verschwinden des Wendemoments aus der Rad-Schiene-Paarung (d. h. $M_{Tx1} = M_{Tx2} = 0$) und aus den Gleichungen (3) bis (6) wiederum:

$$\sum Y_1 = \frac{F_{aq}}{2} \pm \frac{M_{cxs}}{2a}, \quad (7)$$

$$10 \quad \sum Y_2 = \frac{F_{aq}}{2} \mp \frac{M_{cxs}}{2a}. \quad (8)$$

Mit anderen Worten wird auch hiermit – wie bei der zweiten Regelungsvariante – erreicht, dass die Summen der lateralen Gleiskräfte $\sum Y_1$ am ersten Radsatz 105 und $\sum Y_2$ am zweiten Radsatz 106 bis auf den Anteil des Rückstell-Wendemoments M_{cxs} der Sekundärfederung 114 ausgeglichen sind.

- 15 Das der Krümmung des Gleises entsprechende Nachführen des ersten Ideal-Soll-Wendewinkels φ_{z1si} bzw. des dritten Ideal-Soll-Wendewinkels φ_{z3si} kann auf beliebige geeignete Weise erfolgen. Bevorzugt werden der aktuelle Wendewinkel φ_{z1} des ersten Radsatzes 105 bzw. der aktuelle Wendewinkel φ_{z3} des zweiten Radsatzes 106 und eine für die Last am jeweiligen Aktuator 109, 110 repräsentative Größe (z. B. eine Kraftwert, ein
- 20 Momentenwert, ein Druckwert, ein Stromwert etc.) erfasst. Es wird ein neuer erster Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z1si} bzw. ein neuer dritter Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z3si} vorgegeben, falls die Last am betreffenden Aktuator 109, 110 von derjenigen abweicht, welche sich bei diesem Wendewinkel φ_{z1} bzw. φ_{z3} aus dem Rückstellmoment der Primärfederung 107 bzw. 108 ergeben würde.
- 25 Auch hier kann über den ersten Korrekturfaktor K_1 bzw. den dritten Korrekturfaktor K_3 wie oben beschrieben wieder eine beliebige, gegebenenfalls zeit-, fahrsituations- und/oder streckensituationsabhängige Verstimmung des verwendeten ersten bzw. dritten Sollwerts gegenüber dem ersten bzw. dritten Ideal-Sollwert erzielt werden. So kann der erste

Korrekturfaktor K_1 bzw. der dritte Korrekturfaktor K_3 zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt werden und/oder zumindest zeitweise gleich Eins gewählt werden und/oder nach einem vorgebbaren Verlauf variiert werden.

Um instabile Fahrsituationen zu vermeiden, erfolgt wie bei der ersten Regelungsvariante eine Stabilitätsregelung der Radsätze 105, 106 im geraden Gleis aber auch im Gleisbogen, also eine Einstellung des Wendewinkels des ersten und zweiten Radsatzes 105, 106 in dem zweiten Frequenzbereich. Die Regeleinrichtung 113 verfährt hier wie oben im Zusammenhang mit der ersten Regelungsvariante beschrieben, d. h. unter Verwendung eines zweiten Soll-Wendewinkels φ_{z2s} , der einem mit einem vorgebbaren zweiten Korrekturfaktor K_2 multiplizierten zweiten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z2si} entspricht. Es soll daher an dieser Stelle lediglich auf die obigen Ausführungen verwiesen werden.

Viertes Ausführungsbeispiel

Bei einer bevorzugten vierten Regelungsvariante erfolgt die Bogenlaufregelung, also die Einstellung des Wendewinkels des ersten Radsatzes 105 in dem ersten Frequenzbereich wie bei der ersten Regelungsvariante (d. h. $M_{Akt1} = 0$). Die Einstellung des Wendewinkels des zweiten Radsatzes 106 erfolgt in dem ersten Frequenzbereich jedoch unter Verwendung eines dritten Soll-Wendewinkels φ_{z3s} , der einem mit einem vorgebbaren dritten Korrekturfaktor K_3 multiplizierten dritten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z3si} entspricht. Der dritte Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z3si} wird dabei so gewählt, dass bei $K_3 = 1$, d. h. im Fall einer Übereinstimmung des dritten Soll-Wendewinkels φ_{z3s} mit dem dritten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z3si} , das bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierende Wendemoment M_{Tx2} an dem zweiten Radsatz 106 der Wendemoment-Differenz entspricht, die sich aus dem Produkt eines Laufrichtungsfaktors L mit dem aktuell vorliegenden Rückstell-Wendemoment M_{cxs} aus der Sekundärfederung 108 und dem bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierenden Wendemoments M_{Tx1} an dem ersten Radsatz 105 ergibt. Der Laufrichtungsfaktor L ist dabei für ein Fahrtrichtung vorlaufendes Drehgestell 103 gleich 1 und für ein nachlaufendes Drehgestell 103 gleich -1 (d. h. $M_{Tx2} = M_{cxs} - M_{Tx1}$ für ein vorlaufendes Drehgestell 103 bzw. $M_{Tx2} = -M_{cxs} - M_{Tx1}$ für ein nachlaufendes Drehgestell 103).

Bei dieser vierten Regelungsvariante ($M_{Akt1} = 0$ und $M_{Tx2} = \pm M_{cxs} - M_{Tx1}$) ergibt sich hier aus den Gleichungen (3) bis (6) die Beziehung:

$$\sum Y_1 = \frac{F_{aq}}{2} \pm \frac{M_{cxs}}{2a} \mp \frac{M_{cxs}}{2a} = \frac{F_{aq}}{2}, \quad (9)$$

$$\sum Y_2 = \frac{F_{aq}}{2} \mp \frac{M_{cxs}}{2a} \pm \frac{M_{cxs}}{2a} = \frac{F_{aq}}{2}. \quad (10)$$

Mit anderen Worten wird hiermit erreicht, dass die Summen der lateralen Gleiskräfte ΣY_1 am ersten Radsatz 105 und ΣY_2 am zweiten Radsatz 106 ausgeglichen sind (d. h.

5 $\Sigma Y_1 = \Sigma Y_2$).

Zur Ermittlung des Rückstell-Wendemoments M_{cxs} aus der Sekundärfederung 108 wird der Wendewinkel zwischen dem Drehgestellrahmen 104 und dem Wagenkasten 102 über einen mit der Regeleinrichtung 113 verbundenen Sensor 115 ermittelt.

Auch hier kann über den ersten Korrekturfaktor K_1 bzw. den dritten Korrekturfaktor K_3 wie
 10 oben beschrieben wieder eine beliebige, gegebenenfalls zeit-, fahrsituations- und/oder
 streckensituationsabhängige Verstimmung des verwendeten ersten bzw. dritten Sollwerts
 gegenüber dem ersten bzw. dritten Ideal-Sollwert erzielt werden. So kann der erste
 Korrekturfaktor K_1 bzw. der dritte Korrekturfaktor K_3 zumindest zeitweise ungleich Eins
 gewählt werden und/oder zumindest zeitweise gleich Eins gewählt werden und/oder nach
 15 einem vorgebbaren Verlauf variiert werden.

Um instabile Fahrsituationen zu vermeiden, erfolgt wie bei der ersten Regelungsvariante
 eine Stabilitätsregelung der Radsätze 105, 106 im geraden Gleis aber auch im
 Gleisbogen, also eine Einstellung des Wendewinkels des ersten und zweiten Radsatzes
 105, 106 in dem zweiten Frequenzbereich. Die Regeleinrichtung 113 verfährt hier wie
 20 oben im Zusammenhang mit der ersten Regelungsvariante beschrieben, d. h. unter
 Verwendung eines zweiten Soll-Wendewinkels φ_{z2s} , der einem mit einem vorgebbaren
 zweiten Korrekturfaktor K_2 multiplizierten zweiten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z2si} entspricht.
 Es soll daher an dieser Stelle lediglich auf die obigen Ausführungen verwiesen werden.

Fünftes Ausführungsbeispiel

25 Bei einer bevorzugten fünften Regelungsvariante erfolgt die Bogenlaufregelung, also die
 Einstellung des Wendewinkels des ersten Radsatzes 105 in dem ersten Frequenzbereich
 wie bei der dritten Regelungsvariante (d. h. $M_{Akt1} = -M_{cxp1}$). Die Einstellung des

Wendewinkels des zweiten Radsatzes 106 erfolgt in dem ersten Frequenzbereich jedoch wie bei der vierten Regelungsvariante (d. h. $M_{Tx2} = M_{cxs} - M_{Tx1}$ für ein vorlaufendes Drehgestell 103 bzw. $M_{Tx2} = -M_{cxs} - M_{Tx1}$ für ein nachlaufendes Drehgestell 103). Es wird daher diesbezüglich lediglich auf die obigen Ausführungen verwiesen.

- 5 Bei dieser fünften Regelungsvariante und bei der fünften Variante ($M_{Akt1} = -M_{exp1}$ und $M_{Tx2} = \pm M_{cxs} - M_{Tx1}$) ergibt sich hier aus den Gleichungen (3) bis (6) die Beziehung:

$$\sum Y_1 = \frac{F_{aq}}{2} \pm \frac{M_{cxs}}{2a} \mp \frac{M_{cxs}}{2a} = \frac{F_{aq}}{2}, \quad (9)$$

$$\sum Y_2 = \frac{F_{aq}}{2} \mp \frac{M_{cxs}}{2a} \pm \frac{M_{cxs}}{2a} = \frac{F_{aq}}{2}. \quad (10)$$

- 10 Mit anderen Worten wird auch hiermit erreicht, dass die Summen der lateralen Gleiskräfte ΣY_1 am ersten Radsatz 105 und ΣY_2 am zweiten Radsatz 106 ausgeglichen sind (d. h. $\Sigma Y_1 = \Sigma Y_2$).

- Auch hier kann über den ersten Korrekturfaktor K_1 bzw. den dritten Korrekturfaktor K_3 wie oben beschrieben wieder eine beliebige, gegebenenfalls zeit-, fahrsituations- und/oder streckensituationsabhängige Verstimmung des verwendeten ersten bzw. dritten Sollwerts gegenüber dem ersten bzw. dritten Ideal-Sollwert erzielt werden. So kann der erste Korrekturfaktor K_1 bzw. der dritte Korrekturfaktor K_3 zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt werden und/oder zumindest zeitweise gleich Eins gewählt werden und/oder nach einem vorgebbaren Verlauf variiert werden.

- 20 Um instabile Fahrsituationen zu vermeiden, erfolgt wie bei der ersten Regelungsvariante eine Stabilitätsregelung der Radsätze 105, 106 im geraden Gleis aber auch im Gleisbogen, also eine Einstellung des Wendewinkels des ersten und zweiten Radsatzes 105, 106 in dem zweiten Frequenzbereich. Die Regeleinrichtung 113 verfährt hier wie oben im Zusammenhang mit der ersten Regelungsvariante beschrieben, d. h. unter Verwendung eines zweiten Soll-Wendewinkels φ_{z2s} , der einem mit einem vorgebbaren zweiten Korrekturfaktor K_2 multiplizierten zweiten Ideal-Soll-Wendewinkel φ_{z2si} entspricht.
- 25 Es soll daher an dieser Stelle lediglich auf die obigen Ausführungen verwiesen werden.

Es versteht sich, dass bei allen vorstehend beschriebenen Regelungsvarianten Antriebs- und Bremsmomente die Wirkung der Bogenlaufreglung besonders bei der in Figur 1 dargestellten asymmetrischen Lösung beeinflussen. Sie erzeugen eine Kraft an der jeweiligen Aktuatorstange, die ein Ausdrehen des jeweiligen Radsatzes zur Folge hat –
5 äquivalent zu einer Bogenfahrt. Die Antriebs- und Bremsmomente können jedoch durch geeignete Messung (z. B. Stangenkraftmessung an der Nichtaktuatorseite) oder durch Übermittlung aus dem Zugleitsystem dem Regelkreis überlagert und somit kompensiert werden.

Die vorliegende Erfindung wurde vorstehend ausschließlich anhand von Beispielen mit
10 Ideal-Soll-Wendewinkeln als Ideal-Sollwerten beschrieben. Es versteht sich jedoch, dass bei anderen Varianten der Erfindung als Ideal-Sollwert auch eine beliebige andere geeignete Größe verwendet werden kann, über welche die gewünschte Einstellung des betreffenden Radsatzes erzielt werden kann.

Die vorliegende Erfindung wurde vorstehend ausschließlich anhand von Beispielen mit
15 Drehgestellen mit zwei Radsätzen beschrieben. Es versteht sich jedoch, dass bei anderen Varianten der Erfindung auch beliebige andere Fahrwerksvarianten verwendet werden können.

* * * * *

Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung eines wenigstens eine erste Radeinheit (105) mit zwei Rädern umfassenden aktiven Fahrwerks (103) eines Schienenfahrzeugs, bei dem über wenigstens einen ersten Aktuator (109), der zwischen der ersten Radeinheit (105) und einer über eine erste Primärfederung (107) darauf abgestützten Fahrzeugstruktur (102) wirkt,

- in einem ersten Frequenzbereich eine Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit (105) um eine Fahrwerkshochachse bezüglich der Fahrzeugstruktur (102) in Abhängigkeit von der aktuellen Krümmung des Gleises erfolgt

und/oder

- in einem zweiten Frequenzbereich eine Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit (105) um eine Fahrwerkshochachse bezüglich der Fahrzeugstruktur (102) derart erfolgt, dass durch Gleislagestörungen oder durch einen Sinuslauf verursachten Querbewegungen wenigstens der ersten Radeinheit (105) entgegengewirkt wird,

dadurch gekennzeichnet, dass

- die Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit (105) in dem ersten Frequenzbereich unter Verwendung eines ersten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren ersten Korrekturfaktor (K_1) multiplizierten ersten Ideal-Sollwert entspricht, wobei
- der erste Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des ersten Sollwerts mit dem ersten Ideal-Sollwert (d. h. $K_1 = 1$) bei der aktuellen Krümmung des Gleises eine zumindest annähernd bogenradiale Einstellung der ersten Radeinheit (105) vorliegt,

und/oder

- die Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit (105) in dem zweiten Frequenzbereich unter Verwendung eines zweiten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren zweiten Korrekturfaktor (K_2) multiplizierten zweiten Ideal-Sollwert entspricht, wobei

- der zweite Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des zweiten Sollwerts mit dem zweiten Ideal-Sollwert (d. h. $K_2 = 1$) durch Gleislagestörungen oder durch einen Sinuslauf verursachte Querbewegungen wenigstens der ersten Radeinheit (105) im Wesentlichen kompensiert werden.

- 5 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass im Fall einer Übereinstimmung des ersten Sollwerts mit dem ersten Ideal-Sollwert bei der aktuellen Krümmung des Gleises
- eine exakt bogenradiale Einstellung der ersten Radeinheit (105) vorliegt und
 - das Rückstell-Wendement der ersten Primärfederung (107) mit dem aus der
- 10 Rad-Schiene-Paarung resultierenden Wendement im Wesentlichen im Gleichgewicht ist, sodass der wenigstens eine erste Aktuator (109) momentan im Wesentlichen kein Wendement aufbringen muss.
- 15 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der wenigstens eine erste Aktuator (109) in dem ersten Frequenzbereich einer durch eine Änderung der Krümmung des Gleises bedingten Wendebewegung der ersten Radeinheit (105) derart nachgeführt wird, dass der wenigstens eine erste Aktuator (109) im Fall einer Übereinstimmung des ersten Sollwerts mit dem ersten Ideal-Sollwert bei der aktuellen Krümmung des Gleises momentan in dem ersten Frequenzbereich im Wesentlichen kein Wendement aufbringt.
- 20 4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Ideal-Sollwert ein erster Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z1i}) ist, welcher der Krümmung des Gleises nachgeführt wird.
- 25 5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Korrekturfaktor (K_1)
- zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt wird
- und/oder
- zumindest zeitweise gleich Eins gewählt wird
- und/oder
- nach einem vorgebbaren Verlauf variiert wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

- das Fahrwerk (103) eine der ersten Radeinheit (105) nachlaufende zweite Radeinheit (106) mit zwei Rädern umfasst, auf der die Fahrzeugstruktur (102) über eine zweite Primärfederung (108) abgestützt ist,
- der Wendewinkel der zweiten Radeinheit (106) über wenigstens einen zwischen der zweiten Radeinheit (106) und der Fahrzeugstruktur (102) wirkenden zweiten Aktuator (110) eingestellt wird, und
- die Einstellung des Wendewinkels der zweiten Radeinheit (106) in dem ersten Frequenzbereich unter Verwendung eines zweiten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren dritten Korrekturfaktor (K_3) multiplizierten dritten Ideal-Sollwert entspricht, wobei
- der dritte Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des dritten Sollwerts mit dem dritten Ideal-Sollwert (d. h. $K_3 = 1$) das bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierende Wendemoment an der ersten Radeinheit (105) entgegengesetzt gleich dem bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierenden Wendemoment an der zweiten Radeinheit (106) ist.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der dritte Ideal-Sollwert ein dritter Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z3si}) ist, der sich berechnet aus:

- dem bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierenden Wendemoment (M_{Tx1}) an der ersten Radeinheit (105),
- einer für das Fahrwerk (103) vorgegebenen Abhängigkeit des Wendemoments (M_{Cx2}) der zweiten Primärfederung (108) von dem Wendewinkel (φ_{z3}) der zweiten Radeinheit (106) und
- einer für das Fahrwerk (103) vorgegebenen Abhängigkeit des Wendemoments des zweiten Aktuators (110) von dem Wendewinkel der zweiten Radeinheit (106).

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass der dritte Korrekturfaktor (K_3)

- zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt wird
- und/oder

- zumindest zeitweise gleich Eins gewählt wird

und/oder

- nach einem vorgebbaren Verlauf variiert wird.

5 9. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der wenigstens eine erste Aktuator (109) in dem ersten Frequenzbereich einer durch eine Änderung der Krümmung des Gleises bedingten Wendebewegung der ersten Radeinheit (105) derart nachgeführt wird, dass der wenigstens eine erste Aktuator (109) bei Übereinstimmung des ersten Sollwerts mit dem ersten Ideal-Sollwert bei der aktuellen Krümmung des Gleises momentan in dem ersten Frequenzbereich ein Wendemoment aufbringt, welches entgegengesetzt gleich dem Wendemoment der ersten Primärfederung (107) ist.

10 10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Ideal-Sollwert ein erster Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z1i}) ist, welcher der Krümmung des Gleises nachgeführt wird.

15 11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Korrekturfaktor (K_1)

- zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt wird

und/oder

- zumindest zeitweise gleich Eins gewählt wird

20 und/oder

- nach einem vorgebbaren Verlauf variiert wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass

- das Fahrwerk (103) eine der ersten Radeinheit (105) nachlaufende zweite Radeinheit (106) mit zwei Rädern umfasst, auf der die Fahrzeugstruktur (102) über eine zweite Primärfederung (108) abgestützt ist,

- der Wendewinkel der zweiten Radeinheit (106) über wenigstens einen zwischen der zweiten Radeinheit (106) und der Fahrzeugstruktur (102) wirkenden zweiten Aktuator (110) eingestellt wird, und

- die Einstellung des Wendewinkels der zweiten Radeinheit (106) in dem ersten Frequenzbereich unter Verwendung eines dritten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren dritten Korrekturfaktor (K_3) multiplizierten dritten Ideal-Sollwert entspricht, wobei
- 5 - der dritte Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des dritten Sollwerts mit dem dritten Ideal-Sollwert (d. h. $K_3 = 1$) der wenigstens eine zweite Aktuator (110) in dem ersten Frequenzbereich einer durch eine Änderung der Krümmung des Gleises bedingten Wendebewegung der zweiten Radeinheit (106) derart nachgeführt wird, dass der wenigstens eine zweite Aktuator (110) bei
- 10 der aktuellen Krümmung des Gleises momentan in dem ersten Frequenzbereich ein Wendemoment aufbringt, welches entgegengesetzt gleich dem Wendemoment der zweiten Primärfederung (108) ist.
- 13. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass der dritte Ideal-Sollwert ein dritter Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z1i}) ist, welcher der Krümmung des Gleises
- 15 nachgeführt wird.
- 14. Verfahren nach Anspruch 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Korrekturfaktor (K_1)
- zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt wird
- und/oder
- 20 - zumindest zeitweise gleich Eins gewählt wird
- und/oder
- nach einem vorgebbaren Verlauf variiert wird.
- 15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 oder nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass
- 25 - das Fahrwerk (103) eine der ersten Radeinheit (105) nachlaufende zweite Radeinheit (106) mit zwei Rädern umfasst, auf der die Fahrzeugstruktur (102) über eine zweite Primärfederung (108) abgestützt ist,
- der Wendewinkel der zweiten Radeinheit (106) über wenigstens einen zwischen der zweiten Radeinheit (106) und der Fahrzeugstruktur (102) wirkenden zweiten
- 30 Aktuator (110) eingestellt wird,

- die Fahrzeugstruktur (102) über eine Primärfederung (107, 108) und eine Sekundärfederung (114) auf der ersten Radeinheit (105) und der zweiten Radeinheit (106) abgestützt ist und
- die Einstellung des Wendewinkels der zweiten Radeinheit (106) in dem ersten Frequenzbereich unter Verwendung eines dritten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren dritten Korrekturfaktor (K_3) multiplizierten dritten Ideal-Sollwert entspricht, wobei
- der dritte Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des dritten Sollwerts mit dem dritten Ideal-Sollwert (d. h. $K_3 = 1$) das bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierende Wendemoment an der zweiten Radeinheit (106) der Wendemoment-Differenz entspricht, die sich aus dem Produkt eines Laufrichtungsfaktors (L) mit dem aktuell vorliegenden Rückstell-Wendemoment aus der Sekundärfederung (114) und dem Betrag des bei der aktuellen Krümmung des Gleises aus der Rad-Schiene-Paarung resultierenden Wendemoments an der ersten Radeinheit (105) ergibt, wobei
- der Laufrichtungsfaktor (L) für ein vorlaufendes Fahrwerk (103) gleich 1 ist und für ein nachlaufendes Fahrwerk (103) gleich -1 ist.

16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass

- das Fahrwerk (103) einen Fahrwerksrahmen (104) umfasst, der über jeweils eine Primärfederung (107, 108) auf der ersten Radeinheit (105) und der zweiten Radeinheit (106) abgestützt ist,
- die Fahrzeugstruktur (102) über die Sekundärfederung (114) auf dem Fahrwerksrahmen (104) abgestützt ist und
- zur Ermittlung des Rückstell-Wendemoments aus der Sekundärfederung (114) der Wendewinkel zwischen dem Fahrwerksrahmen (104) und der Fahrzeugstruktur (102) ermittelt wird.

17. Verfahren nach Anspruch 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, dass der dritte Ideal-Sollwert ein dritter Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z3i}) ist, welcher der Krümmung des Gleises nachgeführt wird.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 15 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass der dritte Korrekturfaktor (K_3)
- zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt wird
- und/oder
- 5 - zumindest zeitweise gleich Eins gewählt wird
- und/oder
- nach einem vorgebbaren Verlauf variiert wird.
19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Frequenzbereich 0 bis 1 Hz, insbesondere 0 bis 0,5 Hz, umfasst.
- 10 20. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Frequenzbereich zumindest teilweise oberhalb des ersten Frequenzbereichs liegt.
21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Frequenzbereich 4 bis 8 Hz umfasst.
- 15 22. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- die momentane Quergeschwindigkeit der ersten Radeinheit (105) sowie die momentane Fahrgeschwindigkeit des Schienenfahrzeugs (101) ermittelt werden und
- 20 - aus der ermittelten momentanen Quergeschwindigkeit der ersten Radeinheit (105) und der momentanen Fahrgeschwindigkeit des Schienenfahrzeugs (101) für den zweiten Frequenzbereich als zweiter Ideal-Sollwert ein zweiter Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z2s}) berechnet wird, wobei
- der zweite Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z2si}) so gewählt wird, dass im Fall einer
- 25 Übereinstimmung eines den zweiten Sollwert darstellenden zweiten Soll-Wendewinkels mit dem zweiten Ideal-Soll-Wendewinkel (d. h. $K_2 = 1$) eine zur ermittelten Quergeschwindigkeit der ersten Radeinheit (105) entgegengesetzt gleiche Quergeschwindigkeit der ersten Radeinheit (105) bewirkt wird.

23. Verfahren nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass

- die momentane Quergeschwindigkeit der ersten Radeinheit (105) über einen Geschwindigkeitssensor erfasst wird oder eine von einem Beschleunigungssensor erfasste momentane Querbesehleunigung der ersten Radeinheit (105) zur momentanen Quergeschwindigkeit der ersten Radeinheit (105) integriert wird

und/oder

- als momentane Fahrgeschwindigkeit des Schienenfahrzeugs (101) eine aus einem übergeordneten Zugleitsystem zur Verfügung gestellte Fahrgeschwindigkeit verwendet wird

und/oder

- die momentane Fahrgeschwindigkeit des Schienenfahrzeugs (101) aus einer Messung der Drehzahl mindestens eines Rades des Schienenfahrzeugs (101) ermittelt wird.

24. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Korrekturfaktor (K_2)

- zumindest zeitweise ungleich Eins gewählt wird

und/oder

- zumindest zeitweise gleich Eins gewählt wird

und/oder

- nach einem vorgebbaren Verlauf variiert wird.

25. Vorrichtung zur Regelung eines wenigstens eine erste Radeinheit (105) mit zwei Rädern umfassenden aktiven Fahrwerks (105) eines Schienenfahrzeugs (101), umfassend

- eine Regeleinrichtung (113) und wenigstens einen durch die Regeleinrichtung (113) geregelten ersten Aktuator (109), der zwischen der ersten Radeinheit (105) und einer über eine erste Primärfederung (107) darauf abgestützten Fahrzeugstruktur (102) wirkt, wobei

- die Regeleinrichtung (113) über den wenigstens einen ersten Aktuator (109) in einem ersten Frequenzbereich eine Einstellung des Wendewinkels der ersten

Radeinheit (105) um eine Fahrwerkshochachse bezüglich der Fahrzeugstruktur (102) in Abhängigkeit von der aktuellen Krümmung des Gleises vornimmt,

und/oder

- die Regeleinrichtung (113) über den wenigstens einen ersten Aktuator (109) in einem zweiten Frequenzbereich durch Gleislagestörungen oder durch einen Sinuslauf verursachten Querbewegungen wenigstens der ersten Radeinheit (105) entgegenwirkt,

dadurch gekennzeichnet, dass

- die Regeleinrichtung (113) derart ausgebildet ist, dass die Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit (105) in dem ersten Frequenzbereich unter Verwendung eines ersten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren ersten Korrekturfaktor (K_1) multiplizierten ersten Ideal-Sollwert entspricht, wobei
- der erste Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des ersten Sollwerts mit dem ersten Ideal-Sollwert (d. h. $K_1 = 1$) bei der aktuellen Krümmung des Gleises eine zumindest annähernd bogenradiale Einstellung der ersten Radeinheit (105) vorliegt,

und/oder

- die Regeleinrichtung (113) derart ausgebildet ist, dass die Einstellung des Wendewinkels der ersten Radeinheit (105) in dem zweiten Frequenzbereich unter Verwendung eines zweiten Sollwerts erfolgt, der einem mit einem vorgebbaren zweiten Korrekturfaktor (K_2) multiplizierten zweiten Ideal-Sollwert entspricht, wobei
- der zweite Ideal-Sollwert so gewählt wird, dass im Fall einer Übereinstimmung des zweiten Sollwerts mit dem zweiten Ideal-Sollwert (d. h. $K_2 = 1$) durch Gleislagestörungen oder durch einen Sinuslauf verursachte Querbewegungen wenigstens der ersten Radeinheit (105) im Wesentlichen kompensiert werden.

26. Vorrichtung nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, dass

- der erste Ideal-Sollwert ein erster Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z1si}) ist und
- die Regeleinrichtung (113) den ersten Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z1si}) der Krümmung des Gleises nachführt

und/oder

- der zweite Ideal-Sollwert ein zweiter Ideal-Soll-Wendewinkel (φ_{z2si}) ist.

27. Vorrichtung nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Frequenzbereich zumindest teilweise oberhalb des ersten Frequenzbereichs liegt.

28. Schienenfahrzeug mit einem wenigstens eine erste Radeinheit (105) mit zwei Rädern umfassenden aktiven Fahrwerk (103) und einer Vorrichtung zur Regelung des aktiven Fahrwerks nach einem der Ansprüche 25 bis 27.

* * * * *

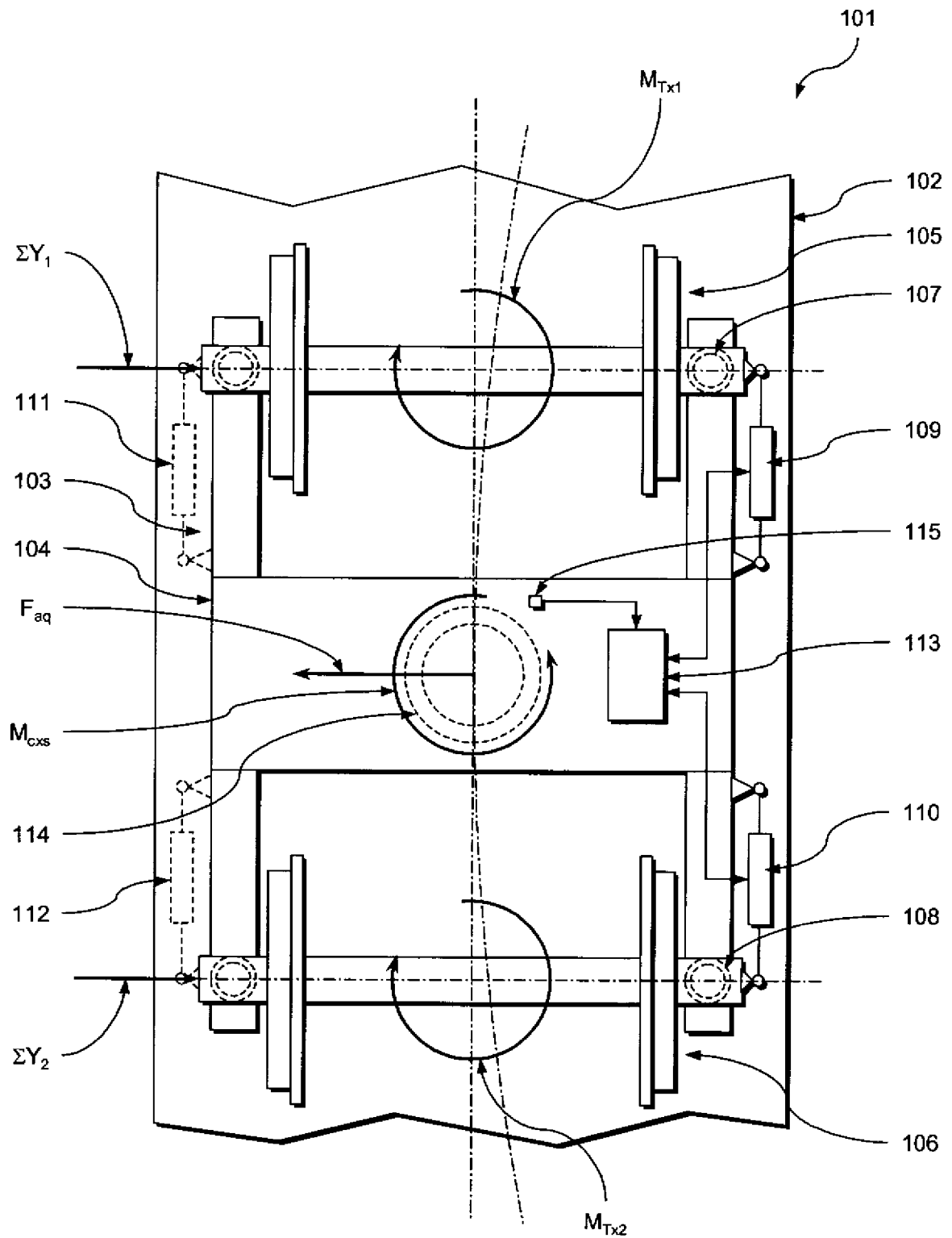


Fig. 1

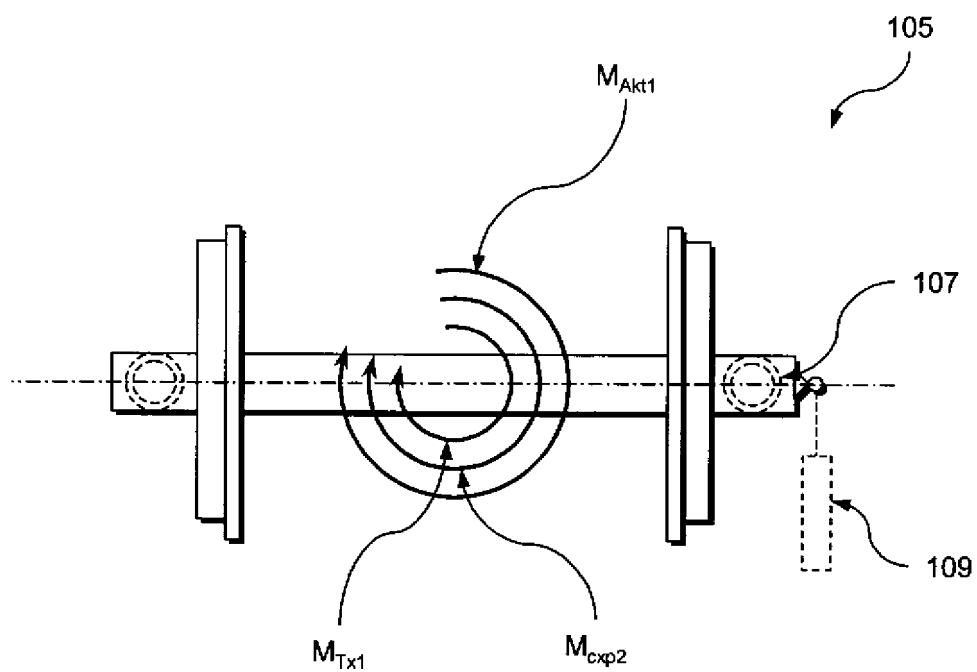


Fig. 2

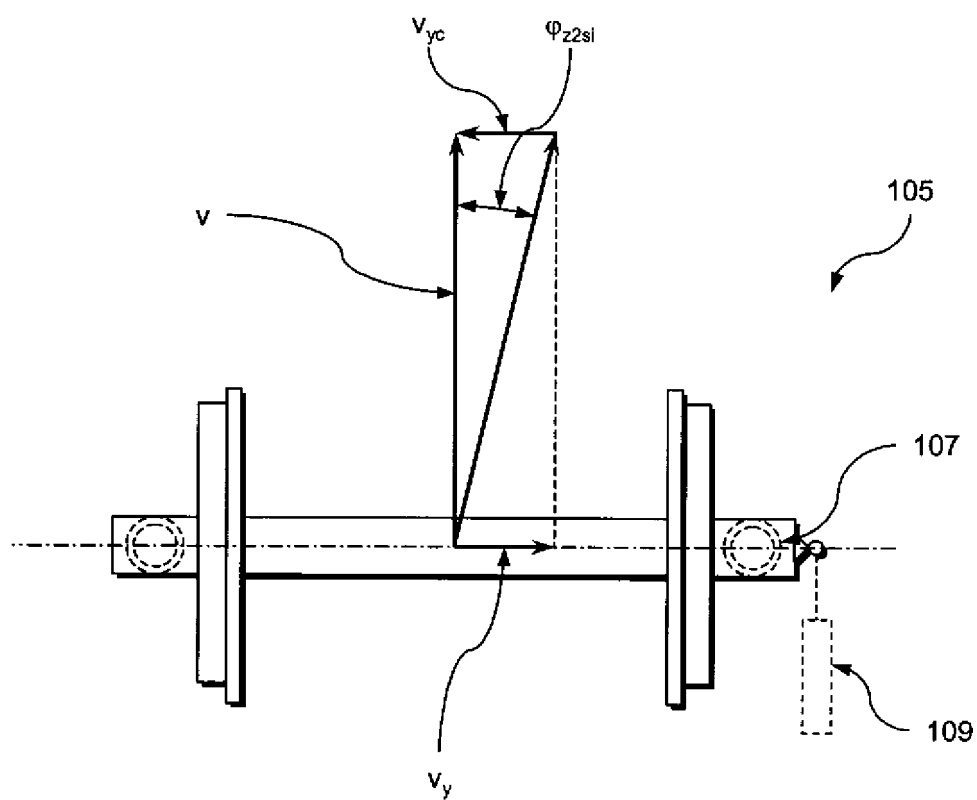


Fig. 3