



(10) **DE 10 2014 114 751 A1** 2015.04.16

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 114 751.0**

(22) Anmeldetag: **10.10.2014**

(43) Offenlegungstag: **16.04.2015**

(51) Int Cl.: **B60W 40/109 (2012.01)**

(66) Innere Priorität:
10 2013 111 415.6 16.10.2013

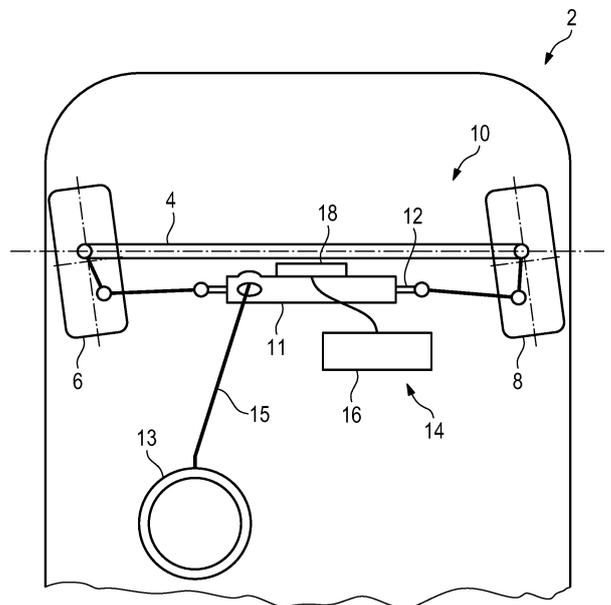
(72) Erfinder:
Erfinder wird später genannt werden

(71) Anmelder:
**Dr. Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft, 70435
Stuttgart, DE**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Betreiben eines Kraftfahrzeugs**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Kraftfahrzeugs (2), das eine Lenkanlage (10) mit einer Zahnstange (12) aufweist, mit der Räder (6, 8) an einer Achse (4), auf denen Reifen aufgezogen sind, inklusive zugehöriger Radaufhängungen des Kraftfahrzeugs (2) gelenkt werden, wobei das Kraftfahrzeug (2) auf einer Fahrbahn bewegt wird, wobei ein Reibungsbeiwert oder eine davon abgeleitete Größe zwischen einem jeweiligen Reifen und der Fahrbahn unter Berücksichtigung eines Fahrzustands, einer Kinematik der Lenkanlage (10), einer Kinematik der Achse (4), eines Verhaltens der Reifen auf den Rädern (6, 8) und/oder deren Nachlaufstrecke als charakteristischer Größe ermittelt wird, wobei im Verlauf einer Anwendung des Verfahrens sich ändernde Betriebsparameter des Kraftfahrzeugs (2) und der Reifen durch eine Lernphase, die während mindestens einer Fahrt des Kraftfahrzeugs (2) durchgeführt wird, erkannt und berücksichtigt werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und ein System zum Betreiben eines Kraftfahrzeugs.

[0002] Ein Kraftfahrzeug hat mit seinen Rädern Kontakt zu einem zu befahrenden Untergrund. Hierbei ist unter anderem ein sogenannter Reibungsbeiwert zu beachten, der von einer Bereifung der Räder, bspw. von einer Reifenprofiltiefe und dem Reifentyp, aber auch von einer Beschaffenheit des Untergrunds, üblicherweise einer Straße, sowie von Witterungsverhältnissen abhängen kann. Fährt das Kraftfahrzeug durch eine Kurve, ist es zudem einer Seitenkraft und somit einer Querbearbeitung ausgesetzt. Eine Spursicherheit beim Durchfahren der Kurve hängt von einer Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugs, einem Radius der Kurve sowie von dem Reibungsbeiwert ab.

[0003] Ein Verfahren zur Ermittlung des Reibungsbeiwerts zwischen Reifen eines Kraftfahrzeugs und einer Fahrbahn ist aus der Druckschrift DE 10 2009 002 245 A1 bekannt. Hierbei wird ein tatsächliches, auf die lenkbaren Räder des Kraftfahrzeugs wirkendes Ist-Reifenrückstellmoment ermittelt und mit einem Referenz-Reifenrückstellmoment verglichen. Zur Ermittlung des Reibungsbeiwerts wird das Verhältnis des Ist-Reifenrückstellmoments zu dem Referenz-Reifenrückstellmoment zugrunde gelegt. Weiterhin wird das Ist-Reifenrückstellmoment aus einer aktuellen Zahnstangenkraft berechnet, die in einer Zahnstange eines Lenksystems des Kraftfahrzeugs wirkt.

[0004] Bei einem aus der Druckschrift DE 10 2006 036 751 A1 bekannten Verfahren zur Regelung oder Steuerung zumindest einer Fahrzustandsgröße eines Kraftfahrzeugs wird die Seitenführungskraft an einem Reifen des Kraftfahrzeugs für die Einstellung eines Aktuators im Kraftfahrzeug gemäß einem vorgegebenen kinematischen Zusammenhang als Funktion der Zahnstangenkraft ermittelt, die in der Zahnstange des Lenksystems des Kraftfahrzeugs wirkt. Außerdem wird die Zahnstangenkraft als Funktion der im Lenksystem wirkenden Lenkmomente ermittelt.

[0005] Ein Verfahren zum Bestimmen des Reibungsbeiwerts bei einem Kraftfahrzeug mit mindestens einem gelenkten Rad ist in der Druckschrift DE 10 2010 036 638 A1 beschrieben. Dabei wird an dem mindestens einen gelenkten Rad die Seitenführungskraft bestimmt, wobei eine Zahnstangenkraft erfasst und ein Rückstellmoment an dem gelenkten Rad in Abhängigkeit der Zahnstangenkraft sowie der Seitenführungskraft als eine Funktion eines Nachlaufs ermittelt und auf Grundlage des Rückstellmoments der Reibungsbeiwert bestimmt wird.

[0006] Die Abschätzung des Reibungsbeiwerts kann über verschiedene bereits bekannte Ansätze erfolgen. Beispielsweise kann während eines Brems- oder Beschleunigungsvorgangs ein Radschlupf ermittelt und daraus der Reibungsbeiwert bestimmt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, mit Hilfe einer aktuell gemessenen Querbearbeitung ein Ausschlussverfahren durchzuführen. Dabei können bei hohen Aufbaubearbeitungen eines Kraftfahrzeugs niedrige Reibungsbeiwerte ausgeschlossen werden, da eine hohe Querbearbeitung auf einer glatten Fahrbahn nicht zu erreichen ist.

[0007] Eine weitere Möglichkeit sieht die Nutzung eines Kraftfahrzeugmodells vor, mit dessen Hilfe ein theoretisches Rückstellmoment bzw. eine theoretische Zahnstangenkraft der Lenkung ermittelt werden kann. Dazu werden bei Durchführung bisheriger Maßnahmen diverse Eingangssignale benötigt, üblicherweise eine Querbearbeitung, eine Gierrate, eine Kraftfahrzeuglänge und ein Kurvenradius. Derartige für Fahrbahnen mit hohem Reibungsbeiwert geltenden Referenzwerte werden mit den Werten eines aktuell gemessenen und/oder abgeschätzten Rückstellmoments bzw. der aktuellen Zahnstangenkraft verglichen. Über ein weiteres Modell oder ein Kennfeld kann anschließend aus dem Momenten- bzw. Kraftverhältnis der Reibungsbeiwert abgeschätzt werden.

[0008] Diese genannten Maßnahmen sind bspw. in den Druckschriften DE 103 19 662 A1 und DE 10 2010 036 638 A1 erwähnt.

[0009] Vor diesem Hintergrund werden ein Verfahren mit den Merkmalen von Patentanspruch 1, ein Verfahren mit den Merkmalen von Patentanspruch 12 und ein System mit den Merkmalen von Patentanspruch 18 vorgestellt. Weitere Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Patentansprüchen und der Beschreibung.

[0010] Das erfindungsgemäße Verfahren ist zum Betreiben eines Kraftfahrzeugs vorgesehen, das hier beispielhaft eine Lenkanlage mit einer Zahnstange aufweist, mit der Räder an einer Achse, auf denen Reifen

aufgezogen sind, inklusive zugehöriger Radaufhängungen des Kraftfahrzeugs gelenkt werden. Dabei wird das Kraftfahrzeug auf einer Fahrbahn bzw. einem Untergrund bewegt. Bei dem Verfahren wird ein Reibungsbeiwert oder eine davon abgeleitete Größe zwischen einem jeweiligen Reifen und der Fahrbahn unter Berücksichtigung eines Fahrzustands, einer Kinematik der Lenkanlage, einer Kinematik der Achse, eines Verhaltens der Reifen auf den Rädern und/oder deren Nachlaufstrecke als charakteristischer Größe bzw. Betriebszustand des Kraftfahrzeugs ermittelt. Im Verlauf einer Anwendung des Verfahrens werden sich ändernde Betriebsparameter des Kraftfahrzeugs und der Reifen durch eine Lernphase, die während mindestens einer Fahrt des Kraftfahrzeugs durchgeführt wird, erkannt und berücksichtigt werden und das Verfahren in Ausgestaltung entsprechend adaptiert.

[0011] Der Reibungsbeiwert oder die davon abgeleitete Größe als Betriebsparameter wird zwischen einem jeweiligen Reifen und der Fahrbahn aus gemessenen Kräften und/oder Drehmomenten in der Achse, der Lenkanlage und/oder den Reifen sowie aus fahrdynamischen Betriebsparametern, bspw. der Geschwindigkeit und/oder Querbeschleunigung, des Kraftfahrzeugs ermittelt.

[0012] Der Reibungsbeiwert wird als Funktion, die von mindestens einem weiteren Betriebsparameter abhängig ist, berechnet. Als der mindestens eine weitere, üblicherweise fahrdynamische Betriebsparameter wird ein Lenkwinkel, eine Querbeschleunigung, die auf das Kraftfahrzeug wirkt, eine Gierrate des Kraftfahrzeugs, eine Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugs, eine auf die Zahnstange wirkende Zahnstangenkraft, ein Rückstellmoment mindestens eines Reifens und/oder ein Lenkwinkel mindestens eines Rads verwendet.

[0013] In Ausgestaltung wird eine aktuelle, gemessene Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} in einen ersten Anteil, der die Nachlaufstrecke der Reifen auf den Rädern umfasst, und in einen zweiten, konstruktiven Anteil, der eine Kinematik der Achse bzw. Achskinematik umfasst, unterteilt. Dabei wird der zweite, konstruktive Anteil hier als konstruktive Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k} = k_{SV} \cdot F_{SV}$ bezeichnet, die proportional zu einer auf das Kraftfahrzeug wirkenden Seitenkraft ist.

[0014] Weiterhin wird die Nachlaufstrecke auf einer Strecke mit hohem Reibungsbeiwert in Abhängigkeit von der auf das Kraftfahrzeug wirkenden Seitenkraft F_{SV} bestimmt. Darauf basierend wird der Referenzwert für die Zahnstangenkraft, der für eine Fahrbahn mit hohem Reibungsbeiwert zu ermitteln ist, in Ausgestaltung mit einem Wert der aktuell gemessenen Zahnstangenkraft verglichen, wobei der Reibungsbeiwert unter Berücksichtigung eines aktuellen Fahrzustands des Kraftfahrzeugs abgeschätzt wird.

[0015] Außerdem wird eine dynamische Radlast für mindestens ein vorderes Rad als Funktion der Querbeschleunigung oder einer dazu äquivalenten Größe, bspw. der Seitenkraft, die als fahrdynamischer Betriebsparameter auf das Kraftfahrzeug, insbesondere bei einer Kurvenfahrt, wirkt, bestimmt. Durch die Querbeschleunigung ergibt sich eine dynamische Verlagerung bzw. Änderung der Radlast, wobei eine Änderung der Radlast direkt proportional zur Querbeschleunigung ist.

[0016] In weiterer Ausgestaltung wird die Achskinematik der Achse, insbesondere der vorderen Achse des Kraftfahrzeugs, und deren Einfluss auf ein Verhalten einer Kraft- und Drehmomentenübertragung von einem resultierenden Punkt einer Krafteinleitung in einer Aufstandsfläche bzw. Radaufstandsfläche mindestens eines Rads bis zu einem Ort einer Messung der Kraft oder des Drehmoments an der Achse berücksichtigt.

[0017] Ein Verhalten der Reifen und/oder der Nachlaufstrecke des mindestens einen Rads in dem resultierenden Punkt in der Aufstandsfläche des mindestens einen Rads und/oder Reifens auf der Fahrbahn wird durch variable Fahrbetriebszustände, durch Kräfte, die auf das mindestens eine Rad wirken, und durch unterschiedliche Lasten, die auf das mindestens eine Rad wirken, beeinflusst.

[0018] Die Ermittlung des Reibungsbeiwerts oder der davon abgeleiteten Größe wird in der Regel nur dann durchgeführt, wenn nachfolgende Bedingungen erfüllt sind. Diese Bedingungen sind erfüllt, wenn die Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugs größer als ein hierfür vorgesehener minimaler Wert ist, wenn die Querbeschleunigung des Kraftfahrzeugs größer als ein hierfür vorgesehener Wert ist, wenn Einflüsse von Antriebs- und Bremsmomenten an der Achse zu vernachlässigen sind, wenn eine zweite Ableitung des Lenkwinkels nach der Zeit, d. h. eine Lenkwinkelbeschleunigung, und eine dritte Ableitung des Lenkwinkels nach der Zeit, d. h. ein Lenkwinkelruck, jeweils hierfür vorgesehene maximale Werte unterschreiten und/oder der Lenkwinkel sich außerhalb eines Bereichs des Nulldurchgangs befindet, und wenn das Verhältnis der Geschwindigkeit des Lenkwinkels zur Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugs und der Bremsdruck jeweils kleiner als ein hierfür vorgesehener Schwellwert sind.

[0019] In einer weiteren Ausgestaltung werden aus erfassten Betriebsparametern eine wirksame Nachlaufstrecke und eine bei hohem Reibungsbeiwert zu erwartende theoretische Nachlaufstrecke berechnet, wobei für die berechnete wirksame Nachlaufstrecke ein Ausschlusskriterium überprüft wird. Falls eine Prüfung dieses Ausschlusskriteriums positiv ausfällt, wird festgestellt, dass keine neue zuverlässige Abschätzung des Reibungsbeiwerts zwischen den Reifen und der befahrenen Fahrbahn möglich ist. Falls die Prüfung des Ausschlusskriteriums negativ ausfällt, wird ein Wert der Querbesehleunigung überprüft. Falls der Wert der Querbesehleunigung größer als ein unterer Grenzwert und kleiner als ein oberer Grenzwert ist, werden die Betriebsparameter zur Auswertung der Zahnstangenkraft erneut angepasst bzw. adaptiert, wobei für den Fall, dass die Querbesehleunigung größer als der obere Grenzwert oder gleich dem oberen Grenzwert ist, ein Vergleich von Werten einer theoretischen Nachlaufstrecke mit Werten der wirksamen Nachlaufstrecke durchgeführt wird. Falls Werte der theoretischen Nachlaufstrecke kleiner als Werte der wirksamen Nachlaufstrecke sind, werden die Betriebsparameter zur Auswertung der Zahnstangenkraft erneut angepasst. Falls Werte für die theoretische Nachlaufstrecke und die wirksame Nachlaufstrecke um maximal einen Toleranzwert voneinander abweichen, wird ermittelt, dass die Querbesehleunigung aktuell zu gering ist, und dass keine neue zuverlässige Abschätzung des Reibungsbeiwerts zwischen den Reifen und der befahrenen Fahrbahn möglich ist. Falls Werte der theoretischen Nachlaufstrecke um den Toleranzwert größer als jene der wirksamen Nachlaufstrecke sind, wird ein maximal nutzbarer Kraftschluss und somit der Reibungsbeiwert abgeschätzt.

[0020] Außerdem wird im Rahmen des Verfahrens für mindestens eine Kenngröße des Kraftfahrzeugs, bspw. der Lenkanlage, mindestens eines Rads und/oder Reifens, bzw. für einen kraftfahrzeugspezifischen Betriebsparameter ein gespeicherter Wert für die mindestens eine Kenngröße berücksichtigt. Dabei wird zu regelmäßigen Zeitpunkten und/oder bei Vorliegen eines charakteristischen Betriebsbereichs bzw. Betriebszustands des Kraftfahrzeugs ein aktueller Wert für die mindestens eine Kenngröße des Kraftfahrzeugs ermittelt und der bislang gespeicherte Wert für die mindestens eine Kenngröße an den aktuellen Wert adaptiert, wobei die mindestens eine Kenngröße aktualisiert wird. Eine derartige Kenngröße ist z. B. ein Beladungszustand des Kraftfahrzeugs oder eine Profiltiefe sowie ein Luftdruck des mindestens einen Reifens. Unter Berücksichtigung des charakteristischen Betriebsbereichs des Kraftfahrzeugs werden bei Durchführung des Verfahrens veränderte Kenngrößen des Kraftfahrzeugs und/oder des mindestens einen Reifens erkannt und das Verfahren entsprechend adaptiert bzw. angepasst. Somit ist eine Langzeit-Güte des Verfahrens zu verbessern. Üblicherweise kann der dabei zu nutzende Betriebsbereich so gewählt werden, dass dort verfahrensbedingt keine Messung des Reibungsbeiwerts stattfindet. Regelmäßige Zeitpunkte, zu denen eine Überwachung der mindestens einen Kenngröße und ggf. eine Anpassung des Verfahrens durchgeführt wird, werden anhand eines ggf. variabel einstellbaren Zeitintervalls, bspw. einer Minute, einer Stunde oder eines Tags, festgelegt und/oder wiederholt. Ein derartiges Zeitintervall kann unter Berücksichtigung einer jeweiligen Laufzeit des Kraftfahrzeugs unabhängig von einem Stillstand des Kraftfahrzeugs eingestellt werden.

[0021] Das weitere erfindungsgemäße Verfahren ist zum Betreiben eines Kraftfahrzeugs vorgesehen, das eine Lenkanlage mit einer Zahnstange aufweist, mit der Räder an einer Achse, auf denen Reifen aufgezogen sind, inklusive zugehöriger Radaufhängungen des Kraftfahrzeugs gelenkt werden, wobei das Kraftfahrzeug auf einer Fahrbahn bewegt wird. Hierbei werden in einer Lernphase, die während mindestens einer Fahrt des Kraftfahrzeugs durchgeführt wird, Wertepaare jeweils aus Werten für eine aktuelle Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} der Zahnstange sowie aus Werten für eine auf das Kraftfahrzeug wirkende, aktuelle Seitenkraft F_{Sv_akt} , die aus fahrdynamischen Betriebsparametern berechnet werden, ermittelt. Hierbei wird aus mehreren Wertepaaren eine Steigung m_{akt} für mindestens eine Gerade, die eine Proportionalität zwischen der aktuellen Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} und der aktuellen Seitenkraft F_{Sv_akt} beschreibt, ermittelt, wobei für die Steigung m_{akt} gilt:

$$m_{akt} = \frac{\sum_{t=1}^T \Delta F_{Sv_akt}(t) * \Delta F_{Zst_akt}(t)}{\sum_{t=1}^T \Delta F_{Sv_akt}(t)^2}$$

[0022] Somit wird in Ausgestaltung zum Bestimmen des Reibungsbeiwerts u. a. ein Zusammenhang zwischen der Zahnstangenkraft F_{Zst} und der Querbesehleunigung bzw. der Seitenkraft F_{Sv} , die auf das Kraftfahrzeug wirkt, genutzt. Die aktuell wirkende Seitenkraft wird hierzu aus Betriebsparametern des Kraftfahrzeugs, bspw. fahrdynamischen bzw. kinematischen Größen zum Beschreiben einer Bewegung des Kraftfahrzeugs, berechnet.

[0023] Nach der Lernphase wird über einen Gefahrenindikator GI eine mögliche Abweichung der aktuellen Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} von der Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} unter Berücksichtigung einer konstruktiven Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k}$ bestimmt, wobei für den Gefahrenindikator GI gilt:

$$GI = \left(\frac{F_{Zst_akt} - F_{Zst_akt_k}}{F_{Zst_ref} - F_{Zst_akt_k}} \right)$$

[0024] Die Lernphase wird in der Regel dann durchgeführt, nachdem Räder des Kraftfahrzeugs mit Reifen neu bereift worden sind.

[0025] Außerdem kann das Verfahren mit einem geringstmöglichen Signal-Umfang betrieben werden, so dass nur eine geringe Anzahl von Werten von Betriebsparametern, die üblicherweise einem Steuergerät über Signale bereitgestellt werden, erforderlich ist. Dies betrifft beispielsweise Werte für den eingeschlagenen Lenkwinkel mindestens eines Rads, die Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugs in Vorwärts- bzw. Längsrichtung und/oder die Querschleunigung. Von dem Steuergerät des Kraftfahrzeugs wird nur die geringe Anzahl an gemessenen und/oder ermittelten Werten von Betriebsparametern verwendet, um keine weitere Messtechnik und hohe Steuergeräte-Ressourcen einsetzen zu müssen.

[0026] Das erfindungsgemäße System bzw. eine entsprechende Anordnung ist zum Betreiben eines Kraftfahrzeugs ausgebildet, das eine Lenkanlage mit einer Zahnstange aufweist, mit der Räder an einer Achse, auf denen Reifen aufgezogen sind, inklusive zugehöriger Radaufhängungen des Kraftfahrzeugs gelenkt werden, wobei das Kraftfahrzeug auf einer Fahrbahn bewegt wird. Das System umfasst ein Steuergerät, das dazu ausgebildet ist, einen Reibungsbeiwert oder eine davon abgeleitete Größe zwischen einem jeweiligen Reifen und der Fahrbahn unter Berücksichtigung eines Fahrzustands, einer Kinematik der Lenkanlage, einer Kinematik der Achse, eines Verhaltens der Reifen auf den Rädern und/oder deren Nachlaufstrecke als charakteristischer Größe zu ermitteln. Das Steuergerät ist weiterhin dazu ausgebildet, sich ändernde Betriebsparameter des Kraftfahrzeugs und der Reifen durch eine Lernphase, die während mindestens einer Fahrt des Kraftfahrzeugs durchzuführen ist, zu erkennen und zu berücksichtigen.

[0027] Im Rahmen der vorgestellten Verfahren wird mit der mindestens einen Gerade mit der Steigung m_{akt} ein linearer Ansatz zum Ermitteln der Seitenkraft bzw. Querschleunigung genutzt. Der Reibungsbeiwert ist alternativ oder ergänzend lediglich unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugs und des Lenkwinkels mindestens eines Rads zu ermitteln. In einer weiteren Ausgestaltung wird bzw. werden zum Bestimmen des Reibungsbeiwerts die Achskinematik der Achse und/oder die Lenkinematik der Lenkanlage zur genaueren Bestimmung des Reibungsbeiwerts berücksichtigt.

[0028] Das hier vorgestellte Verfahren basiert auf der Ableitung von Kraft- bzw. Drehmomentenverhältnissen im Bereich radführender Komponenten des Kraftfahrzeugs. Dies kann bspw. durch die Ermittlung einer Zahnstangenkraft in der Lenkanlage des Kraftfahrzeugs durchgeführt werden. Ein sich dabei ergebendes Signal kann aus internen Betriebsparametern der Lenkanlage abgeleitet werden, wie dies z. B. bei Umsetzung einer Maßnahme für ein sog. Electric-Power-Steering (EPS) möglich ist. Alternativ werden Maßnahmen zum Messen äquivalenter Kräfte bzw. Momente, z. B. mittels einer zusätzlich angebrachten Sensorik im Bereich einer Radführung, bspw. durch Dehnmessstreifen an Spurstangen oder einer Momenten-Sensorik, eingesetzt.

[0029] Falls nur für zwei der genannten Betriebsparameter, hier bspw. für die Geschwindigkeit und den Lenkwinkel, eingehende Signale mit gemessenen Werten zur Verfügung stehen, wird zum Bestimmen des Reibungsbeiwerts ein Simulationsmodell eingesetzt, für das mindestens eine Annahme getroffen wird und/oder in das mindestens eine Abfrage integriert ist.

[0030] In Ausgestaltung wird der Reibungsbeiwert der Reifen des Kraftfahrzeugs auf der Fahrbahn über eine Veränderung eines Rückstellmoments des mindestens einen Reifens geschätzt.

[0031] Tritt eine signifikante Abweichung von aktuell gemessenen Wertepaaren von einer Geraden auf, die bei Hochreibwertverhältnissen und somit bei einem hohen Reibungsbeiwert ermittelt wurde, kann durch einen Grad der Abweichung eine Abnahme des Reibungsbeiwerts quantifiziert werden.

[0032] Solange von einem Reifen weniger als ca. 50% des verfügbaren Reibungsbeiwerts μ ausgenutzt werden, treten keine merklichen Gleitbewegungen in der Reifenaufstandsfläche auf. Dadurch ist die Nachlaufstrecke des Reifens näherungsweise konstant, d. h. die Seitenkraft greift immer im gleichen Abstand hinter einer Mitte des Reifens bzw. des Rads an. Hierdurch steigt das Rückstellmoment des Reifens proportional zur übertragenen Seitenkraft. Zumindest bei kleinen Lenkwinkeln ist die Zahnstangenkraft zum Rückstellmoment des Reifens ebenfalls proportional, somit ist zwischen der aktuellen Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} und der aktuellen Seitenkraft F_{Sv_akt} näherungsweise die Proportionalität gegeben. Falls deutlich mehr als 50% des Reibungs-

beiwerts ausgenutzt werden, so beginnt der Reifen im hinteren Bereich der Reifenaufstandsfläche zu gleiten, wobei die Nachlaufstrecke abnimmt. Die gemessene Zahnstangenkraft wird dadurch geringer. Aus der Abweichung zwischen der auftretenden Zahnstangenkraft und der Zahnstangenkraft, die bei dieser Seitenkraft aus der zuvor angelernten Proportionalität zwischen der Zahnstangenkraft und der Seitenkraft berechnet wird, kann auf den momentan verfügbaren Kraftschluss zwischen dem Reifen und der Fahrbahn geschlossen werden.

[0033] In weiterer Ausgestaltung wird berücksichtigt, dass die Nachlaufstrecke von einer Seitenkraft, die auf das Kraftfahrzeug wirkt, abhängig ist. Üblicherweise wird die Nachlaufstrecke auf einer Strecke mit hohem Reibungsbeiwert μ in Abhängigkeit von der wirkenden Seitenkraft bestimmt. Die Nachlaufstrecke nimmt als Funktion der Radlast durch eine größere Aufstandsfläche eines Rads zu, wobei eine maximale Seitenkraft und die Aufstandsfläche nahezu proportional zu einer Zunahme einer jeweiligen Radlast steigen.

[0034] In der Regel werden Werte für einen eingeschlagenen Lenkwinkel mindestens eines Rads und für eine Längsgeschwindigkeit des Kraftfahrzeugs von einem Steuergerät des Kraftfahrzeugs als gemessene Betriebsparameter verwendet.

[0035] Üblicherweise wird eine Seitenkraft berechnet, die an einer als Vorderachse ausgebildeten Achse und/oder lenkbaren Achse des Kraftfahrzeugs wirkt.

[0036] Die wirksame Nachlaufstrecke wird in Ausgestaltung berechnet. Dies kann bedeuten, dass ein hoher Reibungsbeiwert μ bzw. ein Hochreibungsbeiwert, der sich theoretisch auf die wirksame Nachlaufstrecke auswirkt, berechnet wird.

[0037] Die theoretische Nachlaufstrecke ist hier jene Nachlaufstrecke, die sich am Reifen ergibt, wenn keine Gleitbewegungen auftreten und optimale Bedingungen für den Reibungsbeiwert herrschen. Unter der Annahme, dass die theoretische Nachlaufstrecke unabhängig von der wirkenden Seitenkraft bzw. Querbeschleunigung konstant ist, ist aus der theoretischen Nachlaufstrecke die Proportionalität zwischen der Zahnstangenkraft und die Seitenkraft, die mit der hierfür vorgesehenen Gerade darstellbar ist, abzuleiten. Die wirksame Nachlaufstrecke ist hingegen die tatsächlich im Fahrbetrieb an den Reifen wirkende Nachlaufstrecke. Bei geringer Ausnutzung des Reibungsbeiwerts sind die beiden Nachlaufstrecken in guter Näherung identisch. Bei einer Ausnutzung von deutlich mehr als 50% des Reibungsbeiwerts ist die wirksame Nachlaufstrecke merklich geringer als die theoretische Nachlaufstrecke. Die dabei auftretende Zahnstangenkraft wird somit ebenfalls geringer.

[0038] In einer möglichen Ausgestaltung wird für die berechnete wirksame Nachlaufstrecke das Ausschlusskriterium überprüft. Hierbei wird für den Fall, dass der Wert der Querbeschleunigung größer als ein unterer Grenzwert, von z. B. $0,5 \text{ m/s}^2$, und/oder kleiner als ein oberer Grenzwert, von z. B. 1 m/s^2 , ist, die Betriebsparameter zur Auswertung der Zahnstangenkraft erneut angepasst werden. Falls die Querbeschleunigung größer als der obere Grenzwert oder gleich dem oberen Grenzwert ist, wird ein Vergleich von Werten einer theoretischen Nachlaufstrecke n_{R_theo} mit Werten einer wirksamen Nachlaufstrecke n_{R_wirk} durchgeführt.

[0039] Dabei wird einer Schätzung des Reibungsbeiwerts nur dann vertraut, wenn das Ausschlusskriterium nicht erfüllt ist, wobei zur Beurteilung des Ausschlusskriteriums bspw. Werte des Antriebsmoments an der Achse, eine Beschleunigung $d^2\delta/dt^2$ des Lenkwinkels δ sowie eine Ableitung der Beschleunigung des Lenkwinkels betrachtet wird, wodurch vermieden wird, dass bei einer stark schwankenden Beschleunigung $d^2\delta/dt^2$ des Lenkwinkels Nulldurchgänge der Beschleunigung $d^2\delta/dt^2$ des Lenkwinkels als gültig angesehen werden. Als weitere Betriebsparameter werden ein Verhältnis der Geschwindigkeit $d\delta/dt$ des Lenkwinkels zur Geschwindigkeit v_x des Kraftfahrzeugs und der Bremsdruck betrachtet. Das Ausschlusskriterium liegt vor, wenn ein Wert eines der voranstehend genannten Betriebsparameter größer als ein jeweils hierfür zu definierender und/oder festzulegender Grenzwert ist.

[0040] Alternativ oder ergänzend wird eine Schätzung des Reibungsbeiwerts nur dann durchgeführt, falls die Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugs größer als ein hierfür vorgesehener Minimalwert ist, damit unter anderem eine Auflösung der Gierrate bzw. Giergeschwindigkeit ausreichend genau ist, und falls von einem Fahrwerkregelsystem kein Regeleingriff vorliegt.

[0041] In weiterer Ausgestaltung wird der Fall berücksichtigt, dass eine wirksame Nachlaufstrecke größer als die theoretische Nachlaufstrecke ist. Demnach entsprechen Werte von Betriebsparametern des Kraftfahrzeugs nicht hierfür vorgesehenen Werten, die zur Bestimmung der theoretischen Nachlaufstrecke verwendet worden sind. In diesem Fall wird die ermittelte Nachlaufstrecke zum Anpassen der Betriebsparameter zur Auswertung

der Zahnstangenkraft verwendet. Falls jedoch der Wert der wirksamen Nachlaufstrecke kleiner als der hierfür vorgesehene theoretische Wert wird, wird dieser Wert zur Abschätzung des maximal nutzbaren Reibungsbeiwerts verwendet.

[0042] In der Regel wird eine Abhängigkeit des Reibungsbeiwerts entweder durch eine mathematische Funktion oder durch ein Kennfeld dargestellt, wobei für den Fall, dass eine ermittelte, wirksame Nachlaufstrecke unterhalb eines Grenzwerts liegt, der von der Seitenkraft abhängig ist, und kein Ausschlusskriterium vorliegt, der Reibungsbeiwert geschätzt wird.

[0043] Das erfindungsgemäße System bzw. die entsprechende Anordnung umfasst mindestens einen Sensor zum Erfassen von mindestens einem bspw. fahrdynamischen und/oder kraftfahrzeugspezifischen Betriebsparameter des Kraftfahrzeugs und ist dazu ausgebildet, das voranstehend vorgestellte Verfahren durchzuführen.

[0044] Das Steuergerät umfasst ein Modul, das zum Schätzen des Reibungsbeiwerts μ unter Berücksichtigung eines Simulationsmodells ausgebildet ist.

[0045] Das Steuergerät ist zudem dazu ausgebildet, einen Referenzwert für die Zahnstangenkraft ausschließlich aus einem Lenkwinkel mindestens eines Rads und einer Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugs zu bestimmen.

[0046] Das vorgestellte Verfahren ist üblicherweise adaptiv durchführbar, wobei diverse, üblicherweise kraftfahrzeugspezifische Betriebsparameter bzw. Kenngrößen des Kraftfahrzeugs über dessen Lebensdauer, bspw. durch betriebsbegleitende Aktualisierungen, anzupassen sind.

[0047] Das Verfahren erreicht durch Betrachtung des Reifennachlaufs als charakteristischer Größe zur Ermittlung des Reibungsbeiwerts eine hohe Stabilität. Hierbei ist eine Radlastverteilung (links – rechts) an der Vorderachse aufgrund einer Querbeschleunigung bei einer Kurvenfahrt zu berücksichtigen. Außerdem ist eine Kinematik der Vorderachse und deren Einfluss eines Verhaltens der Kraftübertragung auf die Spurstangen zu berücksichtigen. Bei dem Verfahren werden eine Funktion der Reifen, eine Beeinflussung eines Reifennachlaufs und ein resultierender Krafteinleitungspunkt in die Reifenaufstandsfläche durch Reifen-Längs-Kräfte und Reifen-Quer-Kräfte sowie unterschiedliche Radlasten betrachtet, wobei die Vorderachse auch durch einen Motor des Kraftfahrzeugs angetrieben werden kann.

[0048] Somit ist eine Reduktion notwendiger Betriebsparameter auf den Lenkwinkel und die Geschwindigkeit zum Vereinfachen des Verfahrens und zur schnellen Realisierung auf einem EPS-Steuergerät mit einfacher Algorithmik möglich.

[0049] Bei dem Verfahren wird in weiterer Ausgestaltung während mindestens einer Fahrt des Kraftfahrzeugs eine das Reifenrückstellmoment charakterisierende Größe als Betriebsparameter in Relation zur wirksamen Seitenkraft, die an diesem Rad zwischen Reifen und Fahrbahn wirkt, gesetzt. Diese Betrachtung kann auch achsweise oder auf das gesamte Kraftfahrzeug bezogen durchgeführt werden.

[0050] In einer Ausgestaltung des Verfahrens wird bspw. angenommen, dass zwischen der aktuellen Zahnstangenkraft und der aktuellen Seitenkraft der über die Gerade darstellbare linearer Zusammenhang besteht. Bei einer hierbei zu berücksichtigenden Näherung werden alle nichtlinearen Effekte aus einer Radaufhängung des Kraftfahrzeugs, die z. B. von Lenkwinkeln und Wankwinkeln abhängig sind, vernachlässigt. Dabei wird aus mehreren Wertepaaren eine Steigung m_{akt} für mindestens eine Gerade bzw. Ausgleichsgerade, die eine Proportionalität zwischen der Zahnstangenkraft und der Seitenkraft beschreibt, ermittelt.

[0051] Somit wird die zu ermittelnde Steigung m_{akt} bei dieser Ausgestaltung über eine Ausgleichsrechnung berechnet, wobei das Produkt aus den Wertepaaren $F_{\text{Zst_akt}}(t)$ für die aktuelle Zahnstangenkraft und $F_{\text{Sv_akt}}(t)$ für die aktuelle Seitenkraft, die jeweils zu demselben Zeitpunkt ermittelt werden, gebildet und anschließend aufsummiert wird. Eine dabei ermittelte Summe wird durch die Summe aller Quadrate der zu den Zeitpunkten jeweils ermittelten Seitenkräften $F_{\text{Sv_akt}}(t)$ geteilt.

[0052] Alternativ wird eine Gleichung für eine Referenz-Zahnstangenkraft $F_{\text{Zst_ref}} = m_{\text{akt}} \cdot F_{\text{Sv}} + b$ und somit für eine Soll-Zahnstangenkraft, die bei Betrieb des Kraftfahrzeugs herrschen sollte, ermittelt. Dabei wird mit einem konstanten Wert b ein Offset und/oder ein Wert für eine konstruktive Zahnstangenkraft $F_{\text{Zst_akt_k}}$ beschrieben. Die Steigung m_{akt} hängt u. a. von einem Druck und einer Temperatur eines Reifens eines Rads ab.

[0053] Werte für die aktuelle Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} werden zu deren Ermittlung gemessen oder alternativ berechnet, wohingegen Werte für eine auf das Kraftfahrzeug wirkende Seitenkraft F_{Sv} zu deren Ermittlung berechnet oder alternativ gemessen werden.

[0054] Zum Bestimmen der Steigung m_{akt} wird ein direkter Zusammenhang zwischen der gemessenen, aktuellen Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} und der aktuellen Seitenkraft F_{Sv_akt} ausgewertet. Alternativ können auch Wertepaare aus Werten der Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} und zugeordneten Werten der Querschleunigung ausgewertet werden.

[0055] Zum Ermitteln der aktuellen Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} bei nicht konstantem Lenkwinkel δ kann ein Wert für die bspw. gemessene Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} mit zumindest einem Korrekturwert F_{Zst_korr} korrigiert werden. Für die aktuelle Zahnstangenkraft gilt:

$$F_{Zst_akt} = F_{Zst_gem} - J_{Rad} * \ddot{\delta} + \frac{c_{\gamma} * \Theta_{Rad} * \dot{\delta} * n_{Rad} * (\pi)^2}{h_w}$$

[0056] Hierbei ist F_{Zst_gem} die gemessene Zahnstangenkraft, J_{Rad} eine Massenträgheit jener Komponenten, u. a. der Räder, des Kraftfahrzeugs, die bei einer Lenkung um den Lenkwinkel δ bewegt werden. $d^2 \delta / dt^2$ bzw. $\ddot{\delta}$ ist eine Lenkbeschleunigung, Θ_{Rad} eine rotatorische Massenträgheit der Räder, $d \delta / dt$ bzw. $\dot{\delta}$ eine Lenkgeschwindigkeit, n_{Rad} eine Drehzahl eines bewegten Rads und h_w ein wirksamer Spurhebel. c_{γ} ist das Verhältnis der Sturzänderung bezogen auf eine Lenkwinkeländerung beim Einschlagen der Räder. Ein erster Korrekturwert F_{Zst_korr1} beschreibt eine Massenträgheit, für die gilt:

$$F_{Zst_korr1} = -J_{Rad} * \ddot{\delta}$$

[0057] Ein zweiter Korrekturwert F_{Zst_korr2} beschreibt Kreiselkräfte, wobei gilt:

$$F_{Zst_korr2} = \frac{c_{\gamma} * \Theta_{Rad} * \dot{\delta} * n_{Rad} * (\pi)^2}{h_w}$$

[0058] In der Regel wird hier nur der erste Korrekturwert F_{Zst_korr1} verwendet. Eine ergänzende Verwendung des zweiten Korrekturwerts F_{Zst_korr2} ist nur optional vorgesehen.

[0059] Auf Basis einer aktuell ermittelten charakteristischen Größe des Reifenrückstellmoments und einer zusätzlichen Größe, die zur aktuell wirkenden Seitenkraft äquivalent ist, wird auf einen aktuell verfügbaren Kraftschluss zwischen der Fahrbahn und den auf den Rädern aufgezogenen Reifen und somit den Reibungsbeiwert μ geschlossen.

[0060] Das Reifenrückstellmoment bzw. Rückstellmoment des Reifens entsteht dadurch, dass die Seitenkraft um die Nachlaufstrecke versetzt hinter der Mitte des Rads angreift. Dabei ist das Rückstellmoment ein Produkt aus der Seitenkraft und der Nachlaufstrecke. Bei bekannter Seitenkraft kann somit aus dem Rückstellmoment die Nachlaufstrecke und umgekehrt aus der Nachlaufstrecke das Rückstellmoment berechnet werden. Die Nachlaufstrecke ist somit eine charakteristische Größe des Reifenrückstellmoments.

[0061] Die Lernphase, die während des Verfahrens durchführbar ist, wird u. a. bei einem Wechsel eines Betriebsbereichs des Kraftfahrzeugs durchgeführt und dabei die Steigung m_{akt} aktualisiert, nachdem Räder des Kraftfahrzeugs neu bereift worden sind. Alternativ oder ergänzend wird eine Lernphase durchgeführt, nachdem ein Modus bzw. ein Betriebsbereich eines Fahrwerks des Kraftfahrzeugs verändert worden ist. Dabei können für unterschiedliche Fahrwerkmodi Werte für unterschiedliche Steigungen hinterlegt sein.

[0062] Es ist auch möglich, die Lernphase zur Adaption von Betriebsparametern in regelmäßigen zeitlichen Abständen und/oder nach einer bestimmten zurückgelegten Strecke durchzuführen und somit die Steigung m_{akt} zu aktualisieren, wodurch eine Abnutzung der verwendeten Reifen berücksichtigt werden kann.

[0063] In weiterer Ausgestaltung wird eine erste Gerade mit einer ersten Steigung m_{akt} für eine Fahrtrichtung bzw. Lenkung nach links und eine zweite Gerade mit einer zweiten Steigung m_{akt} für eine Fahrtrichtung bzw. Lenkung nach rechts ermittelt.

[0064] Das erfindungsgemäße System umfasst den mindestens einen Sensor zum kontinuierlichen Erfassen von mindestens einem Betriebsparameter, bspw. des Lenkwinkels von mindestens einem Rad, eines Lenkradwinkels, um den das Lenkrad gedreht wird, der Seitenkraft F_{Sv} und der Querbewegung a_y sowie von Kraft- bzw. Momentenverhältnissen in radführenden Elementen der Radaufhängung bzw. der Lenkanlage bzw. eines Lenksystems des Kraftfahrzeugs. Die Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} wird in Ausgestaltung aus anderen sensorisch ermittelten Betriebsparametern abgeleitet.

[0065] In Ausgestaltung des Verfahrens wird unter anderem die Zahnstangenkraft eines Zahnstangenlenksystems ermittelt.

[0066] Weitere Vorteile und Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und den beiliegenden Zeichnungen.

[0067] Es versteht sich, dass die voranstehend genannten und die nachstehend noch zu erläuternden Merkmale nicht nur in der jeweils angegebenen Kombination, sondern auch in anderen Kombinationen oder in Alleinstellung verwendbar sind, ohne den Rahmen der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

[0068] Fig. 1 zeigt in schematischer Darstellung ein Detail eines Kraftfahrzeugs sowie eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Systems.

[0069] Fig. 2 zeigt ein erstes Diagramm mit Betriebsparametern, die bei einer ersten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden.

[0070] Fig. 3 zeigt ein zweites Diagramm mit Betriebsparametern, die bei der ersten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden.

[0071] Fig. 4 zeigt ein drittes Diagramm mit Betriebsparametern, die bei der ersten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden.

[0072] Fig. 5 zeigt ein viertes Diagramm mit Betriebsparametern, die bei der ersten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden.

[0073] Fig. 6 zeigt in schematischer Darstellung ein Beispiel eines Steuergeräts als eine Komponente des erfindungsgemäßen Systems.

[0074] Fig. 7 zeigt ein erstes und ein zweites Diagramm mit Betriebsparametern, die bei einer zweiten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden.

[0075] Fig. 8 zeigt ein drittes und ein viertes Diagramm mit Betriebsparametern, die bei der zweiten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden.

[0076] Fig. 9 zeigt ein erstes Flussdiagramm zur Durchführung einer dritten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0077] Fig. 10 zeigt ein Detail aus Fig. 1 zur Bestimmung von Betriebsparametern, die bei der dritten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden.

[0078] Fig. 11 zeigt ein Diagramm zur Bestimmung von Betriebsparametern, die bei der dritten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden.

[0079] Fig. 12 zeigt ein zweites Flussdiagramm zur Bestimmung von Betriebsparametern, die im Rahmen der dritten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden.

[0080] Fig. 13 zeigt ein weiteres Detail aus Fig. 1 zur Bestimmung von Betriebsparametern, die bei der dritten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden.

[0081] Fig. 14 zeigt ein fünftes Diagramm mit Betriebsparametern, die bei der dritten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden.

[0082] Fig. 15 zeigt ein drittes Flussdiagramm zur Bestimmung von Betriebsparametern, die im Rahmen der dritten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden.

[0083] Die Figuren werden zusammenhängend und übergreifend beschrieben, gleiche Bezugsziffern bezeichnen gleiche Komponenten.

[0084] In Fig. 1 ist in schematischer Darstellung ein vorderer Abschnitt eines Kraftfahrzeugs **2** dargestellt, der hier eine als Vorderachse ausgebildete Achse **4** mit zwei lenkbaren Rädern **6**, **8**, die hier als Vorderräder ausgebildet sind, aufweist, auf denen Reifen aufgezogen sind. Außerdem umfasst das Kraftfahrzeug eine Lenkanlage **10** zum Lenken der beiden Räder **6**, **8**, wobei diese Lenkanlage **10** ein Gehäuse **11**, das ein Lenkritzeln umfasst, und eine Zahnstange **12** aufweist. Dabei umschließt das Gehäuse **11** die Zahnstange **12**. Das innerhalb des Gehäuses **11** angeordnete Lenkritzeln greift in Zähne der Zahnstange **12** ein. Die Lenkanlage **10** umfasst ferner ein manuell zu bedienendes Lenkrad **13** und eine Lenkstange **15**, wobei das Lenkritzeln und das Lenkrad **13** über die Lenkstange **15** miteinander verbunden sind.

[0085] Die hier vorgestellte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Systems **14** umfasst ein Steuergerät **16** sowie mindestens einen Sensor **18**, wobei der in Fig. 1 gezeigte, mindestens eine Sensor **18** der Zahnstange **12** und dem Gehäuse **11** der Lenkanlage **10** zugeordnet und dazu ausgebildet ist, als Betriebsparameter eine sich beim Betrieb des Kraftfahrzeugs **2** ergebende Zahnstangenkraft, d. h. eine auf die Zahnstange **12** und/oder zwischen dem Gehäuse **11** und/oder der Zahnstange **12** wirkende Zahnstangenkraft, direkt oder zumindest indirekt zu messen. Hierbei sind von dem Sensor **18** in Ausgestaltung Kontrollgrößen, d. h. Steuer- und/oder Regelgrößen in einem Aktor als Betriebsparameter der Lenkanlage **10** zu erfassen, aus denen die Zahnstangenkraft abzuleiten ist.

[0086] Die in den Fig. 2 bis Fig. 5 dargestellten Diagramme zeigen Verläufe **34**, **50**, **84**, **86**, **104**, **106**, **108** von Betriebsparametern, die im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden und nachfolgend genauer beschrieben werden.

[0087] Die Diagramme aus Fig. 2 und Fig. 3 umfassen jeweils eine Abszisse **30**, entlang der eine Querbewegung a_y des Kraftfahrzeugs **2** in m/s^2 aufgetragen ist. Außerdem umfassen die beiden Diagramme aus den Fig. 2 und Fig. 3 jeweils eine Ordinate **32**, entlang der eine Zahnstangenkraft F_{Zst} , die auf die Zahnstange **12** wirkt, aufgetragen ist.

[0088] Das Diagramm aus Fig. 2 umfasst einen kurvenförmigen Verlauf **34** von gemessenen Werten der Zahnstangenkraft $F_{Zst, gem}$ bei einem Reibungsbeiwert μ , der hier bei trockener Fahrbahn näherungsweise 1 ist. Außerdem umfasst das Diagramm aus Fig. 2 eine erste Gerade **36** für eine Referenz-Zahnstangenkraft $F_{Zst, ref}$ mit einer positiven Steigung m_{akt} , eine zweite Gerade **38** für einen Grenzwert eines Gefahrenindikators GI und eine dritte Gerade **40** zur Darstellung eines konstruktiven Anteils der Zahnstangenkraft $F_{Zst, akt, k}$, wobei diese dritte Gerade **40** eine Steigung k_{Sv} aufweist.

[0089] Die aktuelle Zahnstangenkraft $F_{Zst, akt}$ ist in Ausgestaltung in einen ersten Anteil, der eine Nachlaufstrecke bzw. einen Nachlauf der Reifen auf den Rädern **6**, **8** bzw. einen Reifennachlauf umfasst, und in einen zweiten konstruktiven Anteil, der eine Achskinematik der Achse **4** umfasst, zu unterteilen. Der zweite, konstruktive Anteil wird hier als konstruktive Zahnstangenkraft $F_{Zst, akt, k} = k_{Sv} \cdot F_{Sv}$ bezeichnet. Bei der beschriebenen Ausführungsform wird auf Grundlage eines vereinfachenden Ansatzes angenommen, dass zwischen der Seitenkraft und der Zahnstangenkraft ein linearer Zusammenhang besteht. In diesem Fall bleiben alle nichtlinearen Effekte einer Radaufhängung und der Reifen für die Räder **6**, **8** unberücksichtigt.

[0090] Durch einen Doppelpfeil **42** ist in dem Diagramm aus Fig. 2 auch ein durch einen Grenzwert der Querbewegung definierter Gültigkeitsbereich für den Gefahrenindikator sowie für die Referenz-Zahnstangenkraft, die durch die Geraden **36**, **38** dargestellt sind, angegeben. Innerhalb des Gültigkeitsbereichs sind Steigungen der Geraden **36**, **38** positiv, wobei die Referenz-Zahnstangenkraft $F_{Zst, ref}$ bei dem Grenzwert der Querbewegung a_y bzw. Seitenkraft F_{Sv} ein Maximum erreicht. Oberhalb des Grenzwerts der Querbewegung zur Definition des Gültigkeitsbereichs für eine Querbewegung, wobei in dem hier gezeigten Beispiel der Grenzwert ca. $7,5 m/s^2$ beträgt, zeigt das Diagramm aus Fig. 2 eine vierte Gerade **44**, mit einer negativen Steigung a_{Sv} zum Darstellen einer Abhängigkeit der Referenz-Zahnstangenkraft $F_{Zst, ref}$ von der Querbewegung bzw. der Seitenkraft F_{Sv} außerhalb des Gültigkeitsbereichs.

[0091] Das Diagramm aus Fig. 3 zeigt ebenfalls einen kurvenförmigen Verlauf **50** von Messwerten der Zahnstangenkraft $F_{Zst, gem}$ bei feuchter Fahrbahn, wenn der Reibungsbeiwert μ kleiner als 1 ist. Diese Vorausset-

zung berücksichtigend, umfasst das Diagramm aus **Fig. 3** auch eine erste Gerade **52** für eine Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} mit positiver Steigung m_{akt} , eine zweite Gerade **54** für einen Grenzwert eines Gefahrenindikators GI und eine dritte Gerade **56** für einen konstruktiven Anteil der Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k}$ mit einer Steigung k_{Sv} . Dabei weist die Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} auch hier ein Maximum auf, das für einen Grenzwert der Querbeschleunigung bzw. der Seitenkraft F_{Sv} erreicht wird.

[0092] Eine vierte, hier gestrichelt angedeutete Gerade **58** mit einer Steigung a_{Sv} verdeutlicht einen Verlauf der gemessenen Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} bzw. Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} für Werte der Querbeschleunigung, die größer als der Grenzwert sind, wobei diese vierte Gerade **58** eine negative Steigung a_{Sv} aufweist. Eine in dem Diagramm aus **Fig. 3** zusätzlich angedeutete fünfte Gerade **60** ist parallel zu der vierten Geraden **58** angeordnet und weist demnach ebenfalls die Steigung a_{Sv} zum Beschreiben der Proportionalität zwischen Werten der gemessenen Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} und der Querbeschleunigung bzw. Seitenkraft F_{Sv} auf. Zum Bestimmen eines Reibungsbeiwerts μ wird diese vierte Gerade **58**, mit der die Abhängigkeit der gemessenen Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} bzw. Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} von der Querbeschleunigung bzw. Seitenkraft F_{Sv} oberhalb eines für die Querbeschleunigung bzw. Seitenkraft F_{Sv} vorgesehenen Grenzwerts beschrieben wird, parallel verschoben und mit der dritten Geraden **56** für den konstruktiven Anteil der Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k}$ geschnitten.

[0093] Im vorliegenden Fall schneidet die fünfte Gerade **60** mit der Steigung a_{Sv} die dritte Gerade **56** für den konstruktiven Anteil der Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k}$, die hier ebenfalls die Steigung k_{Sv} aufweist, in einem Betriebspunkt **62**, für den der Reibungsbeiwert hier bspw. $\mu = 0,45$ beträgt. Bei einer Projektion dieses Betriebspunkts **62** auf die Abszisse **30**, wie hier durch einen Pfeil **64** angedeutet, ist hier ein Wert für eine maximale Querbeschleunigung von ca. $4,5 \text{ m/s}^2$ in diesem Betriebspunkt **62** zu ermitteln. Eine Gerade **58, 60** beschreibt hier eine Proportionalität zwischen der Querbeschleunigung a_y bzw. der Seitenkraft F_{Sv} und der Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} , mit der bspw. die gemessene Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} abgeglichen werden kann, wobei $F_{Zst_ref} = a_{Sv} \cdot F_{Sv} + c$ mit einem entsprechenden Offset c gilt. Durch ein derartiges Verschieben dieser Geraden **58, 60** wird voranstehend genannte Gleichung der Geraden **58, 60** für die Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} für Werte der Seitenkraft F_{Sv} , die größer als der Grenzwert sind, mit der konstruktiven Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k} = k_{Sv} \cdot F_{Sv}$, die nachfolgend als Gleichung (G3) bezeichnet wird, gleichgesetzt und somit der Betriebspunkt **62** mit dem zu ermittelnden Reibungsbeiwert μ bestimmt.

[0094] Das Diagramm aus **Fig. 4** umfasst eine Abszisse **80**, entlang der die Zeit in Sekunden aufgetragen ist, sowie eine Ordinate **82**, entlang der eine Kraft in Newton aufgetragen ist. In dem Diagramm ist ein erster Verlauf **84** für eine bei Durchführung des Verfahrens aus der Seitenkraft F_{Sv} zu berechnende Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} aufgetragen. Diese Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} ist proportional zu einer Seitenkraft F_{Sv} , die während der Fahrt auf das Kraftfahrzeug **2** wirkt. Mögliche Verläufe dieser Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} sind anhand der Diagramme aus den **Fig. 2** und **Fig. 3** vorgestellt worden. Außerdem zeigt das Diagramm aus **Fig. 4** einen Verlauf **86** für die während der Fahrt durch Messung ermittelte aktuelle Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} .

[0095] Das Diagramm aus **Fig. 4** zeigt die Verläufe **84, 86** der berechneten und der gemessenen, aktuellen Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} bei einer Fahrt auf einer Landstraße als Fahrbahn. Die Verläufe **84, 86** decken sich hier sehr gut.

[0096] Das Diagramm aus **Fig. 5** umfasst eine Abszisse **100**, entlang der eine auf die Achse **4** des Kraftfahrzeugs **2** wirkende Seitenkraft F_{Sv} aufgetragen ist. Entlang einer Ordinate **102** des Diagramms aus **Fig. 5** ist eine Zahnstangenkraft F_{Zst} aufgetragen. Weiterhin umfasst das Diagramm aus **Fig. 5** drei unterschiedliche Verläufe **104, 106, 108** für eine gemessene Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} bei unterschiedlicher Bereifung der Räder **6, 8** sowie unterschiedlicher Konfiguration eines Fahrwerks des Kraftfahrzeugs **2**. Dabei ergibt sich der erste Verlauf **104** für Winterreifen (WR) mit einer komfortorientierten Modifikation des Fahrwerks. Bezüglich dieses ersten Verlaufs **104** zeigt **Fig. 5** zusätzlich eine erste Gerade **110** zur Darstellung einer Steigung der Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} in Abhängigkeit der Seitenkraft F_{Sv} . Der zweite Verlauf **106** ergibt sich bei Sommerreifen (SR) und komfortorientierter Modifikation des Fahrwerks, wobei diesbezüglich in dem Diagramm aus **Fig. 5** auch eine aus diesem zweiten Verlauf **106** abgeleitete Steigung einer zweiten Geraden **112** dargestellt ist. Der dritte Verlauf **108** ergibt sich bei Nutzung von Sommerreifen und fahrdynamikorientierter Modifikation des Fahrwerks. Aus jeweils einem Wert der gemessenen Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} wird unter Berücksichtigung mindestens eines Korrekturfaktors F_{Zst_korr} eine aktuelle Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} ermittelt.

[0097] Zusätzlich ist in **Fig. 5** durch eine Ellipse **114** ein Bereich zum Anlernen von Steigungen der beiden Geraden **110, 112** angedeutet. Bei der ersten Ausführungsform des Verfahrens wird eine Steigung m_{akt} zur Darstellung der Proportionalität zwischen der Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} und der Seitenkraft F_{Sv} bei

geringen Seitenkräften F_{Sv} erfasst und über Ausgleichsverfahren berechnet. Ein dabei ermittelter Wert einer jeweiligen Steigung m_{akt} wird bei Durchführung der ersten Ausführungsform des Verfahrens auch für höhere Seitenkräfte F_{Sv} extrapoliert.

[0098] Mit der vorliegenden ersten Ausführungsform des Verfahrens ist u. a. eine Schätzung eines Reibungsbeiwerts μ der Reifen des Kraftfahrzeugs **2** über eine Veränderung eines Rückstellmoments der Reifen möglich, wobei ein Zusammenhang zwischen der Zahnstangenkraft F_{Zst} und somit der Kraft der Zahnstange **12** der Lenkanlage **10** des Kraftfahrzeugs **2** und einer Seitenkraft F_{Sv} bzw. Querbeschleunigung des Kraftfahrzeugs **2** genutzt wird.

[0099] Hierbei wird für kleine Querbeschleunigungen ein, wie oben bereits ausgeführt, vereinfachender, linearer Ansatz bzw. Zusammenhang zwischen der Seitenkraft F_{Sv} bzw. F_{Sv_akt} und der Zahnstangenkraft F_{Zst} bzw. F_{Zst_akt} verwendet, wobei eine ermittelbare Funktion durch die Gerade mit der Steigung m_{akt} beschrieben werden kann. Diese Gerade wird üblicherweise bei einer Durchführung des Verfahrens gelernt, bspw. neu angelernt, und demnach aktualisiert. Mit der über die Gerade zu beschreibenden Funktion können Betriebsparameter des Kraftfahrzeugs **2**, die sich durch neue Reifen, eine Änderung der Spur des Kraftfahrzeugs **2** oder sonstige Einflüsse ergeben können, erfasst werden.

[0100] Bei Durchführung des Verfahrens wird gemäß Gleichung (G1) die Seitenkraft F_{Sv} des Kraftfahrzeugs **2** berechnet. Alternativ kann statt der Seitenkraft F_{Sv} eine Querbeschleunigung a_y des Kraftfahrzeugs gemessen und direkt genutzt werden, allerdings ist die Querbeschleunigung a_y bei dynamischen Manövern des Kraftfahrzeugs **2** ungenauer.

$$F_{Sv} = \frac{m * l_h * a_y + \Theta_z * \ddot{\psi}}{\cos \delta_{VA} * l} \quad (G1)$$

[0101] Gleichung (G1) umfasst die Masse m des Kraftfahrzeugs sowie einen Abstand l_h eines Schwerpunkts des Kraftfahrzeugs zu dessen Hinterachse in Längsrichtung des Kraftfahrzeugs, die Querbeschleunigung a_y des Kraftfahrzeugs **2** in y-Richtung und somit quer zu einer Fahrtrichtung in x-Richtung des Kraftfahrzeugs **2**, eine Massenträgheit Θ_z des Kraftfahrzeugs **2** in z-Richtung und somit parallel zu einer Hochachse des Kraftfahrzeugs **2** sowie senkrecht zur x-Richtung und zur y-Richtung, eine Giergeschwindigkeit $d^2\psi/dt^2$ bzw. $\ddot{\psi}$, einen Lenkwinkel δ_{VA} an der Achse des Kraftfahrzeugs **2** und einem Radstand l des Kraftfahrzeugs.

[0102] Zum Bestimmen einer aktuellen Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} kann in Ausgestaltung eine aktuell gemessene Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} zumindest über die Massenträgheit Θ_{Rad} des Rads und eine Beschleunigung $d^2\delta/dt^2$ des Lenkwinkels bzw. eines Einschlagwinkels eines Rads **6, 8** korrigiert werden. In weiterer Ausgestaltung kann die gemessene Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} bei Bedarf ergänzend durch Anteile von Kreiselkräften korrigiert werden, mit denen eine Sturzänderung bezogen auf die Lenkwinkeländerung c_γ , die Massenträgheit Θ_{Rad} , eine Geschwindigkeit des $d\delta/dt$ Lenkwinkels, eine Drehzahl n_{Rad} und dem wirksamen Spurhebel h_w berücksichtigt wird. Unter Berücksichtigung sämtlicher Korrekturfaktoren ergibt sich für die aktuelle Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} Gleichung (G2):

$$F_{Zst_akt} \approx F_{Zst_gem} - J_{rad} * \ddot{\delta} + \frac{c_\gamma * \Theta_{Rad} * \dot{\delta} * n_{Rad} * (\pi)^2}{h_w} \quad (G2)$$

[0103] Die konstruktive Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k}$ wird, wie Gleichung (G3) zeigt, aus einer Achskinematik berechnet und ist proportional zu der Seitenkraft F_{Sv} , wobei k_{Sv} eine Steigung und somit ein Verhältnis der konstruktiven Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k}$ zu der Seitenkraft F_{Sv} beschreibt. Hierzu wird auf die Geraden **40, 56** aus den **Fig. 2** und **Fig. 3** verwiesen, wobei statt der Seitenkraft F_{Sv} eine dazu proportionale Querbeschleunigung berücksichtigt wird. Die konstruktive Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k}$ ist auch dann vorhanden, wenn sich Reifen im vollen Gleitschlupf befinden und somit die dynamische Zahnstangenkraft null ist:

$$F_{Zst_akt_k} = k_{Sv} * F_{Sv} \quad (G3)$$

[0104] Aus der Seitenkraft F_{Sv} oder Querbeschleunigung a_y wird über Gleichung (G4) eine Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} berechnet, die eine Gerade beschreibt. Die Steigung m_{akt} der Gerade variiert über den Reifendruck und die Temperatur, wobei hierfür Korrekturfaktoren angegeben werden können. Ein Parameter

b, welcher gemäß der Gleichung (G4) auch angelernt werden kann, beschreibt einen Offset bzw. Mindestwert, den die Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} auch dann aufweist, wenn die Seitenkraft F_{Sv} null ist:

$$F_{Zst_ref} = m_{akt} \cdot F_{Sv} + b \quad (G4)$$

[0105] Weiterhin wird gemäß der Gleichungen (G5.1) und (G5.2) zunächst jeweils der Mittelwert aller ermittelten Zahnstangenkräfte und aller ermittelten Seitenkräfte gebildet:

$$F_{Zst_akt_mittel} = \sum_{t=1}^N \frac{F_{Zst_akt}(t)}{N} \quad (G5.1)$$

$$F_{Sv_akt_mittel} = \sum_{t=1}^N \frac{F_{Sv_akt}(t)}{N} \quad (G5.2)$$

[0106] In einem nachfolgenden Schritt werden gemäß der Gleichung (G6.1) die Abweichungen aller ermittelten, zeitabhängigen Werte der Zahnstangenkraft von dem Mittelwert der Zahnstangenkraft gebildet:

$$\Delta F_{Zst_akt}(t) = F_{Zst_akt}(t) - F_{Zst_akt_mittel} \quad (G6.1)$$

[0107] Entsprechend werden gemäß der Gleichung (G6.2) die Abweichungen aller ermittelten, zeitabhängigen Werte der Seitenkraftkraft von dem Mittelwert der Seitenkraft gebildet:

$$\Delta F_{Sv_akt}(t) = F_{Sv_akt}(t) - F_{Sv_akt_mittel} \quad (G6.2)$$

[0108] Mit diesen Werten wird die Steigung m_{akt} einer Ausgleichsgeraden laut Gleichung (G7) ermittelt:

$$m_{akt} = \frac{\sum_{t=1}^T \Delta F_{Sv_akt}(t) * \Delta F_{Zst_akt}(t)}{\sum_{t=1}^T \Delta F_{Sv_akt}(t)^2} \quad (G7)$$

[0109] Danach wird in einem weiteren Schritt ein Wert für den Offset b bestimmt, für den Gleichung (G8) gilt:

$$b = F_{Zst_akt_mittel} - m_{akt} \cdot F_{Sv_akt_mittel} \quad (G8)$$

[0110] Beispiele für die Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} sind anhand der Geraden **110**, **112** mit einer jeweiligen Steigung m_{akt} dargestellt. Mit dieser Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} wird eine gemessene Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} oder eine daraus abgeleitete, aktuelle Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} abgeglichen.

[0111] Die maximal mögliche Seitenkraft F_{Sv_max} wird über Gleichung (G9) berechnet. Hierbei wird angenommen, dass diese erreicht wird, wenn die aktuelle Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} den Wert der konstruktiven Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k}$ aufweist. Unter dieser Annahme ergibt sich für Gleichung (G9):

$$F_{Sv_max} = \left| \frac{F_{Zst_akt} - a_{Sv} * F_{Sv_akt}}{k_{Sv} - a_{Sv}} \right| \quad (G9)$$

[0112] Hier ist eine weitere Steigung a_{Sv} zu berücksichtigen, wie sie bspw. die Geraden **44**, **58**, **60** aus den **Fig. 2** und **Fig. 3** aufweisen. Wie anhand der voranstehenden Beschreibung zu den **Fig. 2** und **Fig. 3** angeführt, sind diese Geraden **44**, **58**, **60** in Ausgestaltung durch F_{Zst_ref} bzw. $F_{Zst_akt} = a_{Sv} \cdot F_{Sv} + c$ darzustellen, wobei c einem weiteren Offset entspricht. Dabei beschreibt die Steigung a_{Sv} eine Proportionalität zwischen der Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} und der Seitenkraft F_{Sv} für Werte der Seitenkraft F_{Sv} , die größer als ein hierfür vorgesehener Grenzwert sind, bei dem die Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} einen maximalen Wert erreicht.

[0113] Über Gleichung (G10) wird ein Gefahrenindikator GI berechnet, der dazu genutzt wird, um bei geringen Abweichungen der gemessenen, aktuellen Zahnstangenkraft F_{Sv_akt} zur Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} keine Fehlwarnung zu generieren.

$$GI = \left(\frac{F_{Zst_akt} - F_{Zst_akt_k}}{F_{Zst_ref} - F_{Zst_akt_k}} \right) \quad (G10)$$

[0114] Wenn der Gefahrenindikator GI unter einen hierfür vorgesehenen Grenzwert fällt, der je nach Messgenauigkeit ca. 0.8 beträgt, wird eine Schätzung für einen Reibungsbeiwert μ durchgeführt, der über Gleichung (G11) berechnet wird:

$$\mu = \left(\frac{F_{Sv_max}}{F_{Nv}} \right) \quad (G11)$$

[0115] Hier beschreibt F_{Nv} eine auf die Räder **6, 8** der Achse **4** wirkende Normalkraft.

[0116] Wird das Kraftfahrzeug ohne neues Anlernen der Steigung m_{akt} von Sommerreifen (SR) auf Winterreifen (WR) umgestellt, wird permanent eine Fehlwarnung bereitgestellt, wenn der Gefahrenindikator GI geringer als der Grenzwert ist. Dies kann vermieden werden, wenn für den innerhalb der Ellipse **114** angeordneten Bereich in **Fig. 5** eine neue Steigung m_{akt} angelernt wird. Hierbei wird Gleichung (G10) verwendet.

[0117] Mit Gleichung (G10) kann z. B. im Bereich einer Querbeschleunigung von 0,5 bis 2 m/s² oder einer entsprechenden Seitenkraft F_{Sv} eine neue Steigung m_{akt} für die Gerade gelernt werden.

[0118] Ein Lernen und/oder Anpassen wird im Rahmen des Verfahrens durchgeführt, wobei die Steigung m_{akt} über mehrere Kurvenfahrten gemittelt wird, ohne dass der Fahrer des Kraftfahrzeugs **2** davon etwas mitbekommt. Hierbei wird vereinfachend berücksichtigt, dass sich die Steigungen m_{akt} der Geraden in einem Bereich des Reibungsbeiwerts μ von 0,5 bis 1,2 kaum unterscheiden. Somit ist Kenntnis über einen genauen Zustand der Fahrbahn nicht erforderlich.

[0119] In **Fig. 5** ist zu sehen, dass die Geraden **110, 112** für unterschiedliche Reifen-Konfigurationen des Fahrwerks unterschiedliche Steigungen m_{akt} aufweisen.

[0120] Für Links- und Rechtskurven können die Steigung m_{akt} und der Offset b getrennt ermittelt werden. Wenn sich hierbei unterschiedliche Werte bei Links- und Rechtskurven ergeben, kann daraus auf unterschiedliche Einstellungen von Radführungsgrößen, wie z. B. Spur und Sturz, auf unterschiedliche Reifenzustände, wie z. B. Typ, Profiltiefe und Druck eines Reifens auf einer linken und einer rechten Seite des Kraftfahrzeugs sowie einseitige Beladungszustände als Betriebsparameter des Kraftfahrzeugs geschlossen werden.

[0121] Damit werden in Ausgestaltung neue Vorgehensweisen zur Ermittlung für diese Betriebsparameter bzw. Größen des Kraftfahrzeugs generiert.

[0122] Bei der voranstehend vorgestellten ersten Ausführungsform des Verfahrens wird von Vereinfachungen ausgegangen, wobei berücksichtigt wird, dass für sämtliche Betriebsparameter Signale, über die diese dem Steuergerät **16** bereitgestellt werden, vorliegen.

[0123] Allerdings ist es möglich, dass dem Steuergerät **16** nicht sämtliche beschriebenen Betriebsparameter zur Verfügung stehen. So ist denkbar, dass neben der in der Regel abzuschätzenden Zahnstangenkraft nur ein jeweils eingeschlagener Lenkwinkel mindestens eines Rads **6, 8** und eine Längsgeschwindigkeit des Kraftfahrzeugs verfügbar sind, wohingegen Signale für die Querbeschleunigung und die Gierrate nicht vorliegen.

[0124] Das bereits anhand von **Fig. 1** vorgestellte Steuergerät **16** als Komponente des erfindungsgemäßen Systems ist zur Durchführung der voranstehend beschriebenen ersten Ausführungsform des Verfahrens aber auch zur Durchführung der nachfolgend beschriebenen zweiten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens vorgesehen. Ein mögliches Beispiel für ein derartiges Steuergerät **16a**, das hier als EPS-Steuergerät ausgebildet ist, ist in **Fig. 6** schematisch dargestellt. Dabei umfasst dieses Steuergerät **16a** ein Modul **120**, das zum Schätzen eines Reibungsbeiwerts μ zwischen Reifen und einer befahrenen Fahrbahn unter Berücksichtigung eines Simulationsmodells ausgebildet und in **Fig. 6** als Blockschaltbild dargestellt ist. In der schematischen Darstellung aus **Fig. 6** umfasst dieses Modul **120** mehrere Teilmodule **122, 124, 126, 128, 130** die zum Bestimmen und/oder Verarbeiten einzelner Betriebsparameter mit dem Simulationsmodell, die bei zumindest einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt werden, ausgebildet sind.

[0125] Dabei ist ein erstes Teilmodul **122** zum Berechnen und/oder Bestimmen einer Gierrate $d\psi/dt$ ausgebildet, wobei diese Gierrate $d\psi/dt$ als Funktion f , die von einer Geschwindigkeit v , einem Lenkwinkel δ sowie einem Faktor K_1 abhängig ist, zu berechnen ist. Dabei werden Werte für die Geschwindigkeit v und den Lenkwinkel δ dem Steuergerät **16a** über Signale von mindestens einem Sensor bereitgestellt. Ein Kennfeld für den Faktor K_1 ist in dem ersten Teilmodul **122** abgelegt. Ein zweites Teilmodul **124** ist zum Bestimmen einer Querbeschleunigung a_y des Kraftfahrzeugs **2** ausgebildet, wobei diese Querbeschleunigung a_y als Funktion der Geschwindigkeit v , deren Werte dem Steuergerät **16a** von dem mindestens einen Sensor bereitgestellt werden, sowie von berechneten und/oder bestimmten Werten der Gierrate $d\psi/dt$, die von dem ersten Teilmodul **122** bereitgestellt werden, darstellbar ist.

[0126] Ein drittes Teilmodul **126** ist zum Bestimmen von Sollwerten einer Seitenkraft F_{Sv} bzw. von Werten einer Soll-Seitenkraft F_{Sv_soll} , die auf das Kraftfahrzeug **2** wirkt, ausgebildet. Dabei sind die Werte für die Soll-Seitenkraft F_{Sv_soll} als Funktion des Lenkwinkels δ und der Querbeschleunigung a_y darzustellen. Werte für eine Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} sind mit einem vierten Teilmodul **128** zu berechnen. Hierbei ist die Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} als Funktion der Soll-Seitenkraft F_{Sv_soll} und eines zweiten Faktors K_2 darstellbar. Werte für die Soll-Seitenkraft F_{Sv_soll} werden dem vierten Teilmodul **128** von dem dritten Teilmodul **126** bereitgestellt. Werte für den Faktor K_2 sind in einem weiteren Kennfeld, das dem vierten Teilmodul **128** zugeordnet ist, abgelegt.

[0127] Werte für den Reibungsbeiwert μ werden mit dem dritten Teilmodul **130** ermittelt. Dabei ist der Reibungsbeiwert μ als Funktion der Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} , der gemessenen Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} sowie einer Abfrage A darstellbar. Zum Berechnen des Reibungsbeiwerts μ werden dem fünften Teilmodul **130** Werte für die Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} von dem vierten Teilmodul **128** bereitgestellt. Werte für die gemessene Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} werden von dem mindestens einen Sensor erfasst und dem Steuergerät **16a** bereitgestellt. Die Abfrage A ist als Funktion der Geschwindigkeit v , üblicherweise der Längsgeschwindigkeit, des Lenkradwinkels und/oder Lenkwinkels δ , der Gierrate $d\psi/dt$ sowie der Querbeschleunigung a_y darstellbar.

[0128] Bei der zweiten Ausführungsform des Verfahrens wird ein Satz von Betriebsparametern zur Berechnung des Reibungsbeiwerts μ verwendet. Dabei gilt für eine Funktion zum Beschreiben des Reibungsbeiwerts μ entweder $\mu = f(a_y, d\psi/dt, v, F_{Zst})$ oder $\mu = f(a_y, d\psi/dt, v, M_{rück})$. Hierbei ist neben den bereits beschriebenen Betriebsparametern $M_{rück}$ ein Rückstellmoment zu berücksichtigen. Der vorgesehene Satz und somit eine entsprechende Funktion zur Berechnung des Reibungsbeiwerts μ wird weiterhin auf $\mu = f(\delta, v, F_{Zst})$ reduziert.

[0129] Die beiden jeweils in **Fig. 7** sowie in **Fig. 8** dargestellten Diagramme umfassen jeweils eine Abszisse **132**, entlang der die Zeit t in Sekunden aufgetragen ist. Entlang einer Ordinate **134** eines ersten der beiden Diagramme sind Werte für eine Kraft aufgetragen. Entlang einer Ordinate **136** eines zweiten der beiden Diagramme sind Werte für einen Reibungsbeiwert μ aufgetragen.

[0130] In dem ersten Diagramm aus **Fig. 7** zeigt eine erste Kurve **138** einen zeitlichen Verlauf von Werten einer gemessenen Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} und eine zweite Kurve **140** einen Verlauf einer Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} . Eine Differenz zwischen den gemessenen Werten der Zahnstangenkraft und der als Referenzwerte vorgesehenen Werte der Zahnstangenkraft $\Delta F = F_{Zst_ref} - F_{Zst_gem}$ ist anhand einer dritten Kurve **142** in dem ersten Diagramm aus **Fig. 7** dargestellt. Ein zweites Diagramm aus **Fig. 7** zeigt eine Kurve **144** für einen konstanten Verlauf eines hohen, maximalen Reibungsbeiwerts $\mu = 1$, der hier auch als Hochreibungsbeiwert bezeichnet wird.

[0131] Die gemessene Zahnstangenkraft und die Referenz-Zahnstangenkraft sind näherungsweise gleich groß. Es wird kein Niederreibungsbeiwert detektiert.

[0132] Das erste Diagramm aus **Fig. 8** umfasst eine erste Kurve **146** für einen zeitlichen Verlauf von Werten einer gemessenen Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} und eine zweite Kurve **148** für einen Verlauf einer Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} . Eine Differenz zwischen den gemessenen Werten der Zahnstangenkraft und der als Referenzwerte vorgesehenen Werte der Zahnstangenkraft $\Delta F = F_{Zst_ref} - F_{Zst_gem}$ ist in dem ersten Diagramm aus **Fig. 8** anhand einer dritten Kurve **150** dargestellt. Ein zweites Diagramm aus **Fig. 8** umfasst eine Kurve **152** für einen Verlauf eines Reibungsbeiwerts μ . In Bereichen mit Peaks, in denen die Referenz-Zahnstangenkraft wesentlich größer als der gemessene Wert der Zahnstangenkraft ist, wird ein verringerter Reibungsbeiwert $\mu = 0$ detektiert. In den Bereichen zwischen den Peaks wird kein Niederreibungsbeiwert, sondern ein Hochreibungsbeiwert bzw. maximaler Reibungsbeiwert $\mu = 1$ erkannt, da die Abfragen bezüglich eines minimalen Lenkwinkels die Ausgabe unterbinden. Eine damit verbundene Fehldiagnose zu einem nicht erkannten, nied-

rigen Reibungsbeiwert ist ohne Bedeutung, da ein derartiger niedriger Reibungsbeiwert weder in Situationen mit sehr geringen Geschwindigkeiten, noch bei sehr geringen Lenkwinkeln benötigt wird.

[0133] Die Kurven **138, 140, 142, 144** in den Diagrammen aus **Fig. 7** ergeben sich auf Grundlage von Betriebsparametern einer ersten Messung, wohingegen sich die Kurven **146, 148, 150, 152** der Diagramme aus **Fig. 8** aus einer zweiten Messung ergeben. Anhand der Diagramme ist eine Wirkungsweise des Verfahrens zu erläutern.

[0134] Bei der zweiten Ausführungsform des Verfahrens wird innerhalb des Steuergeräts **16a**, das als EPS-Lenkungs-Steuergerät ausgebildet ist, ein Referenzwert für die Zahnstangenkraft ausschließlich aus dem Lenkwinkel und der Geschwindigkeit bestimmt. Mit einem hierbei verwendeten Algorithmus wird ein Referenzwert für die Zahnstangenkraft, der für eine Fahrbahn mit hohem Reibungsbeiwert zu ermitteln ist, mit einem Wert der aktuell gemessenen Zahnstangenkraft verglichen, wobei der Reibungsbeiwert unter Berücksichtigung eines aktuellen Fahrzustands des Kraftfahrzeugs abgeschätzt wird.

[0135] Dabei wird berücksichtigt, dass sowohl die Zahnstangenkraft, als auch die Seitenkraft an den Rädern mit zunehmender Querbeschleunigung in unkritischen Fahrzuständen steigen. Außerdem sind auf einer Fahrbahn mit hohem bzw. maximalem Reibungsbeiwert (**Fig. 7**) Beträge der zu berücksichtigenden Kräfte bzw. Beschleunigungen, d. h. zumindest der Zahnstangenkraft und der Querbeschleunigung, größer als auf einer Fahrbahn mit niedrigem bzw. minimalem Reibungsbeiwert (**Fig. 8**). Zur Bestimmung des Reibungsbeiwerts wird zunächst aus einer theoretisch ermittelten Seitenkraft mit Hilfe einer Korrekturfunktion ein Referenzwert für die Zahnstangenkraft gebildet. Die Korrekturfunktion wird mit Hilfe von Referenzmessungen auf Fahrbahnen mit hohem Reibungsbeiwert bestimmt und gleicht einen Sollwert für die Seitenkraft an den gemessenen Wert der Zahnstangenkraft an. Der dabei bestimmte Referenzwert der Zahnstangenkraft wird mit der aktuell gemessenen Zahnstangenkraft verglichen. Wenn ein Betrag des Werts der aktuellen Zahnstangenkraft wesentlich niedriger als ein Betrag eines theoretisch ermittelten Referenzwerts der Zahnstangenkraft ist, wird auf eine Verringerung des Reibungsbeiwerts geschlossen. Eine damit verbundene Erkennung eines Niedrigreibungsbeiwerts wird somit auf die Differenz zwischen dem aktuellen Wert und dem Referenzwert der Zahnstangenkraft zurückgeführt. Eine andere Möglichkeit besteht darin, ein Verhältnis des aktuellen Werts und dem Referenzwert zueinander und/oder eine prozentuale Abweichung des aktuellen Werts von dem Referenzwert zu betrachten.

[0136] Die Ermittlung des theoretischen Referenzwerts für die Zahnstangenkraft wird mit Hilfe eines Simulationsmodells, bspw. eines Einspurmodells, ausschließlich auf Grundlage lenkungsinterner Signale für Betriebsparameter, d. h. für die Geschwindigkeit, den Lenkwinkel und die Geometrie des Kraftfahrzeugs, durchgeführt. Für hierbei zu berücksichtigende Werte der Querbeschleunigung und der Gierrate als weitere Betriebsparameter werden in diesem Fall keine eingehenden Signale benötigt, da Werte für diese Betriebsparameter innerhalb des anhand von **Fig. 6** vorgestellten Simulationsmodells approximiert werden. Folglich ist das Simulationsmodell, das über die Teilmodule **122, 124, 126, 128, 130** aus **Fig. 6** umzusetzen ist, zum Abschätzen des Reibungsbeiwerts einfach zu realisieren, da hierfür nur geringe Rechenkapazitäten innerhalb des Steuergeräts **16a** erforderlich sind.

[0137] Aufgrund des Umstands, dass nur für zwei Betriebsparameter, hier für die Geschwindigkeit v und den Lenkwinkel δ , eingehende Signale zur Verfügung stehen, können für das Simulationsmodell einige vereinfachende Annahmen getroffen werden. So wird eine näherungsweise Berechnung der Gierrate zunächst unter der Annahme, dass eine Schräglaufwinkeldifferenz zwischen der Vorderachse und der Hinterachse Null ist, durchgeführt. Ein Einfluss der Schräglaufwinkeldifferenz wird anschließend über eine weitere Korrekturfunktion, die analog zu jener Referenz-Zahnstangenkraft zu verwenden ist, berücksichtigt. Darüber hinaus werden ein Einfluss der Achlastverschiebung aufgrund einer Längsbeschleunigung des Kraftfahrzeugs sowie ein Einfluss einer Massenträgheit und/oder Gierbeschleunigung um die Hochachse des Kraftfahrzeugs auf die Referenz-Zahnstangenkraft vernachlässigt, zumal die hierfür benötigten Signale ebenfalls nicht verfügbar sind. Die Einflüsse sind näherungsweise in der Korrekturfunktion enthalten. Auf Grundlage dessen wird in Ausgestaltung des Verfahrens ein genäherter und/oder verringerter Reibungsbeiwert, der nur von wenigen weiteren Betriebsparametern abhängig ist, identifiziert.

[0138] In kritischen Fahrzuständen, wie zum Beispiel bei einem Über- oder Untersteuern, verringert sich ein Verlauf der Zahnstangenkraft über der Querbeschleunigung ebenfalls, sobald das Kraftfahrzeug zu rutschen beginnt. Um für diesen Fall eine Fehldiagnose des Simulationsmodells auf einen verringerten Reibungsbeiwert zu vermeiden, werden in das Simulationsmodell diverse Abfragen integriert. So wird berücksichtigt, dass eine Ausgabe eines verringerten Reibungsbeiwerts nur dann zulässig ist, wenn sich das Kraftfahrzeug in einem

bestimmten Fahrzustand befindet. Der Reibungsbeiwert ist bspw. von der Geschwindigkeit, dem Lenkwinkel, der geschätzten Querbesehleunigung und der geschätzten Gierrate abhängig. Durch eine geeignete Wahl der besagten Betriebsparameter kann die Vermeidung von Fehldiagnosen gewährleistet werden.

[0139] Das in **Fig. 9** dargestellte Flussdiagramm zur Durchführung der dritten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens umfasst mehrere Schritte **601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615**.

[0140] Dabei ist in einem ersten Schritt **601** ein Start dieser Ausführungsform des Verfahrens durchführbar. Ausgehend hiervon werden in einem zweiten Schritt **602** Werte für Betriebsparameter, nämlich für eine Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugs in x-Richtung v_x , eine Querbesehleunigung des Kraftfahrzeugs a_y , eine Gierrate des Kraftfahrzeugs $d\psi/dt$, einen Lenkradwinkel δ_H und eine Zahnstangenkraft F_{Zst} erfasst. Dabei ist es möglich, in einem dritten Schritt **603** Werte für Betriebsparameter des Kraftfahrzeugs aus einem Speicher des Steuergeräts **16, 16a** auszulesen. Auf Grundlage der im zweiten Schritt **602** erfassten Werte der Betriebsparameter werden in einem vierten Schritt **604** als weitere Betriebsparameter sogenannte Primärgrößen für Federwege f , Nickwinkel θ , Wankwinkel φ , Antriebs- bzw. Bremskräfte F_L , den Lenkwinkel δ_{VA} der Vorderachse und Radlasten F_N berechnet.

[0141] Darauf basierend werden in einem fünften Schritt **605** Werte eines wirksamen, kraftschlussabhängigen Rückstellmoments der Reifen des Kraftfahrzeugs berechnet. In einem sechsten Schritt **606** wird eine wirksame Seitenkraft an der Vorderachse des Kraftfahrzeugs berechnet. In einem siebten Schritt **607** werden Werte bzw. Parameter, die bei einer Auswertung der Zahnstangenkraft ermittelt werden, angepasst. In einem achten Schritt **608** wird eine wirksame Nachlaufstrecke der Reifen berechnet. Außerdem wird in einem neunten Schritt **609** eine Nachlaufstrecke berechnet, die sich theoretisch auf einer Strecke bzw. Fahrbahn mit einem hohen Reibungsbeiwert μ bzw. einem Hochreibungsbeiwert ergeben würde.

[0142] In einem zehnten Schritt **610** ist ein Ausschlusskriterium zu prüfen. Falls eine Prüfung dieses Ausschlusskriteriums positiv ausfällt (ja) ergibt sich in einem vierzehnten Schritt **614**, dass keine neue zuverlässige Abschätzung des Kraftschlusses und somit des Reibungsbeiwerts zwischen den Reifen und der befahrenen Fahrbahn möglich ist. Falls jedoch dieses Ausschlusskriterium im zehnten Schritt **610** verneint (nein) wird, wird in einem nachfolgenden elften Schritt **611** ein Wert der Querbesehleunigung a_y mit mindestens einem Grenzwert verglichen. Alternativ kann statt der Querbesehleunigung auch die bei dieser Querbesehleunigung bei stationärer Kurvenfahrt wirkende Seitenkraft als Kriterium betrachtet werden. Falls der Wert der Querbesehleunigung a_y z. B. größer als $0,5 \text{ m/s}^2$ oder kleiner als 1 m/s^2 ist, wird das Verfahren bei dem siebten Schritt **607** fortgeführt, wobei die Betriebsparameter zur Auswertung der Zahnstangenkraft erneut angepasst werden. Falls jedoch die Querbesehleunigung a_y z. B. größer oder gleich 1 m/s^2 ist, wird im zwölften Schritt **612** ein Vergleich einer theoretischen Nachlaufstrecke $n_{R,theo}$ mit Werten einer wirksamen Nachlaufstrecke $n_{R,wirk}$ durchgeführt. Falls sich in diesem zwölften Schritt **612** ergibt, dass Werte der theoretischen Nachlaufstrecke $n_{R,theo}$ kleiner als Werte der wirksamen Nachlaufstrecke $n_{R,wirk}$ sind, wird das Verfahren ebenfalls auf den siebten Schritt **607** zurückgesetzt. Falls jedoch die Werte für die theoretischen Nachlaufstrecke $n_{R,theo}$ und die wirksame Nachlaufstrecke $n_{R,wirk}$ ungefähr gleich sind, ergibt sich in einem dreizehnten Schritt **613**, dass die Querbesehleunigung a_y aktuell zu gering ist, worauf abschließend der vierzehnte Schritt **614** durchgeführt wird. Falls sich im Rahmen des Vergleichs im zwölften Schritt **612** jedoch ergibt, dass Werte der theoretischen Nachlaufstrecke $n_{R,theo}$ größer als jene der wirksamen Nachlaufstrecke $n_{R,wirk}$ sind, wird in einem abschließenden fünfzehnten Schritt **615** ein maximal nutzbarer Kraftschluss und somit der Reibungsbeiwert abgeschätzt.

[0143] Die Darstellung in **Fig. 10** basiert auf **Fig. 1** und zeigt, wie ein manueller bzw. händischer Lenkwinkel δ_H , um den das Lenkrad **13** manuell gedreht wird, mit einem Lenkwinkel δ_l des ersten, linken Rads **6** sowie einem Lenkwinkel δ_r des zweiten, rechten Rads zusammenhängt. Im Rahmen des Verfahrens wird als Betriebsparameter ein Lenkwinkel δ berücksichtigt, der üblicherweise von mindestens einem Lenkwinkel δ_l und/oder δ_r eines der beiden Räder **6, 8** abhängig ist. Demnach ist es möglich, dass der Lenkwinkel δ bspw. einem Mittelwert δ_{VA} der Lenkwinkel δ_l, δ_r beider Räder **6, 8** entspricht, da diese radindividuellen Lenkwinkel δ_l, δ_r voneinander abweichen können. Es ist jedoch auch möglich, im Rahmen des Verfahrens als Lenkwinkel den größeren oder den kleineren der beiden radindividuellen Lenkwinkel δ_l, δ_r zu berücksichtigen.

[0144] Das Diagramm aus **Fig. 11** zeigt einen vektoriellen und/oder trigonometrischen Zusammenhang einzelner Betriebsparameter, die bei einer Fahrt des Kraftfahrzeugs dessen Räder **7a, 7b** beeinflussen, wobei in **Fig. 11** diesbezüglich ohne Beschränkung der Allgemeinheit ein Ein-Spur-Modell des Kraftfahrzeugs betrachtet wird, wobei die Räder jeweils einer Achse auf ein in der Mitte des Kraftfahrzeugs angeordnetes Rad **7a, 7b** reduziert werden. Der Lenkwinkel δ_{VA} des vorderen Rads **7a** entspricht dem Mittelwert der Lenkwinkel der beiden

Räder **6**, **8** an der vorderen Achse **4** aus **Fig. 1**. Ein Schwimmwinkel β gibt den Winkel zwischen der Geschwindigkeit eines Schwerpunkts **9** des Kraftfahrzeugs und einer Mittelebene des Kraftfahrzeugs an. Dabei wirkt auf das vordere Rad **7a**, das die Räder **6**, **8** im Modell ersetzt, eine vordere Seitenkraft F_{Sv} . Auf den Schwerpunkt **9** des Kraftfahrzeugs wirkt eine Querbesehleunigung a_x in Längsrichtung sowie eine Querbesehleunigung a_y in Querrichtung. Das hintere Rad **7b**, das im Modell die Räder an einer hinteren Achse ersetzt, weist von dem Schwerpunkt **9** einen Abstand l_h auf. Außerdem wirkt auf das hintere Rad **7b** eine hintere Seitenkraft F_{Sh} .

[0145] Details zur Berechnung des wirksamen kraftschlussabhängigen Rückstellmoments gemäß dem fünften Schritt **605** aus **Fig. 9** sind in dem Flussdiagramm aus **Fig. 12** gezeigt. Dieses umfasst einen ersten Schritt **200**, bei dem eine Aufteilung der Rückstellmomente in einen kraftschlussabhängigen Anteil und sonstige Anteile, bspw. ein linkes Rückstellmoment M_{konl} und ein rechtes Rückstellmoment M_{konr} , vorgenommen wird. In einem zweiten Schritt **202** wird ein auf die Räder links und rechts wirksamer Spurhebel h_{wl} , h_{wr} als Funktion des Lenkradwinkels δ_H bestimmt. In einem dritten Schritt **204** wird ein Verhältnis der kraftschlussabhängigen Rückstellmomente der Reifen M_{ru}/M_{rr} als Funktion der Querbesehleunigung bestimmt. In einem vierten Schritt **206** werden Anteile der Zahnstangenkraft F_{Zst_kon} , die durch Anteile der Rückstellmomente M_{konl} , M_{konr} verursacht werden, bestimmt. In einem fünften Schritt **208** werden Werte der wirksamen Zahnstangenkraft F_{Zst} bereitgestellt. In einem sechsten Schritt werden Werte für die Querbesehleunigung a_y und in einem siebten Schritt **212** Werte für den Lenkradwinkel δ_H bereitgestellt.

[0146] Auf Grundlage des im vierten Schritt **206** bestimmten Anteils der Zahnstangenkraft F_{Zst_kon} sowie der im fünften Schritt **208** bereitgestellten, gemessenen Werte der Zahnstangenkraft F_{Zst} wird in einem achten Schritt **214** ein Anteil der Zahnstangenkraft $F_{ZSR\mu}$, der durch kraftschlussabhängige Rückstellmomente verursacht wird, berechnet. Auf Grundlage dieses dabei berechneten Anteils der Zahnstangenkraft sowie der in den Schritten **210** und **212** bereitgestellten Werte für die Querbesehleunigung a_y und den Lenkradwinkel δ_H wird in einem neunten Schritt **216** eine wirksame Spurhebellänge h_w als Funktion des Lenkradwinkels δ_H und der Querbesehleunigung a_y berechnet. Eine abschließende Berechnung des wirksamen kraftschlussabhängigen Reifenrückstellmoments $M_{R\mu ges}$ wird in einem abschließenden zehnten Schritt **218** auf Grundlage des berechneten Anteils der Zahnstangenkraft sowie der berechneten wirksamen Spurhebellänge berechnet.

[0147] Das Diagramm aus **Fig. 13** beruht auf dem Diagramm aus **Fig. 10** und zeigt ergänzend, wie sich eine hier in linker Richtung wirkende Zahnstangenkraft F_{Zst} auf eine Spurhebellänge h_{wl} des linken Rads **6** und eine Spurhebellänge h_{wr} des rechten Rads **8** auswirkt.

[0148] Das Diagramm aus **Fig. 14** umfasst eine Ordinate **250**, entlang der Werte für eine Seitenkraft aufgetragen sind, die auf die als Vorderachse ausgebildete Achse **4** des Kraftfahrzeugs **2** wirkt. Entlang einer Ordinate **252** des Diagramms aus **Fig. 14** sind Werte für eine gesamte Nachlaufstrecke von Reifen, die auf Rädern **6**, **8** des Kraftfahrzeugs **2** aufgezogen sind, aufgetragen. Innerhalb des Diagramms aus **Fig. 14** ist eine Schar mehrerer ellipsenförmiger Kurven **254**, **256**, **258**, **260**, **262**, **264**, **266**, **268**, **270**, **272**, **274**, **276** für die von der Seitenkraft abhängige Nachlaufstrecke für unterschiedlich große Werte eines Reibungsbeiwerts aufgetragen. Hierbei ergibt sich eine erste Kurve **254** für einen minimalen Wert des Reibungsbeiwerts und eine letzte, zwölfte Kurve **276** für einen maximalen Wert des Reibungsbeiwerts. Dabei ergibt sich die erste Kurve **254** bei einem Reibungsbeiwert $\mu = 0,1$. Eine zweite Kurve **256** ergibt sich bei einem Reibungsbeiwert $\mu = 0,2$, eine dritte Kurve **258** ergibt sich bei einem Reibungsbeiwert $\mu = 0,3$, eine vierte Kurve **260** ergibt sich bei einem Reibungsbeiwert $\mu = 0,4$, eine fünfte Kurve **262** ergibt sich bei einem Reibungsbeiwert $\mu = 0,5$, eine sechste Kurve **264** ergibt sich bei einem Reibungsbeiwert $\mu = 0,6$, eine siebte Kurve **266** ergibt sich bei einem Reibungsbeiwert $\mu = 0,7$, eine achte Kurve **268** ergibt sich bei einem Reibungsbeiwert $\mu = 0,8$, eine neunte Kurve **270** ergibt sich bei einem Reibungsbeiwert $\mu = 0,9$, eine zehnte Kurve **272** ergibt sich bei einem Reibungsbeiwert $\mu = 1,0$ und eine elfte Kurve **274** ergibt sich bei einem Reibungsbeiwert $\mu = 1,1$. Die letzte, zwölfte Kurve **276** ergibt sich bei einem Reibungsbeiwert $\mu = 1,2$.

[0149] Eine Gerade **281** beschreibt die theoretisch auf einen hohen Reibungsbeiwert wirkende Nachlaufstrecke. Außerdem ist in dem Diagramm aus **Fig. 14** ein erster Punkt **278** für eine geschätzte maximale Seitenkraft sowie ein zweiter Punkt **280** für einen Messwert eingetragen. Das Diagramm aus **Fig. 14** umfasst ferner eine gestrichelte Linie **282**, die parallel zu der Geraden **281** ist.

[0150] Wie in **Fig. 14** zu erkennen ist, nähert die Gerade **281** einen ersten Abschnitt aller ellipsenförmigen Kurven **254**, **256**, **258**, **260**, **262**, **264**, **266**, **268**, **270**, **272**, **274**, **276** sehr gut an. Dieser erste Abschnitt entspricht jeweils einer geringen Ausnutzung des verfügbaren Reibungsbeiwerts bei geringer Seitenkraft. Die Steigung der Geraden **281**, die alternativ auch durch eine Kurve ersetzt werden kann, ist vom Kraftfahrzeug abhängig und kann positive Werte oder, wie hier dargestellt, negative Werte annehmen.

[0151] Bei der ersten Ausführungsform des Verfahrens wird die Steigung der Gerade **281** gleich null gesetzt. In diesem Fall sind das Rückstellmoment und die Seitenkraft zueinander proportional, was zumindest bei großen Werten für die Seitenkraft und die Querb beschleunigung üblicherweise nur eine Annäherung darstellen kann. Bei dieser ersten Ausführungsform des Verfahrens werden ebenfalls Effekte der Lenkk kinematik vernachlässigt und ein linearer Zusammenhang zwischen der Zahnstangenkraft und dem Rückstellmoment angenommen. Hierdurch ergibt sich dann bei einer konstanten Nachlaufstrecke ebenfalls ein linearer Zusammenhang zwischen Seitenkraft und Zahnstangenkraft, auf dessen Grundlage gemäß Gleichung (G7) die anlernbare Steigung m_{akt} bestimmt wird.

[0152] Da eine zweite Linearisierung aber bei den meisten Kraftfahrzeugen nur bei kleinen Lenkwinkeln, die bei Überlandfahrten üblich sind, zu vernachlässigbaren Fehlern führt, stellt die erste Ausführungsform des Verfahrens einen Sonderfall der dritten Ausführungsform dar. Die erste Ausführungsform ist einfacher zu realisieren, schränkt aber den Gültigkeitsbereich und die Genauigkeit des Verfahrens ein.

[0153] Das Diagramm aus **Fig. 14** zeigt somit beispielhaft den Zusammenhang zwischen der Seitenkraft und der wirksamen Nachlaufstrecke in Abhängigkeit vom Reibungsbeiwert. Mit diesem Diagramm wird aus einem Wertepaar aus der Seitenkraft an der Vorderachse F_{sv} und der wirksamen Nachlaufstrecke n_{RVA} die maximal mögliche Seitenkraft und der aktuell maximal verfügbare Reibungsbeiwert ermittelt. Da bspw. eine Straße als Fahrbahn Unebenheiten aufweist, führen die dadurch auftretenden Schwankungen der Radlast zu Schwankungen des Rückstellmoments und somit auch zu Schwankungen der ermittelten Nachlaufstrecke. Um Schwankungen der Nachlaufstrecke im Bereich niedriger Werte nicht als mangelnden Kraftschluss zu interpretieren, ist eine Toleranzschwelle vorgesehen, die in dem Diagramm aus **Fig. 14** durch die gestrichelte Linie **282** gegeben ist. Diese Linie **282** liegt um einen vorzuwählenden Wert unterhalb der dazu parallelen Geraden **281**, die die bei einem hohen Reibungsbeiwert theoretisch zu erwartende Nachlaufstrecke beschreibt.

[0154] Das Flussdiagramm aus **Fig. 15** zeigt weitere Schritte **302, 303, 304, 308, 310, 312, 316, 318** zum Berechnen eines wirksamen Rückstellmoments. Hierbei wird in einem ersten Schritt **302** ein auf die Räder links und rechts wirksamer Spurhebel h_{wl} , h_{wr} als Funktion des Lenkradwinkels δ_H bestimmt. In einem zweiten Schritt **303** werden dynamische Radlasten der Vorderräder als Funktion der Querb beschleunigung bestimmt. In einem dritten Schritt **304** wird ein Verhältnis der Rückstellmomente der Reifen M_r/M_r als Funktion der Querb beschleunigung bestimmt. In einem vierten Schritt **308** werden Werte einer Zahnstangenkraft F_{Zst} bereitgestellt. In einem fünften Schritt **310** werden Werte für die Querb beschleunigung a_y und in einem sechsten Schritt **312** Werte für den Lenkradwinkel δ_H bereitgestellt. Auf Grundlage der in den Schritten **310** und **312** bereitgestellten Werte für die Querb beschleunigung und dem Lenkradwinkel wird in einem siebten Schritt **316** eine wirksame Spurhebellänge h_w als Funktion des Lenkradwinkels und der Querb beschleunigung berechnet. Eine Berechnung des wirksamen Rückstellmoments M_{Ruges} wird in einem abschließenden achten Schritt **318** auf Grundlage des berechneten Anteils der Zahnstangenkraft sowie der berechneten wirksamen Spurhebellänge berechnet.

[0155] Bei Durchführung der dritten Ausführungsform des Verfahrens ist für die Betriebsparameter eine höhere Detektionsgüte zu erreichen, wobei u. a. eine Kinematik und ein Nachlaufverhalten der Reifen berücksichtigt werden.

[0156] Bei Ausnutzung detaillierter Kenntnisse einer Kinematik der Lenkanlage **10** und somit einer Kinematik der Zahnstange **12**, der Achse **4**, der Räder **6, 8** und der Reifen ist es möglich, auf die in der ersten Ausführungsform vorgesehene, stark vereinfachende Linearisierung zur Bestimmung der Zahnstangenkraft zu verzichten und durch genauere Modellierungen zu ersetzen. Hiermit wird auch eine genauere Schätzung des Reibungsbeiwerts möglich.

[0157] Die bei einem Kraftfahrzeug mit Fahrdynamikregelung serienmäßig vorhandenen Betriebsparameter bzw. Messgrößen, d. h. die Längsb beschleunigung, die Querb beschleunigung sowie eventuell eine Vertikalb beschleunigung, der Lenkwinkel, die Gierrate, die Geschwindigkeit und die Zahnstangenkraft, die wie bereits beschrieben, bestimmt wird, sind für die dritte Ausführungsform des Verfahrens ausreichend.

[0158] Im dem zweiten Schritt **602** des Verfahrens werden, wie anhand des Flussdiagramms aus **Fig. 9** dargestellt, Betriebsparameter bzw. Messgrößen für die Längs-, Quer- und Vertikalb beschleunigung, für den Lenkwinkel, für die Gierrate und für die Fahrgeschwindigkeit, soweit vorhanden, erfasst. In dem vierten Schritt **604** werden als Betriebsparameter bzw. Primärgrößen Federwege, Nickwinkel, Wankwinkel, Antriebs- bzw. Bremskräfte und Radlasten bestimmt. Dabei genügt auch nur ein Teil der oben genannten Messgrößen, um die Primärgrößen näherungsweise zu ermitteln.

[0159] Durch die Querbeschleunigung a_y ergibt sich eine dynamische Radlastverlagerung. Die dynamische Radlaständerung ΔF_{Nv} bei stationärer Kurvenfahrt ist somit gemäß Gleichung (G12) eine Funktion der Querbeschleunigung:

$$\Delta F_{Nv} \approx f(a_y) \quad (G12)$$

[0160] Vereinfacht kann auch angenommen werden, dass das Verhältnis einer Wankabstützung beider Achsen des Kraftfahrzeugs, die durch Achskinematik, Feder- und Stabilisatorraten verursacht wird, dem Verhältnis der statischen Achslast entspricht. Sofern auch Auswirkungen einer Verlagerung des Schwerpunkts innerhalb einer Kurve nach außen vernachlässigt werden, ist aus einer Höhe h_s des Schwerpunkts und einer Spurweite b_v eine Änderung der Radlast an einer Achse über Gleichung (G13) näherungsweise zu bestimmen:

$$F_{Nv} \approx \frac{m \cdot \frac{l_h}{l} \cdot a_y \cdot h_s}{b_v} \quad (G13)$$

[0161] Somit ist eine Änderung der Radlast direkt proportional zur Querbeschleunigung a_y . Ist ein Verhältnis von Differenzen der Radlasten der Vorder- und Hinterachse bei einer Kurvenfahrt bspw. aus dem Simulationsmodell bzw. einer Simulationsrechnungen bekannt, kann in obiger Gleichung (G13) der Term l_h/l durch das Verhältnis der Wankabstützung der als Vorderachse ausgebildeten Achse zur gesamten Wankabstützung beider Achsen des Kraftfahrzeugs ersetzt werden.

[0162] Die gesamte Achslast der Vorderachse ist unter Vernachlässigung von aerodynamischen Kräften in Abhängigkeit der Längsbeschleunigung a_x und Erdbeschleunigung g näherungsweise mit folgender Gleichung (G14) zu bestimmen:

$$F_{Nv} \approx \frac{m \cdot (g \cdot l_h - a_x \cdot h_s)}{l} \quad (G14)$$

[0163] Daraus ergibt sich für die Radlast am linken Rad **6** Gleichung (G15):

$$F_{Nl} \approx \frac{m \cdot (g \cdot l_h - a_x \cdot h_s)}{2 \cdot l} + m \cdot \frac{l_h}{l} \cdot a_y \cdot \frac{h_s}{b_v} \quad (G15)$$

und für die Radlast am rechten Rad **8** Gleichung (G16):

$$F_{Nr} \approx \frac{m \cdot (g \cdot l_h - a_x \cdot h_s)}{2 \cdot l} - m \cdot \frac{l_h}{l} \cdot a_y \cdot \frac{h_s}{b_v} \quad (G16)$$

[0164] Sind weitere Sensoren oder Algorithmen im Kraftfahrzeug **2** verfügbar, die eine genauere Schätzung der Vorderachslast ermöglichen, kann alternativ auch die so ermittelte Achslast auf der Vorderachse verwendet werden. Dabei kann ebenfalls, wie oben beschrieben, der Term l_h/l durch das Verhältnis der Wankabstützung der als Vorderachse ausgebildeten Achse zur gesamten Wankabstützung beider Achsen ersetzt werden.

[0165] Weiter wird in einem weiteren Schritt unter Ausnutzung der Kenntnis der Lenkkinematik, des Lenkwinkels δ_H und der beiden Lenkwinkel δ_l , δ_r der Räder **6**, **8** der Achse **4** über Gleichung (G17) ein Mittelwert δ_{VA} für den Lenkwinkel berechnet (vgl. **Fig. 10**):

$$\delta_{VA}(\delta_H) = 0,5 \cdot (\delta_l(\delta_H) + \delta_r(\delta_H)) \quad (G17)$$

wobei auch hier die Indices l und r für links und rechts stehen.

[0166] Aus der mit dem kraftfahrzeuginternen Sensor gemessenen Querbeschleunigung a_y , der Gierrate bzw. Giergeschwindigkeit $d\psi/dt$, und dem mittleren Lenkwinkel δ_{VA} der Räder **6**, **8** wird im nächsten Schritt die an der Achse **4** wirkende Seitenkraft unter Vernachlässigung von Vertikalbeschleunigungen mit Gleichung (G18) (vgl. **Fig. 11**) im sechsten Schritt **606** des Verfahrens (Flussdiagramms aus **Fig. 9**) bestimmt:

$$F_{Sv} = \frac{m * l_h * a_y + \Theta_z * \ddot{\psi}}{\cos \delta_{VA} * l} \quad (G18)$$

[0167] Hierbei ist m die Masse des Kraftfahrzeugs, l_h der Abstand des Schwerpunkts des Kraftfahrzeugs **2** von seiner Hinterachse gemessen in Längsrichtung des Kraftfahrzeugs und l der Radstand des Kraftfahrzeugs **2**. Eine Gierbeschleunigung $d^2\psi/dt^2$ wird aus der Gierrate bzw. Giergeschwindigkeit $d\psi/dt$ durch Ableiten bestimmt. Θ_z ist das Trägheitsmoment des Kraftfahrzeugs **2** um dessen Hochachse.

[0168] In dem parallelen fünften Schritt **605** wird aus der Zahnstangenkraft das wirksame kraftschlussabhängige Rückstellmoment der Reifen bestimmt. Details hierzu sind in dem Diagramm aus **Fig. 12** dargestellt.

[0169] Bei einer Achsschenkellenkung wird das kurveninnere Rad stärker als das kurvenäußere Rad eingeschlagen (vgl. **Fig. 13**). Dies bedeutet, dass ein Verhältnis zwischen einem Weg der Zahnstange s_{Zst} und einem Einschlagwinkel abhängig von einem Lenkwinkel δ_l , δ_r des jeweiligen Rads ist. Dieser Zusammenhang lässt sich durch die wirksamen Spurhebel h_{Wl} und h_{Wr} über die Gleichungen (G19) und (G20) beschreiben:

$$h_{Wl} = ds_{Zst}/d\delta_l = f(\delta_H) \quad (G19)$$

$$h_{Wr} = ds_{Zst}/d\delta_r = f(\delta_H) \quad (G20)$$

[0170] Für das kurvenäußere Rad bewirkt eine auftretende Erhöhung der Radlast eine annähernd proportionale Vergrößerung des Nachlaufs des Reifens und einen größeren Anteil an der gesamten übertragenen Seitenkraft. Am kurveninneren Rad wird durch eine auftretende Erhöhung der Radlast umgekehrt eine annähernd proportionale Verringerung des Nachlaufs des Reifens und ein geringerer Anteil an der gesamten übertragenen Seitenkraft bewirkt, d. h. die beiden Räder tragen abhängig von der Querbeschleunigung unterschiedlich stark zum gesamten Rückstellmoment bei. Da je nach Einschlagwinkel die wirksamen Spurhebel unterschiedlich groß sind, haben die Rückstellmomente an beiden Rädern unterschiedlich starke Auswirkung auf die Zahnstangenkraft. Für die Zahnstangenkraft gilt Gleichung (G21):

$$F_{Zst} = M_l/h_{Wl} + M_r/h_{Wr} \quad (G21)$$

[0171] Die beim Kraftfahrzeug **2** auftretenden Lenkrückstellmomente M_l , M_r sind jeweils aus dem Rückstellmoment und mindestens einem der nachfolgenden Betriebsparametern, nämlich einer Seitenkraft im Zusammenhang mit der Nachlaufstrecke der Reifen bzw. einem Reifennachlauf, einem Rückstellmoment der Reifen durch Sturz, einer Seitenkraft im Zusammenhang mit einem geometrischen Nachlauf bzw. einer geometrischen Nachlaufstrecke, einer Radlast im Zusammenhang mit einem wirksamen Radlasthebelarm, einer Antriebskraft im Zusammenhang mit einem wirksamen Störkrafthebelarm, einer Bremskraft im Zusammenhang mit einem wirksamen Lenkrollradius, einem Trägheitsmoment, einem Kreiselmoment und einem Reibmoment zusammengesetzt.

[0172] Dabei ist nur der erste Anteil zum Rückstellmoment vom Kraftschluss abhängig und wird nachfolgend für das linke Rad mit $M_{R_{ul}}$ und für das rechte Rad mit $M_{R_{ur}}$ bezeichnet. Daher werden alle weiteren Anteile des Rückstellmoments während der Fahrt unter Berücksichtigung der bekannten Kinematik des Fahrwerks und der Lenkanlage **10** aus mindestens einem im Kraftfahrzeug **2** angeordneten Sensor berechnet. Diese Anteile des Rückstellmoments werden mit M_{konl} für eine linke Seite des Kraftfahrzeugs **2** und mit M_{konr} für eine rechte Seite des Kraftfahrzeugs **2** bezeichnet. Hierbei gilt für den Anteil des Rückstellmoments M_{konl} der linken Seite des Kraftfahrzeugs **2** bei außenliegender Bremse und konventionellem Antrieb über eine Antriebswelle Gleichung (G22):

$$M_{konl} = \Delta M(\gamma) + F_{Sl} \cdot n_{kl} + F_{Nl} \cdot h_{wFNl} + F_{Al} \cdot r_{wsl} + F_{Bl} \cdot r_{wrl} + \Theta_{zRadl} \cdot d^2\delta_l/dt^2 + M_{kreil} + M_{reil} \quad (G22)$$

[0173] Das Rückstellmoment M_{konr} für die rechte Seite des Kraftfahrzeugs **2** wird aus entsprechenden Betriebsparametern auf der rechten Seite des Kraftfahrzeugs aus Gleichung (G23) berechnet, wobei Index l durch Index r zu vertauschen ist:

$$M_{konr} = \Delta M(\gamma) + F_{Sr} \cdot n_{kr} + F_{Nr} \cdot h_{wFNr} + F_{Ar} \cdot r_{wsr} + F_{Br} \cdot r_{wrr} + \Theta_{zRadr} \cdot d^2\delta_r/dt^2 + M_{kreir} + M_{reir} \quad (G23)$$

[0174] Hierbei beschreibt $\Delta M(\gamma)$ das durch Sturz am linken bzw. rechten Rad **6, 8** verursachte Reifenrückstellmoment. Die weiteren Variablen aus den Gleichungen (G22) und (G23) entsprechen der Seitenkraft F_{Sl} bzw.

F_{Sr} , der Antriebskraft F_{Al} bzw. F_{Ar} und der Bremskraft F_{Bl} bzw. F_{Br} am linken bzw. rechten Rad **6, 8**. n_{kl} bzw. n_{kr} ist der geometrische Nachlauf, h_{wFNI} bzw. h_{wFNr} der bezüglich des Radrückstellmoments wirksame Hebelarm der Radlast und r_{wsl} bzw. r_{wsr} der wirksame Störkrafthebelarm und r_{wrl} bzw. r_{wrr} der wirksame Lenkrollradius des jeweiligen linken bzw. rechten Rads **6, 8**. Diese Betriebsparameter n_{kl} bzw. n_{kr} , h_{wFNI} bzw. h_{wFNr} , r_{wsl} bzw. r_{wsr} , r_{wrl} bzw. r_{wrr} werden jeweils aus dem Federweg f_l bzw. f_r am linken bzw. rechten Rad **6, 8**, dem Wankwinkel φ , dem Nickwinkel Θ und dem Lenkwinkel δ_l , δ_r berechnet. In möglicher Ausgestaltung wird nur ein Teil der zuletzt genannten Größen bzw. Betriebsparameter zur näherungsweisen Berechnung des jeweiligen Rückstellmoments M_{konl} bzw. M_{konr} verwendet.

[0175] In weiterer Ausgestaltung des Verfahrens kann zusätzlich eine Auswirkung einer Elastokinematik berücksichtigt werden, wobei die oben genannten Betriebsparameter ergänzend in Abhängigkeit von Kräften, die auf das linke und/oder rechte Rad wirken, betrachtet werden. Weiterhin kann zusätzlich eine Verformung eines jeweiligen Reifens, die ebenfalls von den am linken bzw. rechten Rad wirkenden Kräften und Momenten sowie vom Sturzwinkel abhängig ist, bei der Berechnung der voranstehend genannten Betriebsparameter berücksichtigt werden.

[0176] Außerdem beschreibt Θ_{zRadl} bzw. Θ_{zRadr} die Trägheit bzw. Massenträgheit jener Komponenten, u. a. des linken bzw. rechten Rads **6, 8**, des Kraftfahrzeugs **2**, die bei einer Lenkung um den Lenkwinkel des linken bzw. rechten Rads **6, 8** bewegt werden. M_{kreil} , M_{kreir} ist ein Kreiselmoment, das beim Lenken am linken bzw. rechten Rad **6, 8** auftritt, wenn die Kinematik eine lenkwinkelabhängige Sturzänderung bewirkt. M_{reil} , M_{reir} ist ein Reibmoment am linken bzw. rechten Rad **6, 8**, das abhängig von der Geschwindigkeit des Lenkwinkels links bzw. rechts und der an den Gelenken der linken bzw. rechten Radführung wirkenden Kräften ist.

[0177] Abhängig von der Genauigkeitsanforderung können auch nur einzelne Anteile der Gleichungen (G22) bzw. (G23) berücksichtigt werden.

[0178] Zur Bestimmung der an den einzelnen Rädern **6, 8** wirkenden Seitenkraft wird die auf die Achse wirkende Seitenkraft F_{Sv} vereinfacht auf die beiden Räder **6, 8** entsprechend der Verteilung der Radlast gemäß der Gleichung (G24) für die linke Seitenkraft und die Gleichung (G25) für die rechte Seitenkraft aufgeteilt:

$$F_{Sl} \approx F_{Sv} \cdot F_{Nl} / F_{Nv} \quad (G24)$$

$$F_{Sr} \approx F_{Sv} \cdot F_{Nr} / F_{Nv} \quad (G25)$$

[0179] Alternativ kann eine radabhängige Aufteilung der Seitenkraft auch als Funktion des Lenkwinkels, der wirkenden Seitenkraft oder anderer fahrdynamischer Betriebsparameter bzw. Größen, bspw. der Querbesehleunigung, betrachtet werden.

[0180] Mit den aus den Gleichungen (G22) bzw. (G23) bestimmten Rückstellmomenten M_{konl} und M_{konr} wird jener Anteil der Zahnstangenkraft, der nicht durch kraftschlussabhängige Rückstellmomente der Reifen erzeugt wird und hiervon unabhängig ist, als F_{Zst_kon} bezeichnet und über Gleichung (G26) bestimmt:

$$F_{Zst_kon} = \frac{M_{konl}}{h_{wl}} + \frac{M_{konr}}{h_{wr}} \quad (G26)$$

[0181] Dieser hier konstruktive Anteil der Zahnstangenkraft wird von der wirkenden, aktuellen und/oder gemessenen Zahnstangenkraft F_{Zst_gem} abgezogen, woraus gemäß Gleichung (G27) jene Zahnstangenkraft berechnet wird, die durch das kraftschlussabhängige Rückstellmoment der Reifen **6, 8** verursacht wird:

$$F_{Zs_R\mu} = F_{Zst_gem} - F_{Zst_kon} = \frac{M_{R\mu l}}{h_{wl}} + \frac{M_{R\mu r}}{h_{wr}} = \frac{M_{R\mu l} + M_{R\mu r}}{h_w} = \frac{M_{R\mu ges}}{h_w} \quad (G27)$$

[0182] Daraus wird mit Gleichung (G28) der mittlere Spurhebel h_w berechnet:

$$h_w \approx \frac{M_{R\mu ges}}{\frac{M_{R\mu l}}{h_{wl}} + \frac{M_{R\mu r}}{h_{wr}}} = \frac{M_{R\mu ges} * h_{wl} * h_{wr}}{M_{R\mu l} * h_{wr} + M_{R\mu r} * h_{wl}} = \frac{(M_{R\mu l} + M_{R\mu r}) * h_{wl} * h_{wr}}{M_{R\mu l} * h_{wr} + M_{R\mu r} * h_{wl}} \quad (G28)$$

[0183] Unter der vereinfachten Annahme, dass sich die Seitenkräfte entsprechend der dynamischen Radlasten verteilen und der Einfluss der Radlast auf die Nachlaufstrecke vernachlässigt wird, gilt mit einem Betriebsparameter F_{NVA} für eine Achslast bzw. eine Normalkraft, die auf die Vorderachse wirkt, für den wirksamen Spurhebel Gleichung (G29):

$$h_W \approx \frac{F_{NVA} * h_{Wl} * h_{Wr}}{F_{Nvl} * h_{Wr} + F_{Nvr} * h_{Wl}} = \frac{h_{Wl} * h_{Wr}}{h_{Wr} * \left(0,5 + \frac{a_y * h_s}{g * b_v}\right) + h_{Wl} * \left(0,5 - \frac{a_y * h_s}{g * b_v}\right)} \quad (G29)$$

[0184] Zur Erhöhung der Genauigkeit kann auch eine Funktion (G30), die das Verhältnis der Momente als Funktion einer Änderung der Radlast und damit der Querbeschleunigung ausdrückt, verwendet werden:

$$M_l/M_r = f(F_{Nl}/F_{Nr}) = f(a_y) \quad (G30)$$

[0185] Im letzten Schritt **218** in dem Diagramm aus **Fig. 12** wird das gesamte Rückstellmoment aus der Zahnstangenkraft bzw. aus der Differenz der beiden Spurstangenkräfte über Gleichung (G31) bestimmt:

$$M_{Ruges} = F_{Zst_R\mu} \cdot h_W \quad (G31)$$

[0186] Das so erhaltene Rückstellmoment ist in ausreichender Genauigkeit nur noch von der an der Achse übertragenen Seitenkraft und dem Kraftschluss abhängig. Eine derartige zweidimensionale Abhängigkeit kann entweder durch eine mathematische Funktion oder durch ein Kennfeld beschrieben und aus einem grundsätzlichen Verhalten des Rückstellmoments eines Reifens abgeleitet werden. Das Rückstellmoment des jeweiligen Reifens entsteht dadurch, dass die Seitenkraft um eine Nachlaufstrecke des Reifens nach hinten versetzt außermittig angreift. Daher wird aus diesem Rückstellmoment und der wirksamen Seitenkraft die wirksame Nachlaufstrecke berechnet, was im achten Schritt **608** aus **Fig. 9** angedeutet ist. Für die wirksame Nachlaufstrecke n_{RVA} gilt Gleichung (G32):

$$n_{RVA} = \frac{M_{Ruges}}{F_{Sv}} \approx \frac{F_{Zst_R\mu} * h_w * \cos \delta_{VA} * l}{m * l_h * a_y + \Theta_z * \ddot{\psi}} \quad (G32)$$

[0187] Als Referenz wird hierbei im neunten Schritt **609** aus **Fig. 9** die Nachlaufstrecke auf einer Strecke mit hohem Reibungsbeiwert μ in Abhängigkeit von der wirkenden Seitenkraft bestimmt. Diese Funktion ist im Steuergerät **16, 16a** des Kraftfahrzeugs **2** hinterlegt und wird kontinuierlich geprüft. Wird nun das Kraftfahrzeug **2** beladen oder ein Innendruck des Reifens gesenkt, so steigt das Rückstellmoment. Da der Innendruck gegebenenfalls durch einen Sensor zum Erfassen des Innendrucks des Reifens bekannt ist, ist durch Messen der Nachlaufstrecke bei geringer Seitenkraft auch eine Beladung der Achse zu erkennen und/oder zu ermitteln. Theoretisch ist auch das Erkennen einer einseitigen Beladung denkbar, da sich die Nachlaufstrecken in Links- und Rechtskurven voneinander leicht unterscheiden. Ein Offset der gemessenen Zahnstangenkraft oder der Querbeschleunigung, die dem Steuergerät **16, 16a** über ein Signal bereitgestellt wird, kann ebenfalls erkannt und in gewissem Umfang korrigiert werden. In diesem Fall ist bei einem errechneten Nulldurchgang der Seitenkraft das über die Zahnstangenkraft gemessene Rückstellmoment ungleich null, woraus sich ergibt, dass die Nachlaufstrecke theoretisch gegen unendlich geht. Da ein Bereich der Querbeschleunigung mit einem Wert von $+/-1 \text{ m/s}^2$ häufig genutzt wird, ist der Offset dieser beiden Betriebsparameter durch Betrachten dieses Bereichs zu erkennen und weiterhin zu korrigieren, wenn durch weitere Schätzungen bekannt ist, welcher Wert eines Betriebsparameters den Offset in einem jeweiligen Nulldurchgang verursacht. Dies wird im siebten Schritt **607** zur Anpassung der Parameter der Zahnstangenkraftauswertung im Diagramm aus **Fig. 9**, der nachfolgend ausführlicher beschrieben wird, durchgeführt.

[0188] Obige Gleichung (G32) zum Bestimmen der Nachlaufstrecke kann in bestimmten Betriebsbedingungen fehlerhafte Ergebnisse liefern, wenn gleichzeitig über die gelenkten Räder **6, 8** eine große Längskraft übertragen wird, da die Radlast und der Sturz bei einer Kurvenfahrt relativ zur Fahrbahn an den beiden Rädern **6, 8** der Achse **4** unterschiedlich groß sind, wodurch durch die Längskraft für die Räder **6, 8** unterschiedlich große Rückstellmomente auftreten. Die Unterschiede, die durch unterschiedliche wirksame Störkraftthebelarme entstehen, werden zwar berücksichtigt, sind aber für diesen Effekt nicht alleine verantwortlich. Weiter bewirkt die Längskraft eine Verschiebung der Last in Längsrichtung und verändert damit ebenfalls den Reifennachlauf bzw. die Nachlaufstrecke.

[0189] Außerdem können durch Gleichung (G32) fehlerhafte Ergebnisse geliefert werden, wenn das Kraftfahrzeug **2** in einer Betriebssituation gleichzeitig stark beschleunigt oder verzögert wird und sich hierdurch eine dynamische Achslast ändert. Die maximale Seitenkraft und die Aufstandsfläche eines Rads **6, 8** steigen nahezu proportional zu einer Zunahme der Radlast. Die Nachlaufstrecke als Funktion der Seitenkraft nimmt durch die größere Aufstandsfläche ebenfalls zu. Weiter ist eventuell zu berücksichtigen, dass durch den Nickwinkel der wirksame geometrische Nachlauf und somit die geometrische Nachlaufstrecke leicht verändert wird.

[0190] Falls die Lenkanlage **10** in einer Betriebssituation sehr dynamisch betätigt wird, entstehen durch Trägheitskräfte der Räder **6, 8** von Radträgern und aufgrund von Kreiselkräften der rotierenden Räder **6, 8** zusätzliche Momente, die allerdings theoretisch relativ genau bestimmt werden können. Bei einer im Vergleich zur Fahrgeschwindigkeit hohen Lenkgeschwindigkeit entsteht ein nicht zu vernachlässigender, verzögerter Aufbau der Seitenkraft, der auch zu einer Veränderung der Nachlaufstrecke führen kann.

[0191] Bei sehr geringen Querbewegungen ergeben sich für Zähler und Nenner der Gleichung (G32) sehr kleine Werte. Demnach können geringe Sensorfehler und zeitversetzte Schwankungen zu großen Abweichungen bei der Nachlaufstrecke führen.

[0192] Um den oben genannten Fehlern Rechnung zu tragen, wird einer Schätzung des Reibungsbeiwerts nur vertraut, wenn hierfür im zehnten Schritt **610** kein Ausschlusskriterium vorliegt (nein). Hierbei werden zur Beurteilung des Ausschlusskriteriums bspw. Werte des Antriebsmoments an der Achse **4**, eine Beschleunigung $d^2\delta/dt^2$ des Lenkwinkels δ sowie eine Ableitung der Beschleunigung $d^2\delta/dt^2$ des Lenkwinkels δ betrachtet, wodurch zu vermeiden ist, dass bei einer stark schwankenden Beschleunigung $d^2\delta/dt^2$ des Lenkwinkels δ Nulldurchgänge als gültig angesehen werden. Als weitere Betriebsparameter werden hierzu ein Verhältnis der Geschwindigkeit $d\delta/dt$ des Lenkwinkels δ zur Geschwindigkeit v_x des Kraftfahrzeugs **2** und der Bremsdruck betrachtet.

[0193] Ist ein Wert eines der voranstehend genannten Betriebsparameter größer als ein jeweils hierfür zu definierender und/oder festzulegender Grenzwert, ist das Ausschlusskriterium erfüllt (ja). Außerdem wird eine Schätzung des Reibungsbeiwerts nur durchgeführt, falls die Geschwindigkeit größer als ein hierfür vorgesehener Minimalwert ist, damit unter anderem die Auflösung der Gierrate bzw. Giergeschwindigkeit ausreichend genau ist, und falls von einem Fahrwerkregelsystem kein Regeleingriff vorliegt.

[0194] Liegt kein Ausschlusskriterium vor, wird die Querbewegung bzw. die Seitenkraft an der Achse betrachtet. Liegt ein Wert der Querbewegung a_y , die der Seitenkraft bei stationärer Kurvenfahrt entspricht, in einem Bereich von bspw. 0,5 bis 1 m/s^2 vor, wie im Flussdiagramm aus **Fig. 9** angedeutet, so wird die ermittelte Nachlaufstrecke zum Anlernen bzw. Anpassen der Betriebsparameter zur Auswertung der Zahnstangenkraft verwendet.

[0195] Falls der Wert der Querbewegung bspw. größer als 1 m/s^2 ist, wird im zwölften Schritt **612** die tatsächlich wirksame Nachlaufstrecke mit der theoretisch wirksamen Nachlaufstrecke verglichen. Weichen Werte dieser Nachlaufstrecken höchstens um einen vorgegebenen minimalen Toleranzwert voneinander ab, so dass die Werte ungefähr gleich sind, liegt ein aktueller Kraftschluss und somit ein Reibungsbeiwert so stark unterhalb des verfügbaren Kraftschlusses bzw. Reibungsbeiwerts, dass keine Schätzung möglich ist, was im vierzehnten Schritt **614** angedeutet ist. Ist die wirksame Nachlaufstrecke zumindest um den Toleranzwert größer als die theoretische Nachlaufstrecke, so entsprechen Werte von Betriebsparametern des Kraftfahrzeugs, wie z. B. dessen Beladung, nicht jenen hierfür vorgesehenen Werten, die zur Bestimmung der theoretisch wirksamen Nachlaufstrecke verwendet worden sind. In diesem Fall wird gemäß dem siebten Schritt **607** die so ermittelte Nachlaufstrecke zum Anpassen der Betriebsparameter zur Auswertung der Zahnstangenkraft verwendet. Ist der Wert der wirksamen Nachlaufstrecke hingegen zumindest um den Toleranzwert kleiner als der theoretisch wirksame Wert, so wird dieser Wert zur Abschätzung des maximal nutzbaren Kraftschlusses bzw. Reibungsbeiwerts im fünfzehnten Schritt **615** verwendet.

[0196] In dem Diagramm aus **Fig. 14** sind die ellipsenförmigen Kurven **254, 256, 258, 260, 262, 264, 266, 268, 270, 272, 274, 276** für die Nachlaufstrecke über der wirksamen Seitenkraft aufgetragen, wobei sich für unterschiedliche Werte des Reibungsbeiwerts und somit des Kraftschlusses unterschiedliche Kurven **254, 256, 258, 260, 262, 264, 266, 268, 270, 272, 274, 276** ergeben. Diese Abhängigkeit des Reibungsbeiwerts und/oder Kraftschlusses von der wirksamen Seitenkraft kann entweder durch mathematische Funktionen oder durch Kennfelder dargestellt werden. Weiterhin ist in dem Diagramm aus **Fig. 14** die theoretisch auf einen Hochreibungsbeiwert, d. h. für einen hohen Reibungsbeiwert, wirksame Nachlaufstrecke durch die Gerade **281** entlang der vorderen Abschnitte der ellipsenförmigen Kurven **254, 256, 258, 260, 262, 264, 266, 268, 270, 272,**

274, 276 für kleine Werte der Seitenkraft angenähert. Eine gestrichelte Linie **282** liegt um eine Toleranzschwelle versetzt unterhalb dieser Geraden **281**, wobei diese Linie **282** auch als Grenzkurve bezeichnet wird. Liegt die ermittelte wirksame Nachlaufstrecke unterhalb der gestrichelten Linie **282** und liegt kein Ausschlusskriterium vor, so wird ein Kraftschluss und demnach der Reibungsbeiwert geschätzt.

[0197] Der Punkt **280** ergibt sich aus der aktuell wirkenden Nachlaufstrecke und der aktuell wirkenden Seitenkraft bei einem Reibungsbeiwert μ von ca. 0,78. Der Punkt **278** gilt bei gleichem Kraftschluss, wenn ein Wert der Nachlaufstrecke null wird und ein verfügbarer Kraftschlussbeiwert bei dem Reibungsbeiwert von 0,78 vollständig ausgenutzt wird. Die im Punkt **278** ablesbare Seitenkraft entspricht der bei diesem geschätzten Kraftschluss bzw. Reibungsbeiwert μ über Gleichung (G33) leicht zu berechnenden maximal möglichen Seitenkraft F_{Svmax} :

$$F_{Svmax} = \mu * F_{NVA} = \mu * \frac{m * g * l_h}{l} \quad (G33)$$

[0198] Bei einem Kraftfahrzeug mit einem Hinterradantrieb ist auch während Beschleunigungsvorgängen in einer Kurve eine Schätzung des Reibungsbeiwerts bzw. Kraftschlusses möglich, sofern nicht durch ein Sperrdifferenzial starke Giermomente erzeugt werden. Während des Beschleunigungsvorgangs mit der Beschleunigung a_x ändert sich hierbei eine dynamische Achslast an der Vorderachse.

[0199] Um auch in diesem Fall eine zufriedenstellende Schätzgüte zu erhalten, wird die dynamische Änderung auch bei der Berechnung des wirksamen Rückstellmoments und der bei hohem Reibungsbeiwert μ theoretisch wirksamen Nachlaufstrecke berücksichtigt. Hier wird in gleicher Weise wie bei der Aufteilung der Rückstellmomente auf die beiden Räder **6, 8** der Achse **4** vorgegangen.

[0200] Durch Änderung des Verhältnisses der Achslast an der Vorderachse zu einem Druck der Reifen an den Rädern **6, 8**, die an der Vorderachse angeordnet sind, verändert sich die Nachlaufstrecke der Reifen annähernd proportional. Damit verschiebt sich die Gerade, die das Verhalten bei großen Werten des Reibungsbeiwerts beschreibt, und somit auch die Linie **282** (vgl. Fig. 14).

[0201] Falls das Kraftfahrzeug **2** bereits einen statischen Wankwinkel aufweist, der z. B. durch eine einseitige Beladung bedingt sein kann, so wird auch bei einer Fahrt geradeaus ohne Querneigung eine Querbeschleunigung sensiert. Hier sind für die Querbeschleunigung bei üblichen Federraten Werte bis ca. 0,1 m/s² denkbar. Dies führt dazu, dass die ermittelte Nachlaufstrecke gerade bei geringen Werten der Querbeschleunigung extrem verfälscht wird. Weist das Kraftfahrzeug bspw. einen statischen Wankwinkel auf, der in einer Linkskurve auftritt, so werden für die Nachlaufstrecke in der Linkskurve etwas zu geringe Werte ermittelt, da die tatsächlich wirkende Seitenkraft geringer als die über die Querbeschleunigung berechnete Seitenkraft ist. In einer Rechtskurve werden dagegen für die Nachlaufstrecke zu große Werte ermittelt, da die Querbeschleunigung und somit auch die wirkende Seitenkraft vom Betrag her größer als jene Werte sind, die von dem Sensor zum Erfassen der Querbeschleunigung erfasst, üblicherweise berechnet werden. Um diese Fehler zu vermeiden, ist ein Anlernen dieser Veränderungen vorgesehen, was bereits anhand der zuerst vorgestellten ersten Ausführungsform voranstehend erläutert worden ist.

[0202] Das Anlernen wird bei auftretenden Querbeschleunigungen für eine Linkskurve in einem Bereich von ca. 0,5 m/s² bis ca. 1 m/s² und für eine Rechtskurve von ca. -0,5 m/s² bis ca. -1 m/s² durchgeführt.

[0203] Für Paare an Werten für einen Anteil der Zahnstangenkraft $F_{Zst_R\mu}$ und die Seitenkraft F_{Sv} in mindestens einem der voranstehend genannten Bereichen für die Querbeschleunigung, die jeweils zu gleichen Zeitpunkten gemessenen werden, wird fortlaufend oder nach Erreichen einer vorgewählten Anzahl an Paaren von Werten für diese beiden Betriebsparameter nach der Methode des minimalen Fehlerquadrats gemäß Gleichung (G34) eine Ausgleichskurve ermittelt und durch die gemessenen Werte gelegt:

$$F_{Zst_R\mu} \approx A_1 \cdot F_{Sv} + \dots + A_l \cdot F_{Sv}^l + |F_{Sv}| \cdot (A_2 \cdot F_{Sv}^2 + \dots + A_m \cdot F_{Sv}^m) \quad (G34)$$

{ $l \leq n$, für ungerade Werte und $m \leq n$ für gerade Werte}

[0204] Hierbei sollte n mindestens 1 betragen, genauere Ergebnisse werden aber für Werte von n , die 2 oder größer sind, erzielt.

[0205] Der Wert b wird zur Korrektur eines möglichen Offsets von der ermittelten Zahnstangenkraft abgezogen. Aus dem Wert A_1 wird die theoretische Nachlaufstrecke bei einer Seitenkraft F_{Sv} gleich Null gemäß Gleichung (G35) berechnet:

$$n_{R\text{theor}}(F_{Sv} = 0) = A_1 \cdot h_W \quad (\text{G35})$$

[0206] Dieser Wert wird zur Anpassung der theoretischen Nachlaufstrecke an veränderte Betriebsparameter des Kraftfahrzeugs **2** und zur Anpassung der Höhe der Linie **282** als Grenzkurve in dem Diagramm aus **Fig. 14** verwendet.

[0207] Bei der Bestimmung der Ausgleichskurve kann zumindest ein Teil der Koeffizienten A_n für $n \geq 2$ vorgegeben werden, so dass in Ausgestaltung auch sämtliche Koeffizienten A_n vorgegeben werden. Durch diese Maßnahme ist bei einem hohen Kraftschluss und/oder Reibungsbeiwert μ ein zu einem Rückstellmoment des jeweiligen Reifens **6, 8** passender Verlauf zu erzielen.

[0208] Zeigt sich beim Vergleich der Nachlaufstrecken im zwölften Schritt **612**, dass Werte der gemessenen Nachlaufstrecke größer als Werte der theoretischen Nachlaufstrecke sind, so können diese Werte zur Korrektur der Grenzkurve bzw. Linie **282** bei höheren Seitenkräften F_{Sv} genutzt werden.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 102009002245 A1 [0003]
- DE 102006036751 A1 [0004]
- DE 102010036638 A1 [0005, 0008]
- DE 10319662 A1 [0008]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Kraftfahrzeugs (2), das eine Lenkanlage (10) mit einer Zahnstange (12) aufweist, mit der Räder (6, 8) an einer Achse (4), auf denen Reifen aufgezogen sind, inklusive zugehöriger Radaufhängungen des Kraftfahrzeugs (2) gelenkt werden, wobei das Kraftfahrzeug (2) auf einer Fahrbahn bewegt wird, wobei ein Reibungsbeiwert oder eine davon abgeleitete Größe zwischen einem jeweiligen Reifen und der Fahrbahn unter Berücksichtigung eines Fahrzustands, einer Kinematik der Lenkanlage (10), einer Kinematik der Achse (4), eines Verhaltens der Reifen auf den Rädern (6, 8) und/oder deren Nachlaufstrecke als charakteristische Größe ermittelt wird, wobei im Verlauf einer Anwendung des Verfahrens sich ändernde Betriebsparameter des Kraftfahrzeugs (2) und der Reifen durch eine Lernphase, die während mindestens einer Fahrt des Kraftfahrzeugs (2) durchgeführt wird, erkannt und berücksichtigt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Reibungsbeiwert oder die davon abgeleitete Größe zwischen einem jeweiligen Reifen und der Fahrbahn aus gemessenen Kräften und/oder Drehmomenten in der Achse (4), der Lenkanlage (10) und/oder der Reifen sowie aus fahrdynamischen Betriebsparametern des Kraftfahrzeugs (2) ermittelt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem der Reibungsbeiwert als Funktion, die von mindestens einem weiteren Betriebsparameter abhängig ist, berechnet wird, wobei als der mindestens eine weitere Betriebsparameter ein Lenkwinkel, eine Querb beschleunigung, die auf das Kraftfahrzeug (2) wirkt, eine Gierrate des Kraftfahrzeugs (2), eine Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugs (2), eine auf die Zahnstange (12) wirkende Zahnstangenkraft, ein Rückstellmoment mindestens eines Reifens und/oder ein Lenkwinkel mindestens eines Rads (6, 8) verwendet wird.
4. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, bei dem eine aktuelle, gemessene Zahnstangenkraft in einen ersten Anteil, der die Nachlaufstrecke der Reifen auf den Rädern (6, 8) umfasst, und in einen zweiten, konstruktiven Anteil, der eine Kinematik der Achse (4) umfasst, unterteilt wird.
5. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, bei dem die Nachlaufstrecke auf einer Strecke mit hohem Reibungsbeiwert in Abhängigkeit von einer auf das Kraftfahrzeug (2) wirkenden Seitenkraft F_{sv} bestimmt wird.
6. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, bei dem eine dynamische Radlast für mindestens ein vorderes Rad (6, 8) als Funktion einer Querb beschleunigung oder einer dazu äquivalenten Größe, die auf das Kraftfahrzeug (2), insbesondere bei einer Kurvenfahrt, wirkt, bestimmt wird, wobei ein Verhalten eines kurveninneren und eines kurvenäusseren Rads (6, 8) nach Bedarf unterschiedlich abgebildet wird.
7. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, bei dem die Achskinematik der Achse (4), insbesondere der vorderen Achse (4) des Kraftfahrzeugs (2), und deren Einfluss auf ein Verhalten einer Kraft- und Drehmomentenübertragung von einem resultierenden Punkt einer Krafteinleitung in einer Aufstandsfläche mindestens eines Rads (6, 8) bis zu einem Ort einer Messung der Kraft oder des Drehmoments an der Achse (4) berücksichtigt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem ein Verhalten der Reifen und/oder der Nachlaufstrecke des mindestens einen Rads (6, 8) in dem resultierenden Punkt in der Aufstandsfläche des mindestens einen Rads (6, 8) auf der Fahrbahn durch variable Fahrbetriebszustände, durch Kräfte, die auf das mindestens eine Rad (6, 8) wirken, und durch unterschiedliche Lasten, die auf das mindestens eine Rad (6, 8) wirken, beeinflusst wird.
9. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, bei dem die Ermittlung des Reibungsbeiwerts oder der davon abgeleiteten Größe nur dann durchgeführt wird, wenn nachfolgende Bedingungen erfüllt sind:
 - die Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugs (2) ist größer als ein hierfür vorgesehener minimaler Wert,
 - die Querb beschleunigung des Kraftfahrzeugs ist größer als ein hierfür vorgesehener Wert,
 - Einflüsse von Antriebs- und Bremsmomenten an der Achse (4) und/oder den Rädern (6, 8) zu vernachlässigen sind, da sie unterhalb kritischer Schwellwerte liegen,
 - eine zweite Ableitung und eine dritte Ableitung des Lenkwinkels nach der Zeit unterschreiten jeweils hierfür vorgesehene maximale Werte und/oder der Lenkwinkel befindet sich außerhalb eines Bereichs eines Nulldurchgangs für Lenkwinkel, und
 - das Verhältnis der Geschwindigkeit des Lenkwinkels zur Geschwindigkeit des Kraftfahrzeugs (2) und der Bremsdruck sind jeweils kleiner als ein hierfür vorgesehener Schwellwert.

10. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, bei dem aus erfassten Betriebsparametern eine wirksame Nachlaufstrecke und eine bei hohem Reibungsbeiwert zu erwartende theoretische Nachlaufstrecke berechnet werden und für die berechnete wirksame Nachlaufstrecke ein Ausschlusskriterium überprüft wird, wobei für den Fall, dass eine Prüfung dieses Ausschlusskriteriums positiv ausfällt, festgestellt wird, dass keine neue zuverlässige Abschätzung des Reibungsbeiwerts zwischen den Reifen und der befahrenen Fahrbahn möglich ist, und für den Fall, dass die Prüfung des Ausschlusskriteriums negativ ausfällt, ein Wert der Querbesehleunigung überprüft wird, wobei für den Fall, dass der Wert der Querbesehleunigung größer als ein unterer Grenzwert und kleiner als ein oberer Grenzwert ist, die Betriebsparameter zur Auswertung der Zahnstangenkraft erneut angepasst werden, wobei für den Fall, dass die Querbesehleunigung größer als der obere Grenzwert oder gleich dem oberen Grenzwert ist, ein Vergleich von Werten einer theoretischen Nachlaufstrecke mit Werten der wirksamen Nachlaufstrecke durchgeführt wird und wobei für den Fall, dass Werte der theoretischen Nachlaufstrecke kleiner als Werte der wirksamen Nachlaufstrecke sind, die Betriebsparameter zur Auswertung der Zahnstangenkraft erneut angepasst werden, und wobei für den Fall, dass Werte für die theoretische Nachlaufstrecke und die wirksame Nachlaufstrecke um maximal einen Toleranzwert voneinander abweichen, ermittelt wird, dass die Querbesehleunigung aktuell zu gering ist, und dass keine neue zuverlässige Abschätzung des Reibungsbeiwerts zwischen den Reifen und der befahrenen Fahrbahn möglich ist, und wobei für den Fall, dass Werte der theoretischen Nachlaufstrecke um den Toleranzwert größer als jene der wirksamen Nachlaufstrecke sind, ein maximal nutzbarer Kraftschluss und somit der Reibungsbeiwert abgeschätzt wird.

11. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, bei dem für mindestens eine Kenngröße des Kraftfahrzeugs (2) ein gespeicherter Wert berücksichtigt wird, wobei zu regelmäßigen Zeitpunkten und/oder bei Vorliegen eines charakteristischen Betriebsbereichs des Kraftfahrzeugs (2) ein aktueller Wert für die mindestens eine Kenngröße des Kraftfahrzeugs ermittelt wird, und wobei der bislang gespeicherte Wert für die mindestens eine Kenngröße an den aktuellen Wert adaptiert wird, um damit das Verfahren mittels Anpassung an sich ändernde Kenngrößen des Kraftfahrzeugs (2) und/oder der Reifen langzeittauglich zu machen.

12. Verfahren zum Betreiben eines Kraftfahrzeugs (2), das eine Lenkanlage (10) mit einer Zahnstange (12) aufweist, mit der Räder (6, 8) an einer Achse (4), auf denen Reifen aufgezogen sind, inklusive zugehöriger Radaufhängungen des Kraftfahrzeugs (2) gelenkt werden, wobei das Kraftfahrzeug (2) auf einer Fahrbahn bewegt wird, bei dem in einer Lernphase, die während mindestens einer Fahrt des Kraftfahrzeugs (2) durchgeführt wird, Wertepaare jeweils aus Werten für eine aktuelle Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} der Zahnstange (12) sowie aus Werten für eine auf das Kraftfahrzeug (2) wirkende, aktuelle Seitenkraft F_{Sv_akt} , die aus fahrdynamischen Betriebsparametern berechnet werden, ermittelt werden, wobei aus mehreren Wertepaaren eine Steigung m_{akt} für mindestens eine Gerade, die eine Proportionalität zwischen der aktuellen Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} und der aktuellen Seitenkraft F_{Sv_akt} beschreibt, ermittelt wird, wobei für die Steigung gilt:

$$m_{akt} = \frac{\sum_{t=1}^T \Delta F_{Sv_akt}(t) * \Delta F_{Zst_akt}(t)}{\sum_{t=1}^T \Delta F_{Sv_akt}(t)^2}$$

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, bei dem in einer Lernphase, die während mindestens einer Fahrt des Kraftfahrzeugs (2) durchgeführt wird, Wertepaare jeweils aus Werten für die aktuelle Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} der Zahnstange (12) sowie aus Werten für die auf das Kraftfahrzeug (2) wirkende, aktuelle Seitenkraft F_{Sv_akt} , die aus fahrdynamischen Betriebsparametern berechnet werden, ermittelt werden, wobei aus mehreren Wertepaaren eine Steigung m_{akt} für mindestens eine Gerade, die eine Proportionalität zwischen der aktuellen Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} und der aktuellen Seitenkraft F_{Sv_akt} beschreibt, ermittelt wird, wobei für die Steigung gilt:

$$m_{akt} = \frac{\sum_{t=1}^T \Delta F_{Sv_akt}(t) * \Delta F_{Zst_akt}(t)}{\sum_{t=1}^T \Delta F_{Sv_akt}(t)^2}$$

14. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, bei dem zum Bestimmen des Reibungsbeiwerts ein Zusammenhang zwischen der Zahnstangenkraft F_{Zst} und einer Seitenkraft F_{Sv} , die auf das Kraftfahrzeug (2) wirkt, genutzt wird.

15. Verfahren nach einer der Ansprüche 12 bis 14, bei dem nach der Lernphase über einen Gefahrenindikator GI eine mögliche Abweichung der aktuellen Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} von einer Referenz-Zahnstangen-

kraft F_{Zst_ref} unter Berücksichtigung einer konstruktiven Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k}$ bestimmt wird, wobei für den Gefahrenindikator GI gilt:

$$GI = \left(\frac{F_{Zst_akt} - F_{Zst_akt_k}}{F_{Zst_ref} - F_{Zst_akt_k}} \right)$$

16. Verfahren nach Anspruch 15, bei dem eine maximal mögliche Seitenkraft F_{Sv_max} berechnet wird, die erreicht wird, wenn die aktuelle Zahnstangenkraft F_{Zst_akt} der konstruktiven Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k}$ entspricht, wobei für die maximal mögliche Seitenkraft unter Berücksichtigung einer Proportionalität k_{Sv} zwischen einer konstruktiven Zahnstangenkraft $F_{Zst_akt_k}$ und der Seitenkraft F_{Sv} und einer Steigung a_{Sv} zum Beschreiben einer Proportionalität zwischen der Referenz-Zahnstangenkraft F_{Zst_ref} und der Seitenkraft F_{Sv} gilt:

$$F_{Sv_max} = \left| \frac{F_{Zst_akt} - a_{Sv} * F_{Sv_akt}}{k_{Sv} - a_{Sv}} \right|$$

17. Verfahren nach Anspruch 15 oder 16, bei dem für den Fall, dass ein Wert des Gefahrenindikators GI größer als ein Grenzwert wird, ein Warnsignal bereitgestellt wird, und bei dem für den Fall, dass ein Wert des Gefahrenindikators GI kleiner als ein Grenzwert wird, unter Berücksichtigung einer Normalkraft F_{Nv} ein Reibungsbeiwert μ berechnet wird, für den gilt:

$$\mu = \left(\frac{F_{Sv_max}}{F_{Nv}} \right)$$

18. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, bei dem die Lernphase durchgeführt wird, nachdem Räder (6, 8) des Kraftfahrzeugs (2) neu bereift worden sind.

19. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, bei dem das Verfahren mit einem geringstmöglichen Signal-Umfang betrieben wird.

20. System zum Betreiben eines Kraftfahrzeugs (2), das eine Lenkanlage (10) mit einer Zahnstange (12) aufweist, mit der Räder (6, 8) an einer Achse (4), auf denen Reifen aufgezogen sind, inklusive zugehöriger Radaufhängungen des Kraftfahrzeugs (2) gelenkt werden, wobei das Kraftfahrzeug (2) auf einer Fahrbahn bewegt wird, wobei das System ein Steuergerät (16, 16a) aufweist, das dazu ausgebildet ist, einen Reibungsbeiwert oder eine davon abgeleitete Größe zwischen einem jeweiligen Reifen und der Fahrbahn unter Berücksichtigung eines Fahrzustands, einer Kinematik der Lenkanlage, einer Kinematik der Achse (4), eines Verhaltens der Reifen auf den Rädern (6, 8) und/oder deren Nachlaufstrecke als charakteristische Größe zu ermitteln, wobei das Steuergerät (16, 16a) dazu ausgebildet ist, sich ändernde Betriebsparameter des Kraftfahrzeugs (2) und der Reifen durch eine Lernphase, die während mindestens einer Fahrt des Kraftfahrzeugs (2) durchzuführen ist, zu erkennen und zu berücksichtigen.

Es folgen 11 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

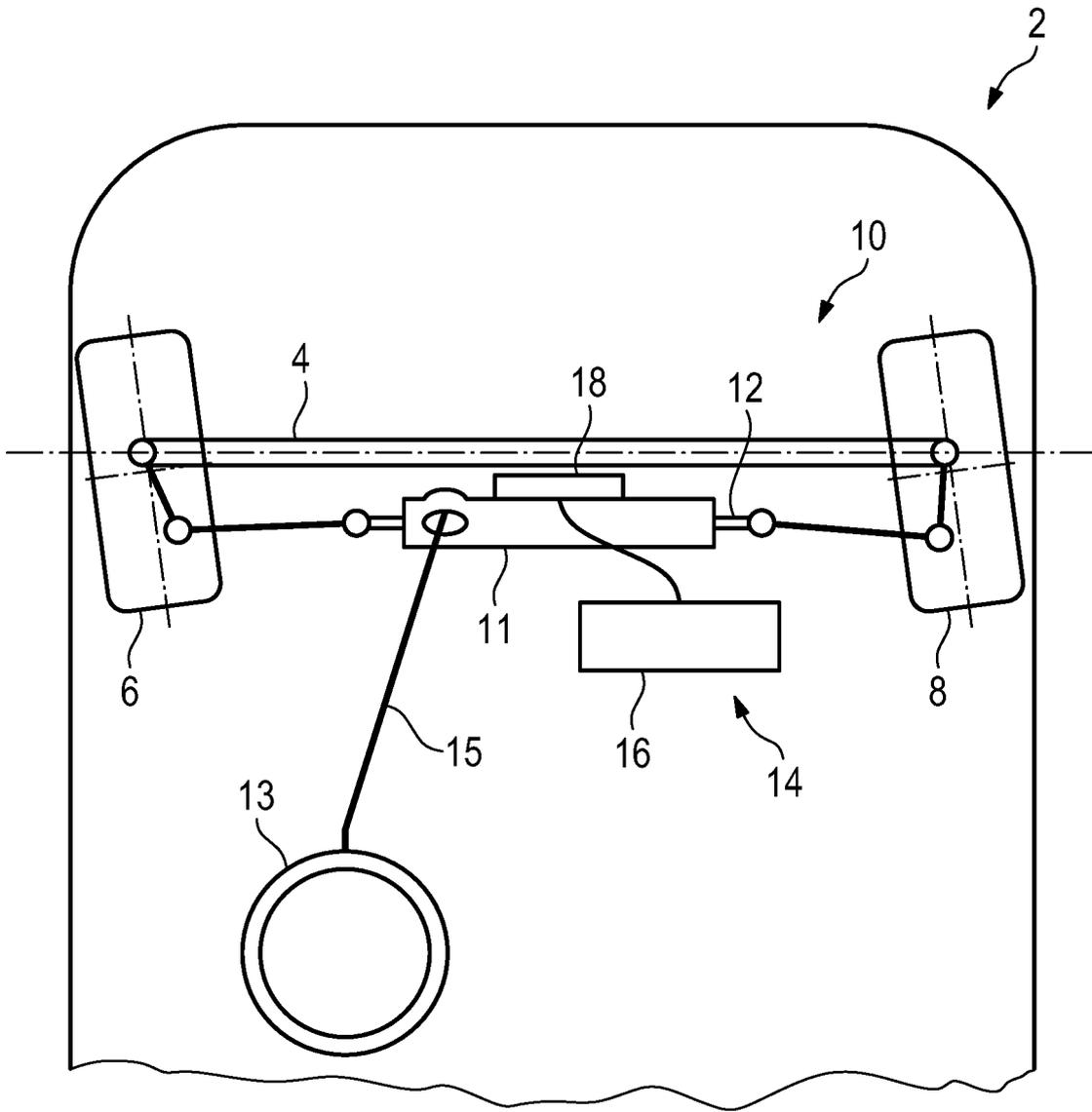
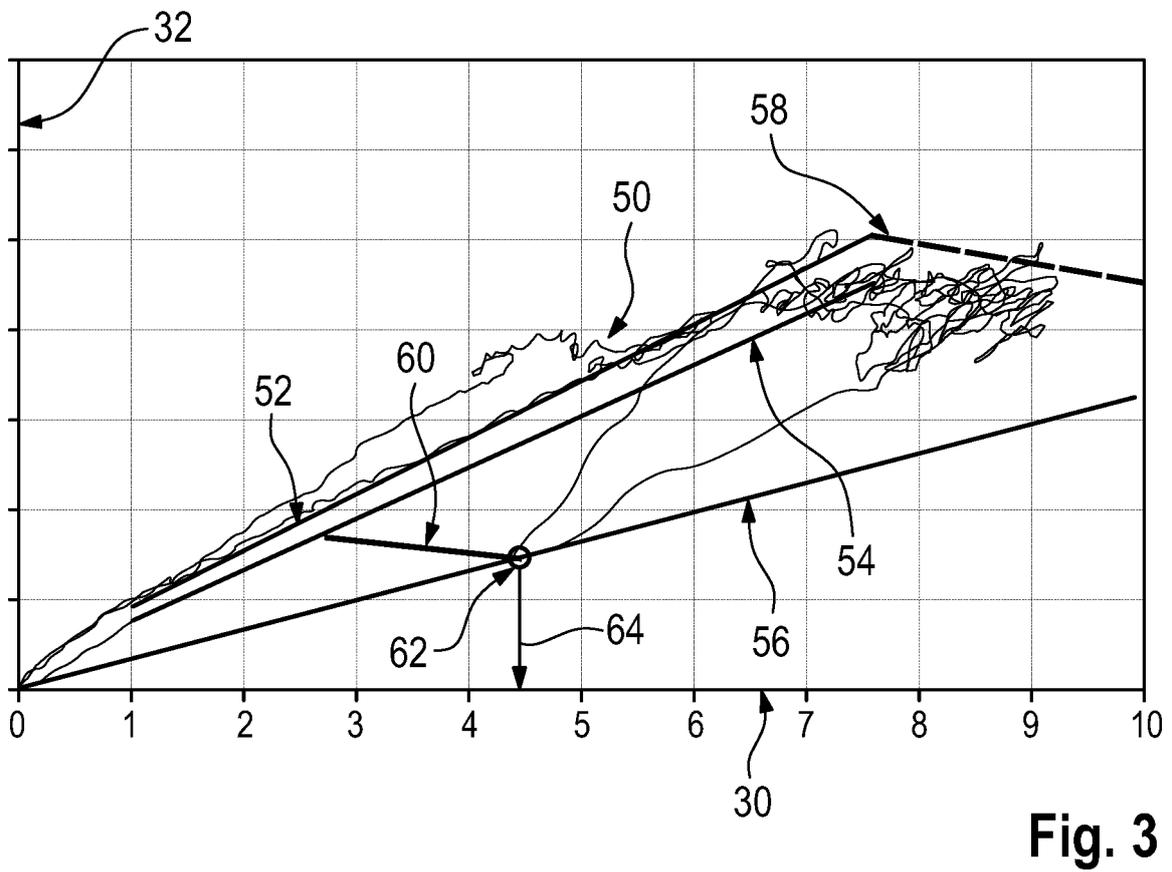
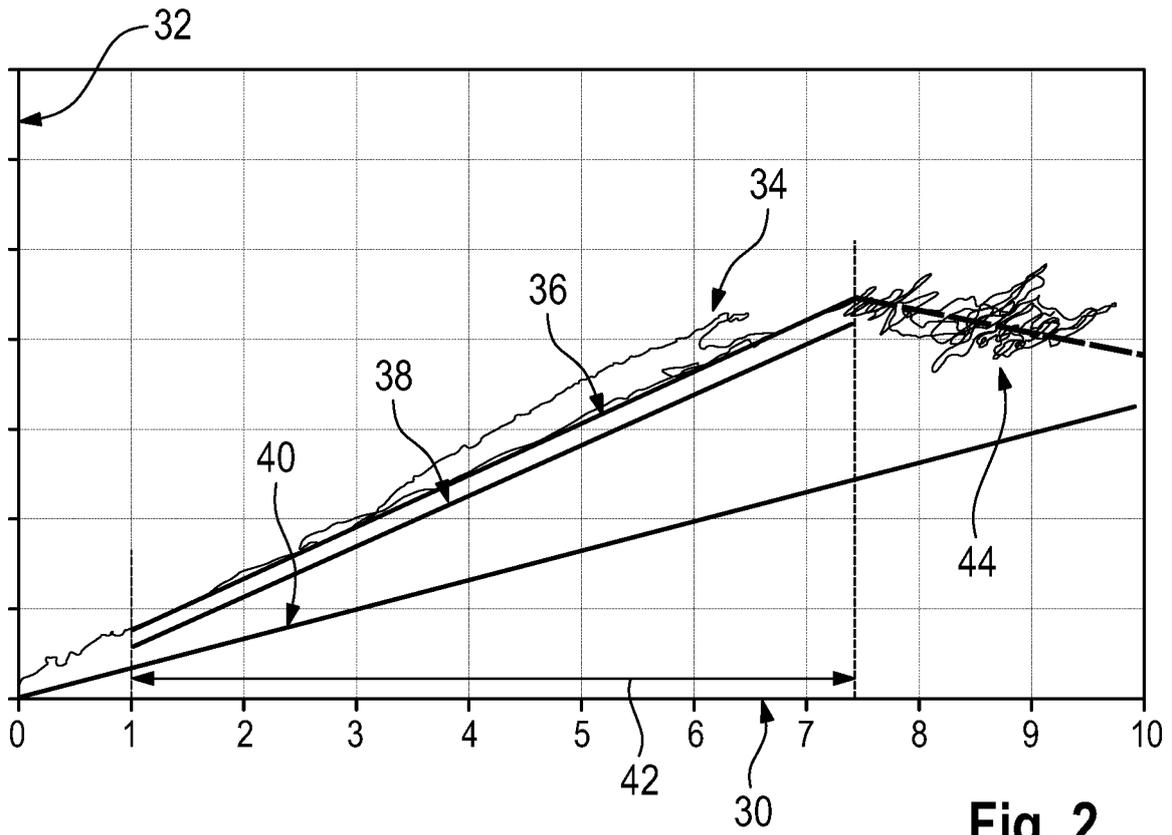


Fig. 1



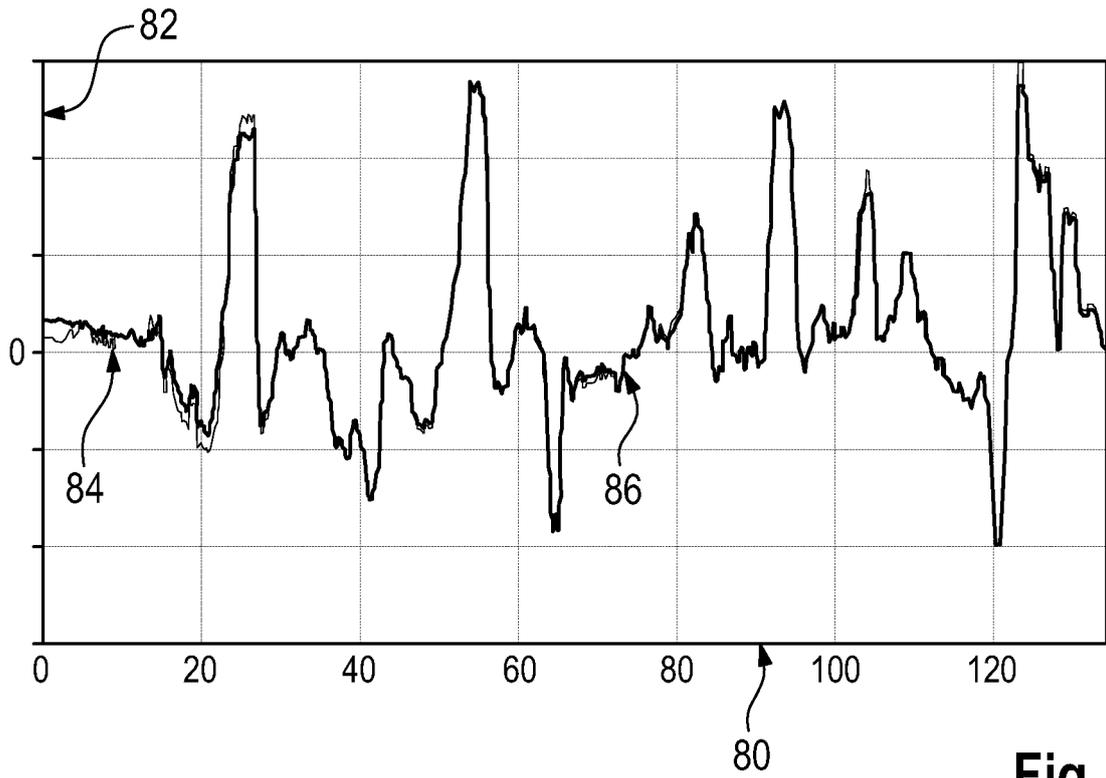


Fig. 4

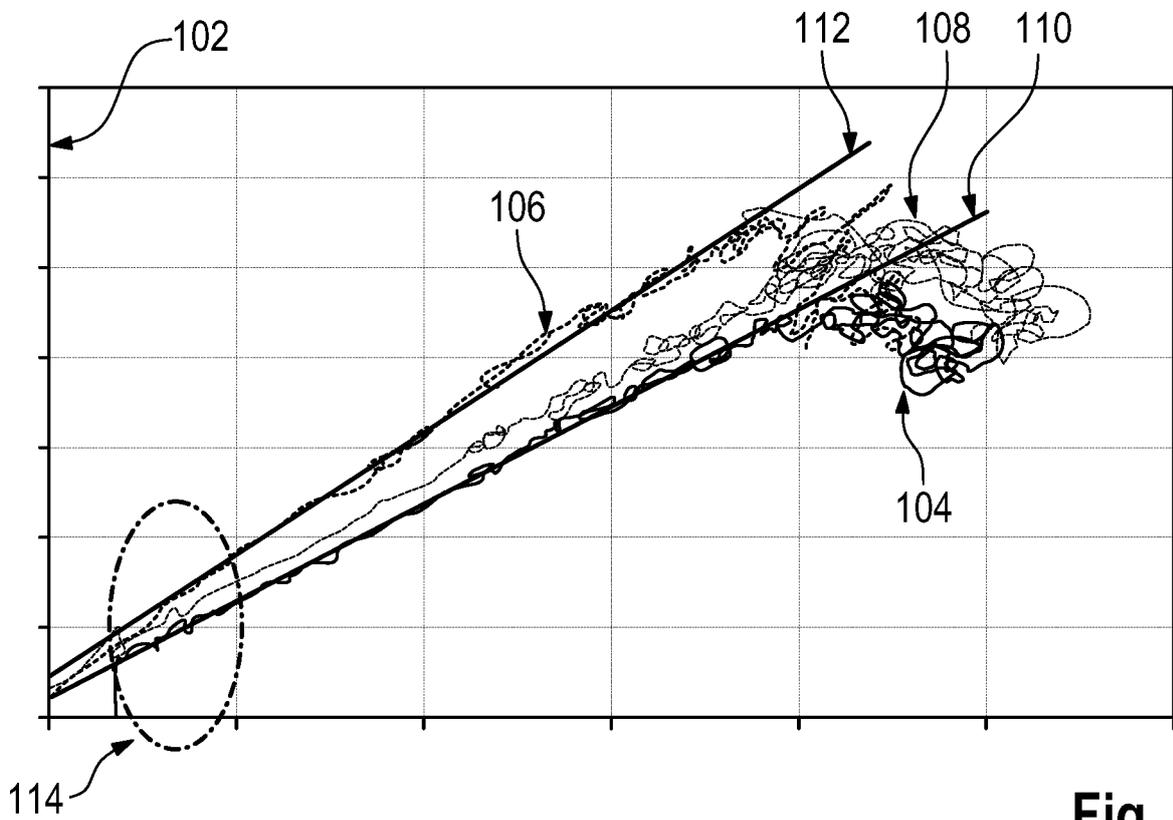


Fig. 5

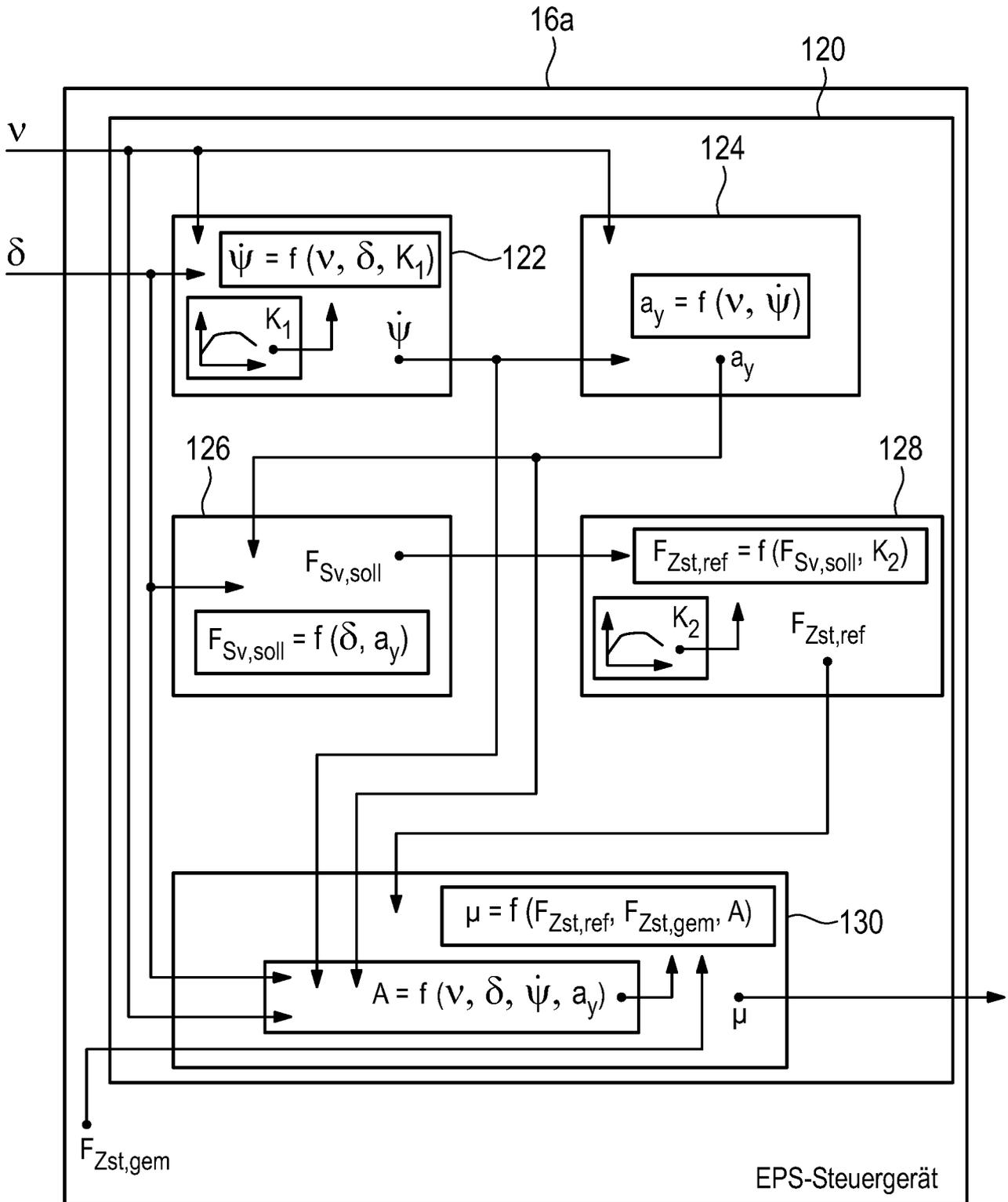


Fig. 6

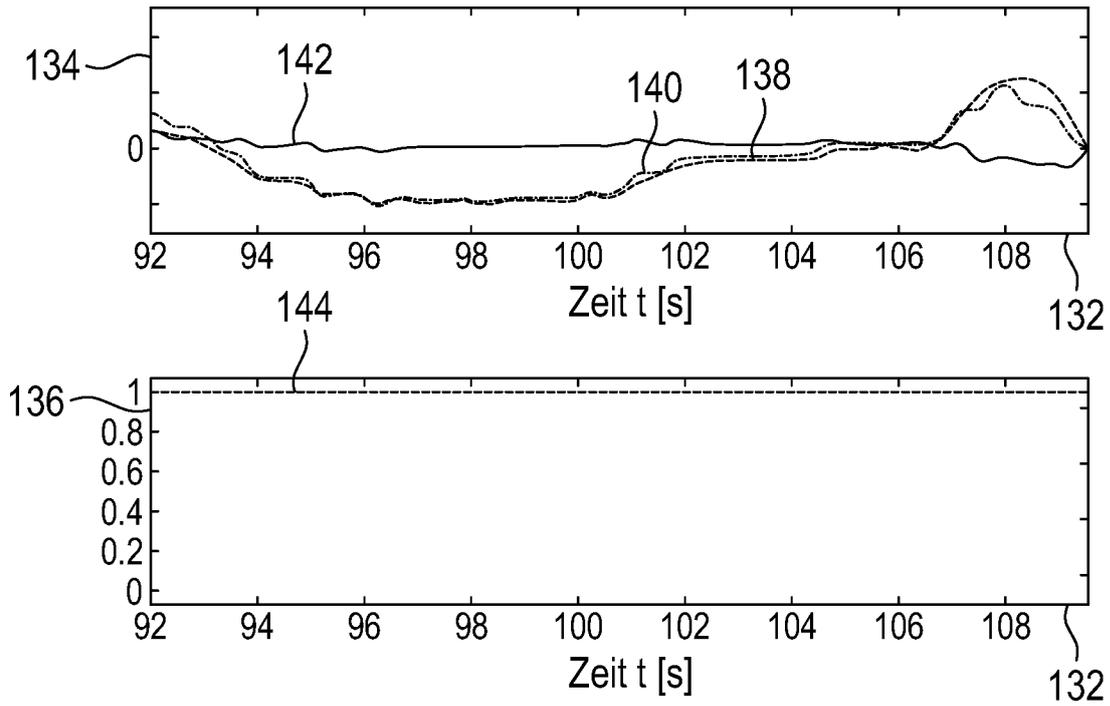


Fig. 7

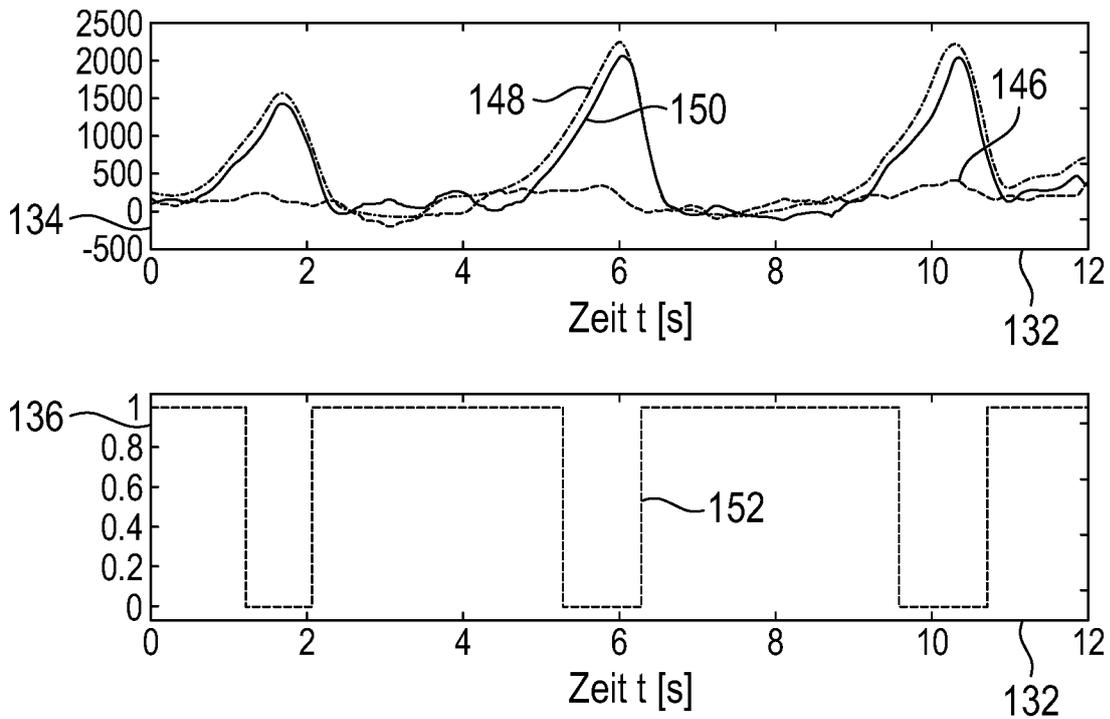


Fig. 8

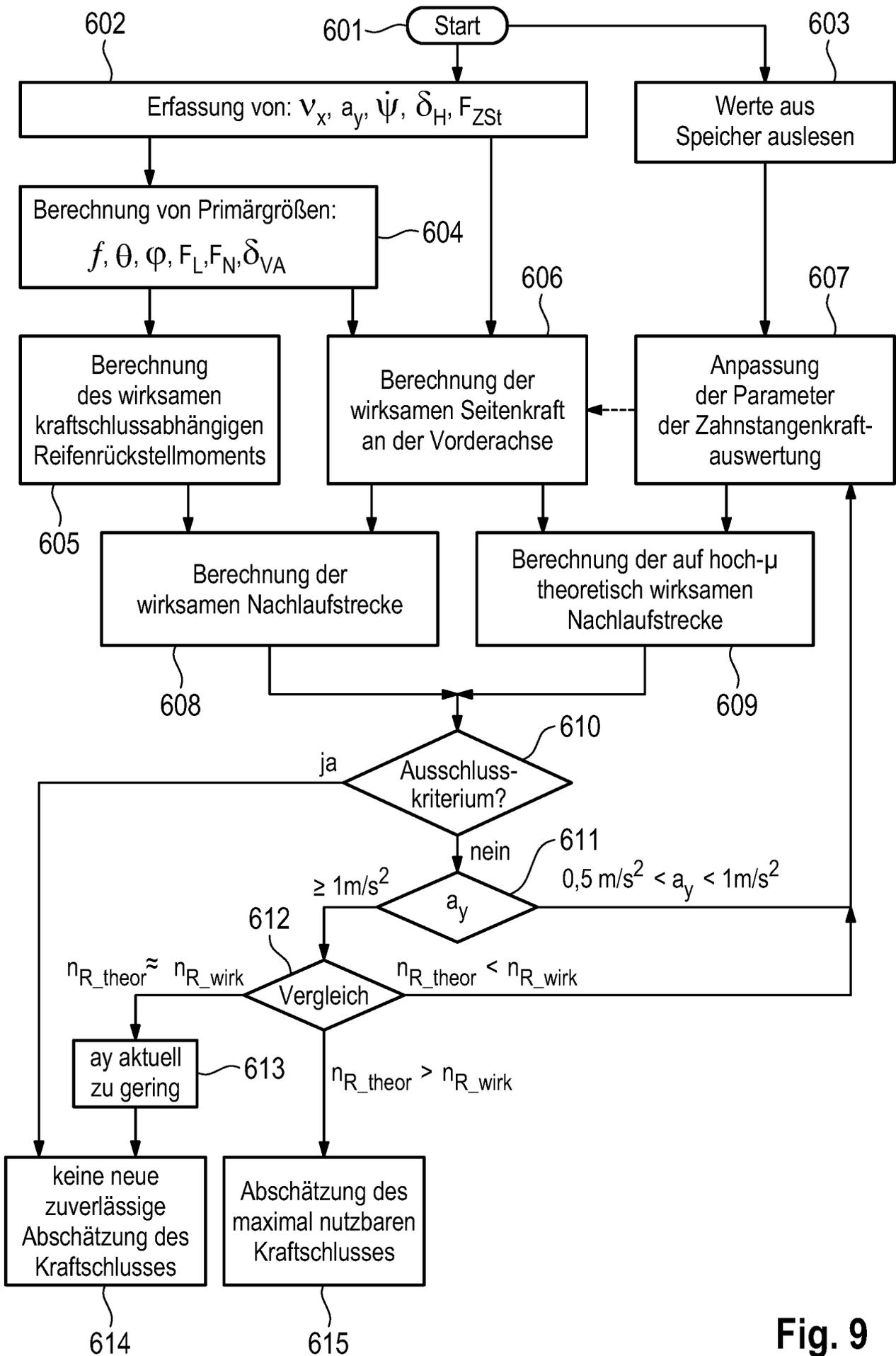


Fig. 9

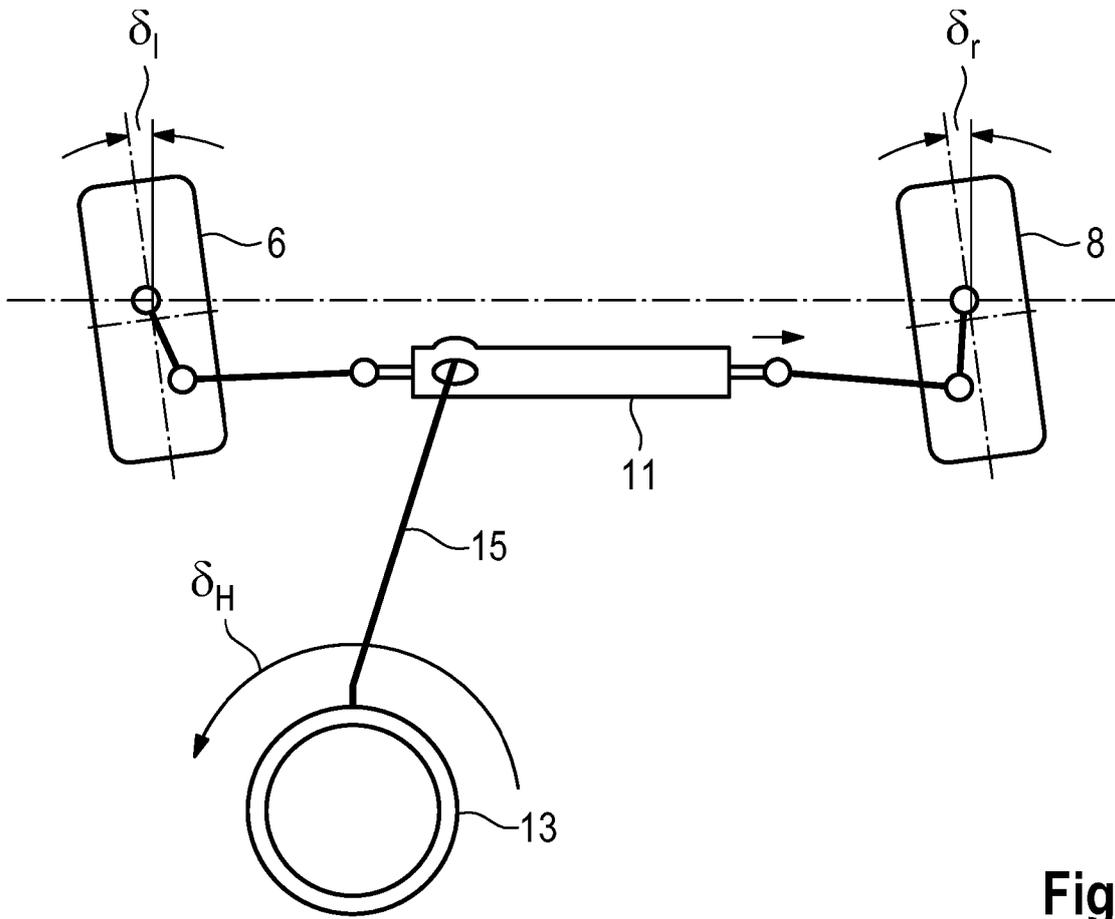


Fig. 10

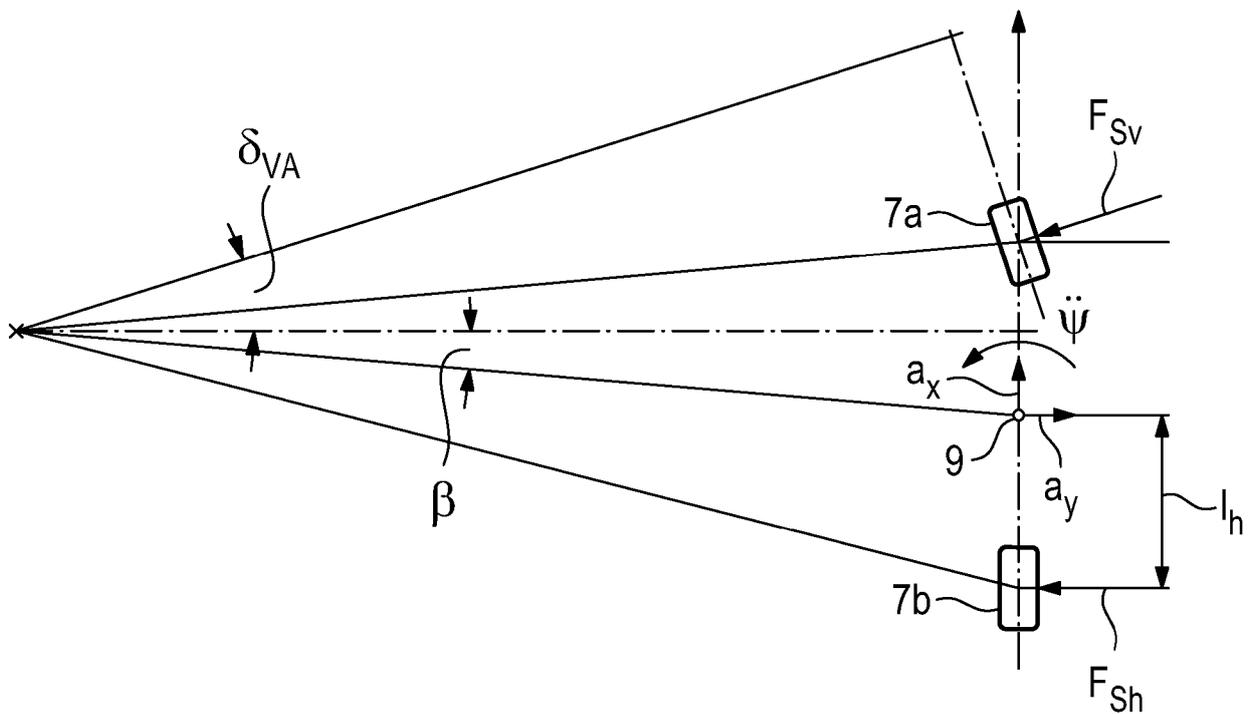


Fig. 11

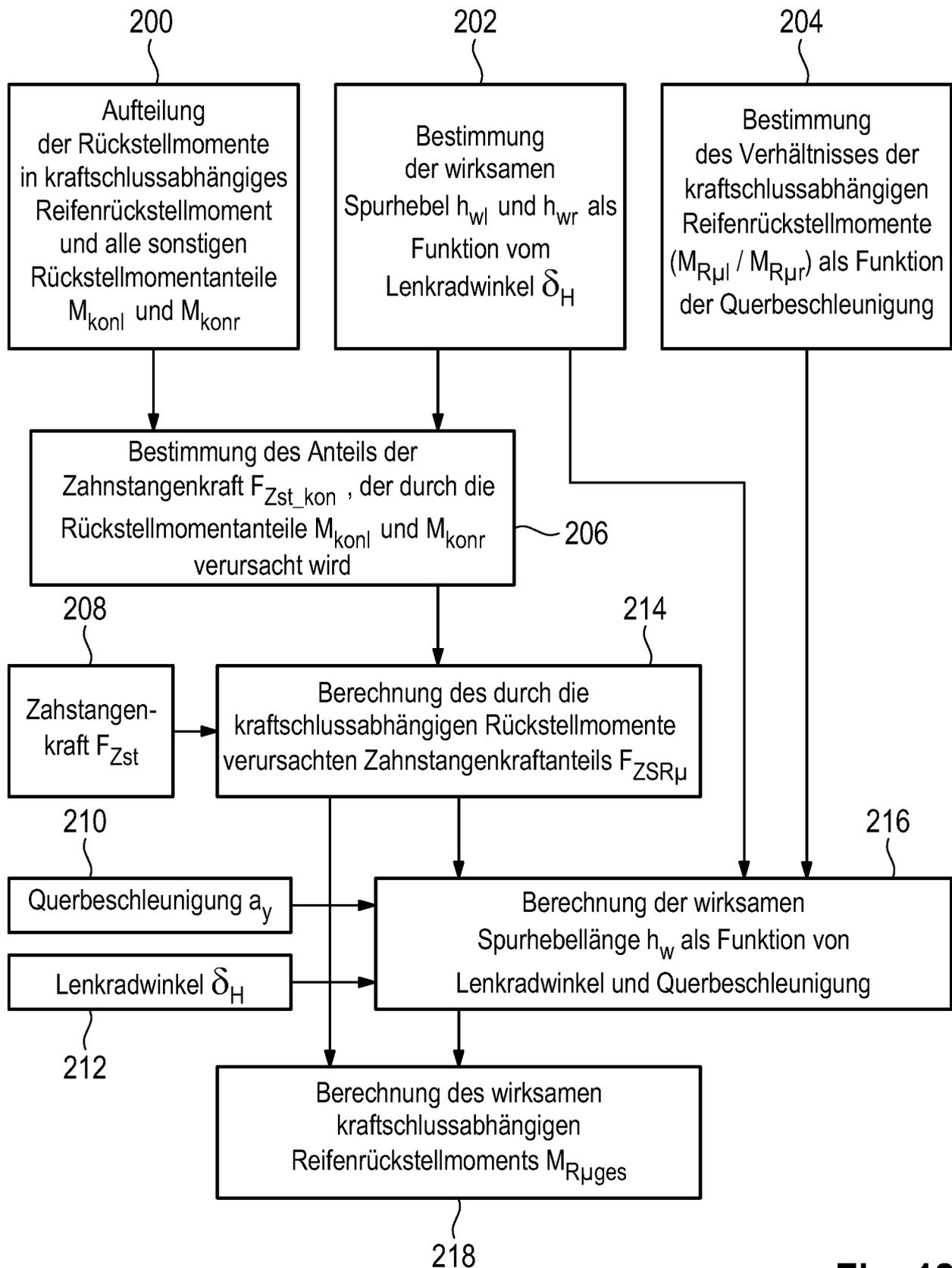


Fig. 12

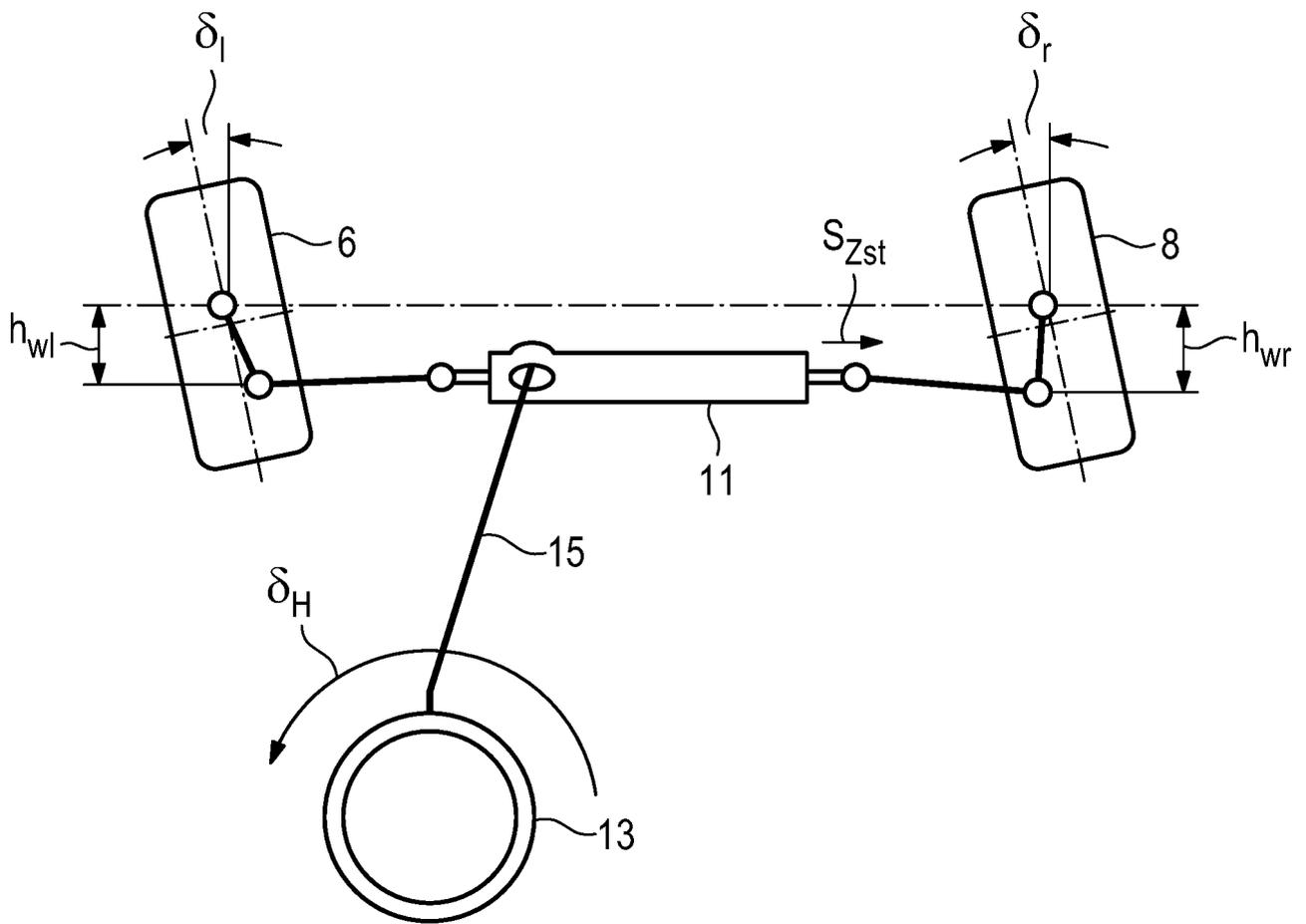


Fig. 13

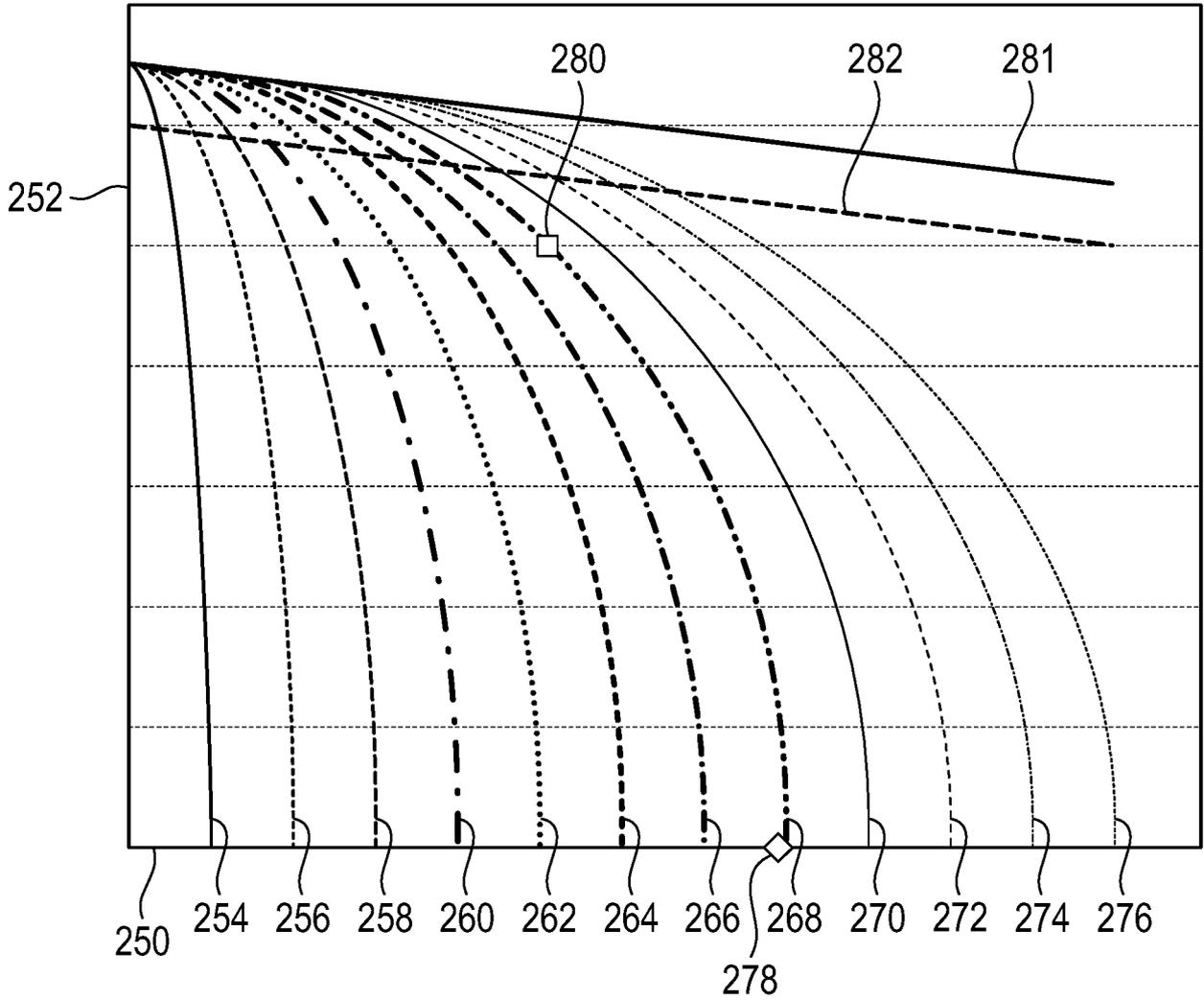


Fig. 14

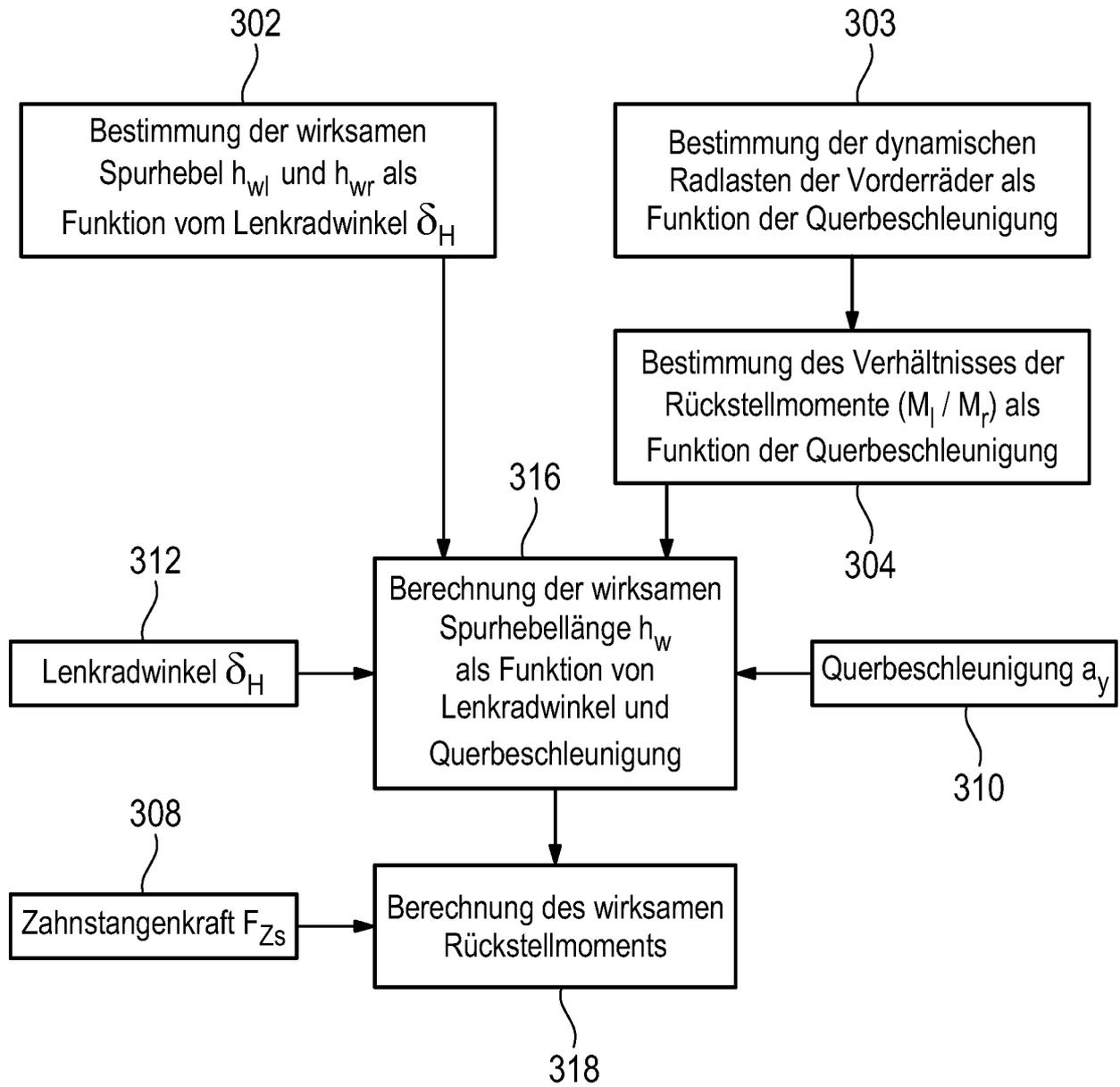


Fig. 15