

(12) **Gebrauchsmusterschrift**

(21) Anmeldenummer: GM 187/2011
(22) Anmeldetag: 04.04.2011
(24) Beginn der Schutzdauer: 15.07.2011
(45) Veröffentlicht am: 15.09.2011

(51) Int. Cl. : **B60L 7/18** (2006.01)

(73) Gebrauchsmusterinhaber:
VE VIENNA ENGINEERING FORSCHUNGS-
UND ENTWICKLUNGS GMBH
A-1210 WIEN (AT)

(54) **ELEKTROFAHRZEUG MIT RADINDIVIDUELLEN REIBUNGSBREMSEN UND RADINDIVIDUELLEM ANTRIEB UND BREMSVERFAHREN DAFÜR**

(57) Um ein für ein Elektrofahrzeug mit radindividueller Reibungsbremse und radindividuellem elektrischem Antrieb optimales Bremssystem zu realisieren, wird vorgeschlagen, im Bremsfall an einem angetriebenen Rad $2_1, 2_2, 2_3, 2_4$ durch die Reibungsbremse 4 und/oder den als regenerative Bremse arbeitenden Elektromotor 6,11 ein Grundbremsmoment einzustellen, das durch ein durch den Elektromotor (6,11) erzeugtes Modulationsbremsmoment überlagert wird und im Elektrofahrzeug (1) neben einer Batterie (9) eine weitere Energiesenke (10) vorzusehen, um die bei einer Bremsung entstehende regenerative Energie aufnehmen zu können

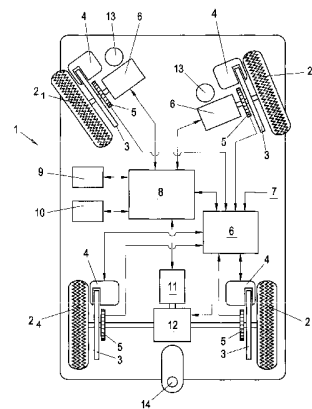


Fig. 1

Beschreibung

ELEKTROFAHRZEUG MIT RADINDIVIDUELLEN REIBUNGSBREMSSEN UND RADINDIVIDUELLEM ANTRIEB UND BREMSVERFAHREN DAFÜR

[0001] Die gegenständliche Erfindung betrifft ein Elektrofahrzeug mit einer Reibungsbremse an jedem Rad des Fahrzeugs, wobei zumindest die Räder einer Achse des Fahrzeugs durch einen Elektromotor radindividuell angetrieben sind und der Elektromotor sowohl als Antrieb, als auch als regenerative Bremse verwendbar ist, sowie ein Bremsverfahren für ein solches Fahrzeug.

[0002] Bei Elektrofahrzeugen sind in der Regel zwei Bremsen vorhanden, nämlich eine regenerative Bremse (bzw. Antrieb) und eine Reibungsbremse, weil die regenerative Bremse nicht immer die ganze kinetische Fahrzeugenergie schlucken kann. Die Kombination der beiden Bremsen ist dabei als „ein Bremsverfahren“ zu sehen, da für das Fahrzeug die Gesamtwirkung betrachtet werden muss. Die typische Kombination umfasst dabei Reibungsbremsen an den Rädern, vorzugsweise radindividuell einstellbar, z.B. eine elektrische oder mechatronische Bremse mit den notwendigen Kraftübertragungseinrichtungen wie Getriebe, Hebel, Stangen, Seile, Pumpen, Druckübertragungen (Flüssigkeiten, Gase), Steuereinrichtungen (Elektronik, Ventile) und eine regenerationsfähige Brems-Antriebsmaschine, wie z.B. einen Elektromotor (auch im Generatorbetrieb), einen Schwungradspeicher, einen Druckspeicher, etc., für den Antrieb bestimmter oder aller Räder (die vorzugsweise einzeln steuerbar sind). Das Bremssystem kann dabei von einer Kontrolleinrichtung, z.B. der ECU (electronic control unit), vorzugsweise aus Hardware und Software, gemäß den Anforderungen, äußeren Bedingungen und/oder Vorgaben gesteuert werden.

[0003] Von herkömmlichen Fahrzeugen sind Fahrzeug-Stabilitätssysteme, wie z.B. ABS oder ESP, hinlänglich bekannt. Solche Systeme versuchen das Fahrzeug durch radindividuelle Einstellung von Bremskräften in einem stabilen Zustand zu halten, z.B. im Fall einer Bremsung (ABS) oder in einer Kurvenfahrt (ESP). Solche Stabilitätssysteme kommen natürlich auch bei Elektrofahrzeugen zum Einsatz. Dabei wird heute jedoch die regenerative Bremse im Anlassfall weggeschaltet und rein mit der Reibungsbremse gearbeitet. Der Grund dafür liegt hauptsächlich darin, dass einerseits die heutigen ABS und ESP Steuerungen für die hydraulischen Bremsen gebaut sind und andererseits, dass die bei einer Bremsung entstehende regenerative Energie irgendwo aufgenommen werden muss (in der Regel durch die Batterie). Würde die Batterie beim Bremsen plötzlich voll, könnte sie keinen Strom mehr aufnehmen oder die Bremse könnte aus anderen Gründen, wie z.B. Kälte, Überhitzung, etc., nicht geladen werden, wodurch sich die Bremsungen bzw. das Bremsverhalten mit nicht bestimmbar Auswirkungen auf das Fahrzeug plötzlich verändern würden. Daher wird in heutigen Elektrofahrzeugen aus Sicherheitsgründen in einem Stabilitätsfall (ABS, ESP) ausschließlich auf die Reibungsbremse zurückgegriffen. Das bedeutet aber auch, dass die Reibungsbremse auf den ungünstigsten Bremsfall (z.B. eine Vollbremsung, lange Bergabfahrten) ausgelegt sein muss, obwohl dieser Fall im realen Fahrbetrieb nur sehr selten vorkommt.

[0004] Somit wird in einem bekannten Elektrofahrzeug zum Einen die regenerative Energie nicht optimal ausgenutzt und zum Anderen werden notwendigermaßen groß dimensionierte und nachteilig schwere Reibungsbremsen eingesetzt, was die Ausnutzung der verfügbaren elektrischen Energie (z.B. in Form einer reduzierten Reichweite) verschlechtert.

[0005] Es ist daher eine Aufgabe der gegenständlichen Erfindung die oben genannten Nachteile in einem Elektrofahrzeug durch ein neues Bremssystem bzw. Bremsverfahren auszuräumen.

[0006] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, indem im Bremsfall an einem angetriebenen Rad durch die Reibungsbremse und/oder den als regenerative Bremse arbeitenden Elektromotor ein Grundbremsmoment einstellbar ist, das durch ein durch den Elektromotor erzeugtes Modulationsmoment überlagert ist und im Fahrzeug neben einer Batterie eine weitere Energiesenke vorgesehen ist, um die bei der Bremsung entstehende regenerative Energie aufzunehmen. Die Energiesenke hat ausreichendes Aufnahmepotential, um die entstehende

regenerative Energie aufnehmen zu können. Dazu können im Fahrzeug auch mehrere nebeneinander bestehende Energiesenken vorgesehen sein, die anlassbezogen eingesetzt werden. Damit muss die Reibungsbremse nur mehr einen bestimmten (kleinen) Anteil der Bremsmomente erzeugen, wodurch die Reibungsbremse kleiner dimensioniert werden kann. Erforderlichenfalls darüber hinaus gehende Momente (Brems- oder Antriebsmomente) werden vom Elektromotor erzeugt. Der Elektromotor (Generator) kann elektronisch sehr schnell in seinem Antriebs- oder Bremsmoment geregelt werden. Dieser Vorteil wird im Verfahren für schnelle Eingriffe (z.B. im ABS-ESP Fall) genutzt. Mit dieser schnellen Einstellbarkeit wird ein blockiertes Rad wieder gängig gemacht bzw. bei einem frei drehendem Rad die Blockiergrenze ermittelt, es entsteht dadurch eine Modulation des elektrischen Bremsmoments (bzw. Antriebsmoments). Weiters wird auch im Bremsfall die gesamte regenerative Energie verwertet, was die elektrische Effizienz des Fahrzeuges verbessert.

[0007] Im Sinne der Erfindung sind die Räder einer Achse auch dann radindividuell angetrieben, wenn ein Elektromotor über ein Differential beide Räder einer Achse antreibt, da durch das Differential die radindividuelle Verteilung des elektrischen Antriebsmoments (Bremsmoments) auf die Räder gesteuert werden kann.

[0008] Im Falle einer Bremsung kann es vorkommen, dass die regenerative Energie nicht von der Batterie (als bevorzugte primäre Energiesenke) aufgenommen werden kann, z.B. weil diese bereits vollgeladen ist oder eine Batterieladung aus anderen Gründen derzeit nicht möglich ist. Daher ist eine weitere Energiesenke vorzusehen, die die nicht in der Batterie speicherbare Energie aufnehmen kann. Hier kann als Energiesenke vorgesehen sein:

- [0009]** • Absichtliches nicht Vollladen der Batterie im Normalbetrieb, um im Falle der Bremsung regenerative Energie sicher in der Batterie unterbringen zu können. Z.B. kann auch eine zusätzliche Vorkalkulation vorgenommen werden z.B. nach langer Bergauffahrt: Die regenerative Energie, die später beim Bergabfahren durch die laufende Bremsung wieder frei wird, kann vorab abgeschätzt werden und der Batterieladezustand wird auf ein entsprechendes Niveau gehalten oder gebracht. D.h., dass als weitere Energiesenke die Batterie selbst verwendet wird, die im Normalbetrieb absichtlich nicht optimal ausgenutzt wird.
- [0010]** • Eine elektrische Heizung, auch mit Erzeugung tolerierbarer Übertemperatur (um möglichst viel regenerative elektrische Energie unterzubringen). Auch Umschaltvorrichtungen, mit denen die Wärme zwar in der Heizung umgesetzt wird, aber von der Kabine abgehalten wird, können eingesetzt werden, um möglichst viel elektrische Energie abführen zu können.
- [0011]** • Eine elektrische Klimaanlage, auch mit Erzeugung tolerierbarer Untertemperatur (um möglichst viel elektrische Energie unterzubringen). Auch Umschaltvorrichtungen, mit denen die regenerative Energie zwar umgesetzt, aber die Kälte von der Kabine abgehalten wird, können eingesetzt werden, um möglichst viel elektrische Energie abführen zu können.
- [0012]** • Die Kombination aus Heizung und Klimaanlage um möglichst lange möglichst viel elektrische Energie abzuführen.
- [0013]** • Absichtlicher suboptimaler Betrieb von Generator und Umrichter und der zugehörigen Leistungselektronik bis an die Grenze der erlaubten Verlustleistung, z.B. durch Impulsströme, die höhere Verluste produzieren als Durchschnittsströme. Wenn z.B. statt einem Durchschnittsstrom ein Impulsstrom mit einem Tastverhältnis 1:10 eingestellt wird, erzeugt der 10 fache Impulsstrom die 100-fache Verlustleistung. Auch möglichst hohe Schaltfrequenzen im Umrichter können für zusätzliche Verluste genutzt werden oder kurzfristige, absichtliche Verschlechterungen in der Schaltung eingeschaltet werden.
- [0014]** • Kombination aus Generatorbremsung und Gegenstrombremsung: ein oder einige elektrische Fahrmotoren werden als Generator betrieben und liefern die elektrische

Energie für die Gegenstrombremsung des (der) anderen Fahrmotoren. Gegenstrombremsung bedeutet dabei, dass (soweit durch Strom und Drehmoment zulässig) der Motor absichtlich gegen seine Laufrichtung elektrisch angesteuert wird.

[0015] • Schleppbetrieb eines range-extenders: Wenn ein Hilfsmotor (Verbrennungsmotor) zur Batterieladung (range-extender) vorhanden ist, kann er für Motorbremszwecke von den elektrischen Fahrmotoren (als Generator) über den range-extender Generator (als Motor) im Schleppbetrieb als Motorbremswirkung eines Verbrennungsmotors genutzt werden.

[0016] Natürlich ist als weitere Energiesenke auch eine beliebige Kombination der obigen Energiesenken denkbar.

[0017] Normalerweise wird die Bremskraft für günstiges Fahrverhalten oder gute Bremswirkung verteilt, d.h. relativ viel Bremswirkung vorne, weniger hinten. Um die Bremsen kleiner (kostengünstiger) dimensionieren zu können, kann bei steuerbaren Bremsen für lange schwächere Bremsungen (typisches Bergabfahren) die Verteilung zu Gunsten bester Hitzeverteilung optimiert und erst bei besonderem Bremsbedarf wieder auf günstige Bremswirkung neu verteilt werden. Damit kann die Reibungswärme wärmemäßig günstiger auf die Reibbremsen verteilt werden und ermöglicht so kleiner dimensionierte Reibungsbremsen. Bei dieser „günstigen Verteilung des Reibungsbremsmoments“ kann auch auf Komfort Rücksicht genommen werden, z.B. können Bremsmomente mit Geräuschen (z.B. Quietschen) durch andere Verteilung vermieden werden. Es können auch Reserven hinsichtlich Überhitzung oder Radschlupf aufgebaut werden, indem z.B. an bestimmten Rädern absichtlich weniger gebremst wird oder indem z.B. an den Vorderrädern absichtlich weniger gebremst wird, um diese auf schlechten Straßen (z.B. Eis, Schnee) noch eher lenkbar oder stärker bremsbar zu halten.

[0018] Im Bremsfall, insbesondere bei einer starken Bremsung bzw. in einem Stabilitätsfall, müssen die Bremsmomente der Reibungsbremse und besonders das Bremsmoment bzw. Antriebsmoment der regenerativen Bremse mitunter sehr rasch verstellt bzw. verteilt werden. Das Drehmoment einer elektrischen Maschine (Elektromotor, Generator) kann sehr schnell eingestellt werden, wenn der Maschinenstrom oder das Magnetfeld verstellt wird. Die elektrische Maschine ist daher prädestiniert für die Einstellung solche raschen Momentenänderungen und damit für die Modulation des Bremsmoments. Die Veränderungsgeschwindigkeiten sind durch Induktivitäten begrenzt, wodurch die maximale Stromänderungsgeschwindigkeit bei gegebener Spannung festgelegt ist. Im Vergleich zu mechanischen Einstellungen, wie z.B. der mechatronischen Reibungsbremse mit einem Elektromotor, ist die Verstellbarkeit und die mögliche Geschwindigkeit der Verstellung der elektrischen Maschine trotz begrenzter Stromänderungsgeschwindigkeit sehr viel höher und auch komfortabler, da keine mechanischen Stellgeräusche auftreten.

[0019] Es treten im Betrieb des Fahrzeugs aber nicht nur starke Bremsungen und Stabilitätsfälle auf, sondern die Regel sind vielmehr „normale“ Bremsungen. Bei solchen normalen Bremsungen treten langsame Verteilungsänderungen auf, was als „blending“ bezeichnet wird. Darunter versteht man, dass ein gewisser Teil regenerativ gebremst wird und je nach Fahrgeschwindigkeit und Bremswunsch ein gewisses Bremsmoment der Reibungsbremse oder der regenerativen Bremse zusätzlich eingestellt wird. Das erfindungsgemäße Verfahren kann natürlich auch für ein solches „blending“ verwendet werden, wobei folgende Strategien denkbar sind:

[0020] • Batterie ist ladbar: in diesem bevorzugten Fall wird möglichst hohe Generatorleistung und möglichst wenig Ergänzung durch Reibungsbremse unter Berücksichtigung der Leistungsgrenzen von Generator, Umrichter und Batterie eingestellt. Das Verhältnis zwischen regenerativer Bremse und Reibungsbremse ändert sich z.B. mit der Fahrgeschwindigkeit durch geschwindigkeitsabhängige Generatorwirkung.

[0021] • Batterie nicht ladbar oder kann nicht den gesamten produzierten Strom aufnehmen: möglichst wenig Ergänzung durch Reibungsbremse und Aufnahme der Energie, die nicht in die Batterie geladen werden kann, durch die weitere Energiesenke.

- [0022] • Hitzegünstige Verteilung der Reibbremsmomente.
- [0023] • Geräuschgünstige Verteilung der Reibbremsmomente: Wenn bestimmte Reibbremsmomente zu Geräuschen (z.B. Quietschen) führen, können die Bremsmomente anders aufgeteilt werden, um insgesamt das gleiche Summenmoment bei geräuschärmeren Reibbremsmomenten zu erzeugen. Die Verteilung kann innerhalb der Reibungsbremsen verändert werden oder es kann auch die Verteilung der regenerativen und Reibungsbremsung verändert werden.
- [0024] • Verschleißgünstige Momentenverteilung: die Reibungsbremsen können nach bestimmten Verschleißkriterien verteilt werden wie z.B. gleichmäßiger Verschleiß.
- [0025] • Gesamtoptimale Verteilung: statt dem Optimum bestimmter Einzelkriterien kann ein kombiniertes Optimum eingestellt werden, z.B. möglichst gleichmäßige Wärmeverteilung unter weitgehender Geräuschvermeidung.
- [0026] Ebenfalls ist es denkbar, auch während der Bremsung den regenerativen Anteil eines Rades von einem Bremsmoment auf ein Antriebsmoment zu wechseln, z.B. um ein blockiertes Rad in einem Stabilitätsfall wieder besonders schnell gängig zu machen (schneller als durch bloße Bremsmomentenreduktion möglich wäre).
- [0027] Bei herkömmlichen Bremsen wird zuerst mit einer gegebenen Bremsverteilung begonnen, die aus dem gleichen hydraulischen Druck an allen Rädern stammt. Wenn Räder blockieren oder das Fahrzeug die Spur verlässt, wechselt diese gegebene Verteilung schlagartig in den ABS oder ESP Zustand, um mit dem Blockieren und Loslassen einzelner Räder die Straßenführungskräfte einzelner Räder zu regeln. Im Gegensatz dazu werden besonders vorteilhaft radindividuelle Bremsen vorgesehen, die jede für sich einzeln angesteuert und eingestellt werden können. Ein radindividuelles Bremsmoment kann dabei von einer Reibungsbremse und/oder einem Elektromotor, als Antrieb oder Bremse, herrühren. Damit können immer optimale radindividuelle Bremsmomente erzeugt werden, wodurch ein schlagartiger Umschlag von „vorgegebener Verteilung“ auf ABS-ESP-Verteilung, wie bei herkömmlichen Bremsen, vermieden werden kann. Die optimalen radindividuellen Bremsmomente können unter folgenden Kriterien eingestellt werden:
- [0028] • Maximales Ausnutzen der Straßenhaftung an jedem Rad für beste Verzögerung.
- [0029] • Gierkontrolle: Aus der Lenkradstellung wird ein Wunsch an Gierrate ermittelt und durch Einbringung radindividueller Kräfte ein Drehmoment um eine Gierachse eingeführt, das die gewünschte Gierrate auslöst.
- [0030] • In bestimmten Grenzen kann ein Verzögerungswunsch gleichzeitig mit einem Gierratenwunsch durch radindividuelle Momente erfüllt werden.
- [0031] Dabei können in bestimmten Fällen Situationen entstehen, in denen an bestimmten Rädern Bremskräfte entstehen und an anderen Antriebskräfte. Ein radindividuelles optimales Moment kann auch aus verschiedenen, teilweise widersprüchlichen Forderungen stammen. In diesem Fall kann ein Entscheidungsalgorithmus eine sinnvolle Auswahl treffen. Das kann z.B. die sinnvollerweise Bevorzugung der letzten Fahrerhandlung sein. Wenn der Fahrer also z.B. zuerst bremst und dann lenkt, kann bei Unerfüllbarkeit beider Wünsche der Lenkwunsch mit der vorhandenen Straßenhaftung bevorzugt werden. Es können auch prinzipielle Wunschgrenzen bevorzugt werden. Wenn z.B. der Fahrerwunsch einen Überschlag seitlich (rollen) oder vorwärts (nicken, z.B. bei einem Motorrad) bewirken würde, kann dieser Wunsch grundsätzlich auf einen unschädlichen Eingriff begrenzt werden. Es können auch physikalisch sinnvolle Maßnahmen bevorzugt werden, z.B. die kinetische Energie des Fahrzeuges für einen Unfall soweit als möglich zu reduzieren, wofür auch Assistenzsysteme des Fahrzeuges, wie z.B. ein Abstandsassistent, eine Hinderniserkennung, etc., genutzt werden können.
- [0032] Wenn das Fahrzeug in einem fahrdynamisch problemlosen Zustand ist, was statistisch die allermeiste Zeit im Betrieb ausmacht, können energie-, verschleiß- oder komfortgünstige Optimierungen durchgeführt werden, z.B. wie oben beschrieben.

[0033] Radindividuelle Eingriffe können aber nicht nur im Falle einer Bremsung erfolgen, sondern auch während des laufenden Betriebs des Fahrzeugs. Z.B. sind folgende Anwendungen denkbar:

- [0034]** • Wenn z.B. ein Reifen ungleich abgefahren ist, also „flache Stellen“ hat, so kann versucht werden, den Verschleiß wieder auszugleichen. Dazu kann das Antriebsmoment über längere Fahrstrecken an guten Stellen des Reifens etwas höher werden und an schlechten Stellen etwas niedriger (natürlich alles im Rahmen von Komfort und Geräusch), um den Verschleiß wieder auszugleichen.
- [0035]** • Wenn die Reibungsbremsen über den Reibungsumfang unterschiedliche (ungleichmäßige) Wirkungen (z.B. Bremsmomente, Hitze) entwickeln, kann dies durch Radmessungen erkannt werden und mit dem elektrischen Brems-Antriebsmoment durch zeitlich abgestimmte Überlagerung ausgeglichen werden oder sogar überkompensiert werden, um z.B. überhitzte Stellen weniger zu bremsen und damit wieder eine gleichmäßigere Verteilung zu erwirken.
- [0036]** • Solche absichtlichen kleinen Radmomentschwankungen können auch zur Verbesserung von Messungen am Rad, z.B. einer Schlupfmessung, eingeprägt werden. Bei normaler Fahrt können die Radmomente recht klein sein, z.B. wenn nur der Fahrzeugwiderstand überwunden werden muss oder durch leichte Bergabfahrt überhaupt nur Momente um Null benötigt werden. In solchen Fällen können kleine Momentenschwankungen eine Radschlupfmessung verbessern und so kritische Situationen (wie z.B. Schnee, Eis, Schotter), die auch einseitig vorliegen können schneller zu Erkennen bzw. bereits zu erkennen bevor sie durch blockierende Räder auffallen.
- [0037]** • Die herkömmliche Motorbremswirkung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wirkt normalerweise über ein Differential auf eine Antriebsachse. Sie ist immer vorhanden und wird normalerweise auch beim Bergabfahren besonders genutzt. Dabei wird noch wenig oder gar nicht zusätzlich gebremst und über diese ungleichen Radkräfte wird die Haftungsgrenze deutlich empfunden. Dieses Verhalten kann mit einer radindividuellen Momentenkontrolle nachempfunden werden, so dass z.B. der Eindruck von Differential, Differentialsperre oder Allradantrieb (auch im Bremszustand) simuliert werden kann, um dem Fahrer die bekannten Gefühle zur Haftungsabschätzung zu bieten. Auf diese Art kann z.B. auch ein Hinterradantrieb in einstellbarer Weise simuliert werden, der beim Gasgeben übersteuert oder ausbricht. Allgemein kann damit jede Art der Vorwarnung des Fahrers durch radindividuelle Eingriffe herbeigeführt werden, insbesondere eine solche, die auch mit herkömmlichen Antrieben entsteht.

[0038] Bisher wurde von radindividuellen Drehmomenten gesprochen. Diese ergeben natürlich an der Radauflage auf der Fahrbahn über den Radius eine Radkraft in Laufrichtung des Rades. An einem Fahrzeugrad ist immer eine Kraft in Laufrichtung kombiniert mit einer Kraft in Seitenrichtung (Seitenführungskraft) möglich, wobei auch eine oder beide gerade Null sein kann. Vektoriell entsteht aus den beiden normal zueinander stehenden Kräften eine resultierende Kraft. Das kann in ein radkraftorientiertes Modell zur Regelung der Bremse einfließen. Dieses radkraftorientierte Modell kann zu „torque vectoring“ führen, also dem Lenken und Beschleunigen bzw. Verzögern des Fahrzeuges mit Kraftvektoren, die an den Rädern eingebracht werden. Dieses Steuerungsverfahren arbeitet nach der Berechnungsmethode, dass der Summenkraftvektor als Vektorsumme aller wirkenden Radkraftvektoren entsteht. Das Giermoment ist die Summe aller Momente um einen Punkt, also die Summe der Radkraftvektoren multipliziert mit deren Normalabstand zu einem definierten Punkt und dem Summenkraftvektor multipliziert mit dem Normalabstand zu dem definierten Punkt. Der definierte Punkt kann (muss aber nicht) der Fahrzeugschwerpunkt sein. So kann das eingebrachte Giermoment um die Gierachse durch den Schwerpunkt ermittelt werden. Nach dieser Berechnung können die einzelnen Radkraftvektoren durch Drehmomentänderung so gestaltet werden, dass das Fahrzeug die gewünschte Kurve (oder geradeaus mit Kurvenradius unendlich) fährt. Wenn Haftgrenzen überschritten

werden, muss die vektorielle Berechnung neu mit reduzierten Kräften durchgeführt werden, um das „torque vectoring“ und die Stabilität des Fahrzeuges aufrecht zu halten.

[0039] Wenn die Räder auch noch einzeln oder in Gruppen lenkbar sind, kann das radkraftorientierte Modell um einen radindividuellen Lenkwinkel erweitert werden. Somit kann an jedem Rad nicht nur die Radkraft in Laufrichtung sondern auch die Seitenführungskraft eingestellt werden. Wenn Haftgrenzen überschritten werden, muss die vektorielle Berechnung neu mit den reduzierten Kräften und/oder anderen Einzelradlenkwinkel durchgeführt werden, um das „torque vectoring“ und die Stabilität des Fahrzeuges aufrecht zu halten. Wenn nur wenige Lenkwinkel beeinflussbar sind (z.B. nur Vorderradlenkung) funktioniert das Verfahren natürlich gleichermaßen, mit dem Unterschied, dass weniger Größen beeinflussbar sind. Wenn eine Radlenkung darüber hinaus noch absichtlich oder unabsichtlich durch andere Einflüsse (z.B. Einfederung und Geometrie der Radaufhängung) entsteht, funktioniert das Verfahren ebenfalls gleich, mit dem Unterschied, dass zustandsgegebene Größen berücksichtigt werden können.

[0040] Beispiel für Vorteile des Lenkeingriffs: Wenn z.B. die linke Fahrzeugseite gute Fahrbahn (Asphalt) und die rechte Seite schlechte Fahrbahn (Eis) hat, wie es durchaus praxisnah ist, könnte man die „guten“ Räder sehr stark bremsen, aber jene auf Eis fast nicht. Dadurch wird ein starkes Giermoment durch die stark einseitige Bremsung eingebracht. Ohne Lenkeingriff müsste die Steuereinheit zwischen guter Verzögerung (die durch Asphalt möglich wäre) und Richtungsstabilität entscheiden, z.B. nach obiger Methode „Bevorzugung des letzten Fahrerwunsches“. Beides zugleich ginge nicht. Mit zusätzlichem Lenkeingriff kann hingegen einseitig stark gebremst werden und durch automatisches leichtes Gegenlenken gleichzeitig die Fahrtrichtung gehalten werden. Wobei beides natürlich nur im Rahmen physikalischer Grenzen möglich ist.

[0041] Um das oben beschriebene erfindungsgemäße Bremsverfahren zu ermöglichen, können auch unterschiedliche Messungen vorgesehen sein.

[0042] Wenn das Fahrzeug einen Gierratensensor hat (wie heute bei ESP üblich) kann anhand der Gierratennmessung festgestellt werden, ob die durch das Bremsverfahren bewirkte Gierrate dem Sollwert entspricht, den man aus der Lenkradstellung erwarten würde. Regeleingriffe des Bremsverfahrens können die tatsächliche Gierrate an die gewünschte heranführen. Damit kann z.B. automatische Stabilität bei einer einseitigen Kollision herbeigeführt werden, indem das Fahrzeug bei einem ungewollten Drehen durch die Gierrateneinstellung wieder in einen gewünschten Zustand gebracht wird. Ein anderer Anwendungsfall ist z.B. bei Anhängerbetrieb (oder stark ungünstiger Beladung), bei dem am Fahrzeug zusätzliche Kräfte angreifen. Die Gierrateneinstellung kann dabei versuchen, das Fahrzeug im gewünschten Zustand zu führen.

[0043] Für die sehr schnell mögliche Raddrehmomentbeeinflussungen muss auch die Raddrehzahl in einem weiten Geschwindigkeitsbereich schnell gemessen werden können. Derzeit sind zur Drehzahlmessung an den Rädern Zahnscheiben vorgesehen, die in der Regel magnetisch abgetastet werden. Die Zählung von Zähnen in einer Torzeit (wie oft üblich) ist für das erfindungsgemäße Verfahren nur bei hohen Geschwindigkeiten möglich, denn dann laufen auch in einer kurzen Torzeit (für schnelle Messergebnisse) genügend Zähne für ausreichende Genauigkeit vorbei. Bei niedrigen Geschwindigkeiten liefert eine solche Messung kein ausreichend genaues Messergebnis für eine schnelle Raddrehmomentbeeinflussung. Für eine ausreichend schnelle und genaue Messung kann stattdessen die Zeit zwischen zwei Zähnen gemessen werden. Damit kann auch bei kleinen Geschwindigkeiten schnell mit guter Auflösung gemessen werden, da Zeitmessungen prinzipiell sehr genau sind. Nachteilig wirkt sich die Ungenauigkeit der Zahnabstände aus, da damit ständig andere Geschwindigkeiten vorge-täuscht werden. Da heute zur Messung Mikroprozessoren verwendet werden können, lassen sich diese Genauigkeitsfehler aber messen und kompensieren. Genauso können ungleiche Radradien (z.B. durch Toleranzen des Reifens auf der Felge oder stärker abgefahrene Stellen am Reifen) herausgefiltert werden. Federbewegungen des Rades können eine veränderliche Raddrehzahl ergeben, wobei auch dieser Effekt herausgefiltert oder unterdrückt werden kann, wenn die Federbewegung (wirklich oder durch Modelle) bekannt ist.

[0044] Der Radschlupf kann vergleichend gemessen werden (Räder zueinander), in zeitlicher Veränderung (z.B. wenn sich Raddrehzahlen schneller ändern als dies laut Fahrzeugmodell (Masse, Straßenkräfte) möglich ist oder bezüglich der Fahrzeuggeschwindigkeit über Grund (die z.B. aus Dopplereffekt oder Zeitverhalten eines auf die Fahrbahn gesendeten und teilweise zurückgeworfenen Signales), aus anderen empfangenen Signalen (z.B. Radiosender oder GPS Signal) oder aus einer normalen GPS Messung ermittelt wird. Dieser Radschlupf kann Hinweise auf die Straßenhaftung geben, bevor der Fahrer durch ungünstige Haftung überrascht wird.

[0045] Bei einer herkömmlichen hydraulischen Bremse wird durch gleichen Druck an allen Rädern eine gleichmäßige Anpresskraft bewirkt. Bei radindividuell einstellbaren Reibungsbremsen (z.B. mechatronischen, elektrischen Bremsen wie in der WO2009/062880 A1 beschrieben) kann das eingestellte Bremsmoment nach verschiedenen Methoden ermittelt werden. Dazu kann entweder der mechanische Spannungszustand in der Bremszange ermittelt werden (z.B. durch Dehnspannungssensoren), oder der Bremsweg ermittelt werden, der in Zusammenhang mit der Bremskraft und damit dem Bremsmoment steht. Ebenso ist über den Aktuatorstrom ein Rückschluss von Strom auf Bremskraft bzw. Bremsmoment möglich. Dabei kann unter Umständen auch ein Selbstverstärkungsanteil der Bremse berücksichtigt werden.

[0046] Bei der elektrischen Maschine kann durch Messung oder Modellierung der elektrischen Zustände sehr gut auf das Drehmoment geschlossen werden. Wenn an der elektrischen Maschine Verstellungen vorgenommen werden, kann über den bekannten Beitrag der elektrischen Maschine und der Reaktion (der Raddrehzahl oder des Radschlupfes oder anderer Radmesswerte wie z.B. Einfederung der Radaufhängung) auf das Gesamtmoment und damit auf den Beitrag der Reibungsbremse geschlossen werden. Damit können die Reibungsbremsen auch auf ihre untereinander gleichmäßige Bremswirkung geprüft bzw. nachgeregelt werden, indem bei bekanntem (eventuell an bestimmten oder allen Räder gleichen) elektrischem Bremsantriebsmoment die Wirkung (siehe oben) auf die Räder ermittelt und verglichen wird.

[0047] Die Ermittlung des Bremsmoments ist auch durch Messung der Mitnahmekraft am außenbordseitigen Bremsbelag möglich. Bei den häufig verwendeten Schwimmsattelbremsen wird der außenbordseitige Bremsbelag nach Anpressung an die Bremsscheibe mitgenommen. Diese Mitnahmekraft kann als Abstützkraft gemessen werden, z.B. piezoelektrisch oder durch Beobachtung der Längenänderung einer zur Abstützung dienenden Feder. Wenn diese Feder (aus Kosten- und Platzgründen) nicht sehr kräftig ist, kann dennoch (durch Wegmessungen oder auch durch bloße Schalter oder Positionsgeber) festgestellt werden, wie lange die Feder den Belag gegen Mitnahme stützen kann und ab wann der Belag gegen den üblichen Anschlag wandert. Damit ist ein Punkt auf der Kennlinie zwischen Ansteuerung der Reibungsbremse und dem Reibmoment ermittelbar, der bei Betätigung der Bremse durchlaufen wird. Aus diesem Punkt kann bei bekannten Daten der Bremse auf andere Reibbremsmomente geschlossen werden. Z.B. hängt in einem (üblichen) einfachen Reibmodell die Reibkraft linear proportional mit der Anpresskraft und dem Reibbeiwert zusammen. Aus der Beobachtung obiger Feder (an einem Punkt oder in einem Bereich) kann die entstehende Reibkraft gemessen werden und mittels des Reibmodells geschlossen werden, welche Eingangsdaten zu einer bestimmten Reibkraft führen. So kann z.B. aus der Position (oder dem Motorstrom des Aktuators oder anderer bekannter oder zugänglicher Daten der Reibbremse) bei einem bestimmten Zustand obiger Feder (z.B. genau während der Schalter betätigt wird) auf die notwendigen neuen Einstelldaten der Reibbremse (z.B. Position, Motorstrom, anderer bekannter oder zugänglicher Daten) für neu zu erzeugende Bremsmomente über das Reibmodell (z.B. dem einfachen linearen Zusammenhang) geschlossen werden. Damit kann vorhersagbares Bremsmoment trotz möglichen Veränderungen (Reibbeiwert, Parameter in der Bremse) aus einem Bereich oder Punkt der Federbeobachtung erzielt werden, sozusagen der beobachtbare Bereich oder Punkt auf größere Bereiche oder den ganzen Bremsmomentbereich extrapoliert werden. Die Modelle der Reibung und Bremse können natürlich genauer sein als nur z.B. proportional. Wenn beide Bremsbeläge an der Bremsscheibe und beide Scheibenseiten gleich oder sehr ähnlich sind, kann angenommen werden, dass der innenbordseitige Belag einen sehr ähnlichen Beitrag leistet (der auch aus Modellen genauer ermittelt werden kann) und damit kann die Gesamtreibkraft und bei bekannt-

ter Geometrie das Bremsmoment ermittelt werden. Das Verfahren kann auch als Soll-Ist Vergleich gesehen werden: Die Modellierung der Bremse (mit Reibbelag) ergibt einen Erwartungswert, bei welcher Bremseinstellung obige Feder welche Positionen einnehmen sollte. Das wird damit verglichen, wann diese Federzustände tatsächlich eintreten und aus der Abweichung kann geschlossen werden, wie das Modell der Bremse (mit Reibbelag) korrigiert werden muss. Mit dem so korrigierten Modell wird die Abweichung von den Istzuständen anders (sinnvollerweise geringer) und in einem oder mehreren Schritten wird durch Modellanpassung eine immer kleiner Abweichung eingestellt.

[0048] Das erfindungsgemäße Bremsverfahren kann auch noch weitere Umstände berücksichtigen. Wenn z.B. an bestimmten Rädern keine Elektromotoren (oder andere Antriebe mit Brems- und Antriebseigenschaften) vorhanden sind, kann auf diesen Rädern das gegenständliche Verfahren auf einstellbare Bremsmomente beschränkt werden.

[0049] Wenn Räder über ein Achsdifferential angetrieben werden und radindividuell einstellbare Reibungsbremsen vorliegen, ist das gegenständliche Verfahren trotzdem an diesen Rädern möglich. Das Differentialeingangsmoment wird dazu auf zwei Ausgangsmomente (wobei die Übersetzungsverhältnisse eine Rolle spielen) verteilt. Das Radmoment ist die Vorzeichenrichtige Summe aus dem Moment aus dem Differential und der Reibungsbremse (unter Berücksichtigung eventueller Übersetzungen). Damit kann bei steuerbarem Differentialeingangsmoment und radindividuell steuerbaren Bremsen aus diesem Zusammenhang das verfahrenstypische radindividuelle Brems- bzw. Antriebsmoment erzeugt werden. Somit spielt es für das Verfahren auch keine Rolle aus welcher Energiequelle der Antrieb stammt oder in welche Energieform die Antriebsmaschine die regenerative Energie (z.B. elektrisch, mechanisch, pneumatisch oder hydraulisch) im Bremsfall umwandelt.

[0050] Daraus ergibt sich, dass Mischantriebe wie z.B. Verbrennungskraftmaschine über Vorderachsdifferential und Elektromotor(en) an der Hinterachse genauso verfahrenstypisch betrieben werden können. In diesem Falle wäre noch der Betriebszustand „Antreiben und Bremsen gleichzeitig“ sogar (oder besonders) über gewisse Zeit interessant, da damit Energie vom Verbrennungsmotor über die Straße an die Elektromotoren (als Generator) zur Batterieladung transportiert werden kann und somit ein zusätzlicher Generator am Verbrennungsmotor vermieden werden kann.

[0051] Die Radaufhängung kann ungleichförmige Drehgeschwindigkeiten ins Rad einbringen, wenn das Rad Federbewegungen macht. Es kann auch eine Aufhängung gewählt werden, die besonders starke ungleichförmige Drehung bei Federung bewirkt, z.B. wenn das Rad an einem Schwingenarm angeordnet ist und die Antriebswelle durch den Schwingendrehpunkt geht und Radachse und Antriebswelle z.B. über Zahnräder verbunden sind. Solche ungleichförmigen Rotationen können Effekte bewirken, die in der Bremsenregelung berücksichtigt werden können. Wenn bei Federbewegung das Antriebsmoment konstant bleibt, ergeben sich Drehzahländerungen, das Federverhalten bleibt dabei jedoch unbeeinflusst. Wenn bei Federbewegung die Antriebsdrehzahl konstant bleibt, ergeben sich Momentenänderungen. Daraus resultieren Gegenkräfte zum Federverhalten und das Federverhalten wird dadurch erschwert. Dies kann auch so eingestellt und genutzt werden, dass es bestimmten Stärken eines Stoßdämpfers entspricht. Wenn bei Federbewegung richtungsabhängig verschiedene Wirkungen vorliegen (z.B. wenig gedämpftes Einfedern, stärker gedämpftes Ausfedern) entsteht eine Wirkung ähnlich den üblichen bewegungsrichtungsabhängigen Stoßdämpfern. Mit einem solchen simulierten Stoßdämpferverhalten kann eine Analogie zu einem herkömmlichen Stoßdämpfer geschaffen werden. Der herkömmliche setzt die zur Dämpfung entzogene Energie in Wärme um. Bei der Simulation kann die Energie auch elektrisch entnommen werden und somit wiederum genutzt oder gespeichert werden.

[0052] Die Kenntnisse, die vom Bremsverfahren über das Fahrzeug gewonnen werden, können natürlich auch weitergegeben werden, z.B. können Airbags ausgelöst oder Gurte gestrafft werden. Straßenzustände oder bremsende (ausweichende) Fahrzeuge können anderen Fahrzeugen (oder auch Leitstationen) mitgeteilt werden (z.B. über Funk). Ebenso kann z.B. die Schein-

werfereinstellung korrigiert werden.

[0053] Brems-, Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitsvorgaben können außer vom Fahrer natürlich auch aus anderen Quellen stammen, z.B. aus einer Cruise Control. Ebenso können Lenkwünsche außer vom Fahrer auch von anderen Systemen herrühren, z.B. aus einem Assistenzsystem zur Hindernisumfahrung oder Spurhaltung.

[0054] Gleichfalls können mit dem Bremsverfahren auch Assistenzsysteme zur Verfügung gestellt werden, wie z.B. automatische Handbremse und Anfahrhilfe (Hill Holder) oder Hill Descent Control (Aufbau eines „Keiles“ aus Fahrbahnmaterial unter den Rädern bei Bergabfahrten im Gelände).

[0055] Das Verfahren kann auch automatisch auf Sonderfälle wie z.B. Schneeketten (auch ungleich montiert, an einzelnen Rädern oder Achsen, auch mit ungleicher Wirkung wie z.B. beschädigte oder verschiedene Ketten) reagieren, weil es die neue Schlupf- und Giersituation bemerkt oder es kann seine Einstellungen dafür ändern (eventuell auch vom Benutzer umschaltbar). Im Sinne obiger Anpassung des Brems- bzw. Antriebsmomentes auf Gegebenheiten über den Radumfang kann auch auf ungleiche Wirkung von Ketten über den Radumfang eingegangen werden (ob z.B. Teile der Kette fehlen oder z.B. gerade die Kette auf der Fahrbahn liegt oder gerade der Reifen) reagiert werden, indem das Moment an diese Zustände angepasst wird.

[0056] Es können auch weitere Bremsen ins Verfahren einbezogen werden, wie z.B. verschiedene Retarder (z.B. LKW).

[0057] Das Verfahren kann zusätzlich für Stabilität bei Fahrzeugen mit Anhängern und Sattelauflieger gegen „jack-knife“ (Einknicken) sorgen. Der Anhänger kann dabei vom Verfahren mit kontrolliert bzw. gebremst werden oder es wird nur das Zugfahrzeug zusätzlich gegen die Anhängerkräfte stabilisiert.

[0058] Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 7, die schematisch vorteilhafte, nicht einschränkende Ausführungsbeispiele zeigen, näher erläutert. Dabei zeigt

[0059] Fig. 1 ein Elektrofahrzeug mit einem erfindungsgemäßen Bremssystem,

[0060] Fig. 2 bis 6 die Zustände bei einem radkraftorientierten Modell zur Steuerung der Bremse und

[0061] Fig. 7 eine bevorzugte Messung des Radbremsmoments.

[0062] Das stark vereinfachte und schematisch dargestellte Fahrzeug 1 der Fig. 1 hat vier Räder 2_1 , 2_2 , 2_3 , 2_4 die radindividuell angetrieben sind. Die Vorderräder 2_1 , 2_2 werden dazu jeweils direkt durch einen Elektromotor 6 angetrieben. Die Räder 2_3 , 2_4 der Hinterachse sind über ein Differential 12 durch einen weiteren Elektromotor 11 angetrieben. Diese Räder 2_3 , 2_4 der Hinterachse könnten aber ebenso, so wie Vorderräder 2_1 , 2_2 , direkt durch jeweils einen eigenen Elektromotor angetrieben sein. Jedes Rad 2_1 , 2_2 , 2_3 , 2_4 besitzt darüber hinaus eine radindividuelle Reibungsbremse 4, also eine einzeln ansteuerbare und einstellbare Reibungsbremse 4, die über eine Bremsscheibe 3 (oder Bremstrommel) in bekannter Weise auf die Räder 2_1 , 2_2 , 2_3 , 2_4 wirkt. An jedem Rad ist weiters ein Radrehzahlsensor 5 (oder ein Sensor für eine äquivalente Messgröße) vorgesehen.

[0063] Radindividuell steuerbare und einstellbare Reibungsbremsen sind heute vorzugsweise elektrisch angetrieben (denkbar auch aus anderen Energien), wobei der Motor an der Reibungsbremse angeordnet sein kann, aber auch von der Ferne wirken kann. Es sind zwischen Motor und Reibungsbremse in der Regel immer Verbindungselemente wie Getriebe, Stangen, Hebel, Seile, Gase, Flüssigkeiten vorhanden. Es können aber auch von einem oder mehreren zentralen Motoren (elektrisch oder auf anderen Energien basierend) alle Reibungsbremsen individuell betätigt werden, indem die Verteilung gesteuert wird, z.B. über Hebel oder Ventile.

[0064] An den lenkbaren Rädern 2_1 , 2_2 , hier die Räder der Vorderachse, können in bekannter

Weise auch Lenkservomotoren 13 vorgesehen sein, wie in Fig. 1 angedeutet, z.B. zur Realisierung von steer-by-wire.

[0065] Ebenso kann am Fahrzeug 1 auch eine Anhängerkupplung 14 mit einer Schnittstelle zur Signal- und Energieübertragung zwischen einem (nicht dargestellten) Anhänger und dem Fahrzeug 1 vorgesehen sein.

[0066] Eine ECU 6 (Electronic Control Unit) steuert alle Funktionen und Komponenten des Bremssystems und erhält dazu auch die Messsignale der diversen Sensoren, wie Raddrehzahlsensoren 5 oder anderer Fahrzeugsensoren 7, wie z.B. für Lenkwinkel, Gierrate, Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, etc., und kann auch diverse Steuereingänge, z.B. für Bremspedalstellung, Gaspedalstellung, Gang, etc., aufweisen. Die ECU 6 könnte natürlich auch auf mehrere Einheiten aufgeteilt sein, z.B. eine separate Einheit zur Bremsensteuerung. Ebenso wird die Leistungselektronik 8 für die radindividuellen Antriebe 6, 11 von der ECU angesteuert. Auch die Leistungselektronik 8 kann natürlich auf mehrere Einheiten, z.B. pro Achse oder pro Rad 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ aufgeteilt sein.

[0067] Im Elektrofahrzeug 1 ist weiters eine Batterie 9 vorgesehen, die die Elektromotoren 6, 11 über die Leistungselektronik 8 mit elektrischer Energie versorgt, bzw. die als primäre Energiesenke zur Aufnahme von regenerativer elektrischer Energie vorgesehen ist. Daneben gibt es noch eine weitere Energiesenke 10, wie weiter oben beschrieben, zur Aufnahme von regenerativer Energie, die von der Batterie 9 nicht aufgenommen werden kann.

[0068] Im Nachfolgenden wird unter Bezugnahme auf die Fig. 2 bis 6 ein radkraftorientiertes Modell zur Regelung der Bremse beschrieben. Zum einfacheren Verständnis wird im Folgenden ein allgemeines Fahrzeug 1 in einem allgemeinen Fahrzustand beschrieben. Theoretisch sind die folgenden Ausführungen auch auf beliebig viele Räder in beliebiger Anordnung, wie z.B. einspurig, zweispurig, mehrspurig, mit starrem, lenkbarem (z.B. Knicklenkung) oder gelenkiger Verbindung (Sattelanhänger, Deichselanhänger, Anhänger mit oder ohne Lenkbaren Rädern) anwendbar. Zur vereinfachten Erklärung wird ein zweispuriges Fahrzeug mit vier Rädern 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ mit hauptsächlicher Lenkung der Vorderräder (also ein „normaler“ PKW) dargestellt, bei dem an jedem Rad 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ eine vektorielle Kraft F_{V1} , F_{V2} , F_{V3} , F_{V4} zur Straße auftritt. Diese radindividuelle vektorielle Kraft F_{V1} , F_{V2} , F_{V3} , F_{V4} wird zerlegt in eine Kraft in Radlaufrichtung F_{R1} , F_{R2} , F_{R3} , F_{R4} (Antriebs- oder Bremskraft, in Folge allgemein als Radlängskraft bezeichnet) und eine Kraft normal zur Radlaufrichtung F_{S1} , F_{S2} , F_{S3} , F_{S4} (Seitenführungskraft z.B. bei Kurven- oder Hangneigungsfahrt, in Folge allgemein als Radquerkraft bezeichnet). Diese Radvektorkräfte F_{V1} , F_{V2} , F_{V3} , F_{V4} sind im Allgemeinen weder für jedes Rad 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ gleich (auch nicht an beiden Vorder- und Hinterrädern), noch ist allgemein die Richtung des Kraftvektors gleich. Üblicherweise haben Fahrzeuge 1 Vorderradlenkung, wobei die gelenkten Räder, hier die beiden Vorderräder 2₁, 2₂, günstige und damit unterschiedliche Lenkwinkel einnehmen. Tatsächlich lenken aber alle Räder 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ durch Einfederung und Kräfte mit kleinen Änderungen der Lenkwinkel. Diese kleinen Lenkwinkleingriffe können Null sein (z.B. bei Starrachsen), sie können durch die Geometrie von Einzelradaufhängungen auftreten, sie können bewusst herbeigeführt werden (um z.B. gutes Kurvenfahrverhalten zu erzielen) oder sie können auch absichtlich mit Verstellvorrichtungen (z.B. mit Elektromotoren oder federstellungsabhängiger Mechanik) eingestellt werden. Allgemein wird hier von einem Fahrerwunsch zur Fahrtrichtung und Geschwindigkeit (inklusive Beschleunigung, also eventueller Bremsung oder Geschwindigkeitssteigerung) ausgegangen, der allgemein individuelle Lenkwinkel an allen Rädern 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ und allgemein unterschiedliche Radvektorkräfte F_{V1} , F_{V2} , F_{V3} , F_{V4} an den Rädern 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ bewirkt.

[0069] Man stelle sich z.B. eine Kurvenfahrt mit starker Bremsung vor. Durch dynamische Radlastverteilung bei Bremsung werden die Vorderräder stärker an die Straße gedrückt als die Hinterräder und durch die Zentrifugalkraft werden die Außenräder stärker angedrückt als die Innenräder. Daher hat jedes Rad 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ eine individuelle Anpresskraft auf die Straße, vorne, kurvenaußen am stärksten und hinten, kurveninnen am geringsten (eventuell kann sich das hinten, kurveninnere Rad sogar abheben). Die Fig. 3 zeigt das Fahrzeug 1, das in einer

Kurve bremst, wobei die Kräfte zur Veranschaulichung alle in einer Fläche (Radauflagefläche) und nicht räumlich dargestellt sind. Durch Kurvenfahrt entsteht die Zentrifugalkraft F_z und durch Bremsung die Bremskraft F_B . Ebenso können Massenträgheitskräfte berücksichtigt werden. Diese Kräfte greifen als resultierende Kraft F_R in einem bestimmten Punkt A des Fahrzeuges 1 an. Eine gleichgroße Gesamtradkraft F_{GRad} in entgegengesetzter Richtung muss von allen Rädern 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ gemeinsam aufgebracht werden, um das Fahrzeug 1 in diesem Zustand stabil zu halten. Die Zentrifugalkraft F_z und die Bremskraft F_B entstehen aus dynamischen Veränderungen der jeweiligen Geschwindigkeitskomponente. In jedem Moment muss jedoch Kräftegleichgewicht herrschen, so dass, die Gesamtradkraft F_{GRad} durch vektorielle Kraftsumme der einzelnen Radkraftvektoren F_{V1} , F_{V2} , F_{V3} , F_{V4} entstehen muss, wie in Fig. 4 dargestellt. Neben dem Kräftegleichgewicht ist für einen in jedem Augenblick stabilen Zustand des Fahrzeugs 1 natürlich noch zu fordern, dass die Summe aller Momente um einen Punkt, wie z.B. dem Schwerpunkt, Null sein muss. (Wie aus der Statik bekannt ist, kann auch statt Kräftegleichgewicht Summen der Momente um 3 Punkte äquivalent angewendet werden).

[0070] Fig. 5 zeigt ein Fahrzeug 1, wobei die im jeweiligen Fahrzustand maximal erreichbaren (und damit verfügbaren) Radkraftvektoren F_{V1max} , F_{V2max} , F_{V3max} , F_{V4max} pro Rad 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ als Kreise bzw. Ellipsen eingezeichnet sind. Die Kreise an den Hinterrädern stellen dar, dass beim Hinterradtyp die übertragbaren Kräfte in Radlauflängsrichtung und Radlaufseitenrichtung gleich groß sein können und ein Radkraftvektor F_{Vx} zwischen Null und dem maximal erreichbaren (und damit verfügbaren) Radkraftvektoren F_{Vxmax} möglich ist. Die Ellipsen an den Vorderrädern zeigen an, dass in Radlaufrichtung beim Vorderradtyp mehr Bremskraft bzw. Beschleunigungskraft in Laufrichtung als Seitenführungskraft erzielbar ist und ein Radkraftvektor F_{Vx} zwischen Null und dem maximal erreichbaren (und damit verfügbaren) Radkraftvektoren F_{Vxmax} entsprechend der Ellipse möglich ist. Es sind aber natürlich auch andere Kurven für die verfügbaren Radkraftvektoren F_{V1max} , F_{V2max} , F_{V3max} , F_{V4max} möglich, die z.B. gemessen werden können. Diese Kurven (Kreise, Ellipsen, gemessene Zusammenhänge) können z.B. aus den Reifendaten abgeleitet werden und können als bekannt vorausgesetzt werden. Die Größe der Kurven (Kreise, Ellipsen, andere) gibt den maximal möglichen Radkraftvektor F_{V1max} , F_{V2max} , F_{V3max} , F_{V4max} an. Durch dynamische Radlastverteilung (in Abhängigkeit vom Fahrzustand) werden die Räder 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ unterschiedlich stark gegen die Fahrbahn gedrückt, wodurch an den Rädern 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ unterschiedliche übertragbare Reibkräfte entstehen. Zusätzlich können die Fahrbahnbedingungen unterschiedlich sein, was sich ebenfalls in der Größe der Kurve niederschlagen kann. Man sieht im Beispiel nach Fig.5, dass ausschließlich vorne rechts jener Radkraftvektor F_{V2} erreichbar ist, der benötigt wird, um die resultierende Kraft F_R zu kompensieren. Die anderen Radkraftvektoren F_{V1} , F_{V3} , F_{V4} können entweder aufgrund zu geringer Straßenhaftung (Andrückkraft, Fahrbahnbedingung) nicht wie erwünscht erreicht werden (Räder 2₁, 2₄) oder werden nicht so hoch ausgeschöpft wie möglich, z.B. wegen einer vorgegebenen Bremskraftverteilung (Rad 2₃). Das Fahrzeug 1 wird also in einen ungewollten oder unkontrollierbaren Zustand geraten und unter Umständen nicht den Fahrerwünschen gehorchen. An dieser Stelle setzen dann bei herkömmlichen Fahrzeugen 1 Systeme wie ABS oder ESP ein, die versuchen, diesen Fahrzustand durch radindividuelle Eingriffe zu beheben.

[0071] Bei Kenntnis der momentan verfügbaren Radkraftvektoren F_{V1max} , F_{V2max} , F_{V3max} , F_{V4max} (aus den bekannten Kreisen, Ellipsen oder Kurven) können aber bei radindividuell wirkenden Bremssystemen die momentanen Radkraftvektoren F_{V1} , F_{V2} , F_{V3} , F_{V4} aber so kombiniert werden, dass die momentane Gesamtradkraft F_{GRad} die durch den Fahrzustand und die Fahrumgebung momentan entstehende resultierende Kraft F_R aufhebt, wie in Fig.6 angedeutet. Dabei wird vorausgesetzt, dass dabei auch die Summe der Momente um einen Punkt (z.B. dem Schwerpunkt) zu Null wird. Durch radindividuelles Einbringen von Bremskräften kann daher für jedes Rad 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ ein bestimmter Punkt der Radkraftvektorenkurven eingestellt werden, sodass die Radkraftvektoren F_{V1} , F_{V2} , F_{V3} , F_{V4} in jedem Moment in Summe der entgegengesetzten resultierenden Kraft F_R entsprechen. Die radindividuellen Bremskräfte werden folglich nach den modellierten Kreisen und Ellipsen (bzw. allgemein Kurven) verteilt.

[0072] Man sieht hier sehr deutlich den völligen Unterschied zu einer normalen druckbetätigten

Bremse mit ABS und ESP, denn dabei wird zuerst links-rechts gleich gebremst und vorne-hinten mit einem bestimmten Verhältnis. Dann tritt plötzlich ein ABS bzw. ESP auslösender Fahrzustand ein und es wird versucht, durch Blockieren-Loslassen von Rädern (ABS) oder durch Aufbringen radindividueller Bremskräfte (ESP) eine Verbesserung zu erwirken. Im Gegensatz zu druckbetätigten Bremssystemen mit ABS bzw. ESP wird bei einer radkraftorientierten Lösung nicht gleichmäßig Bremsmoment aufgebaut bis Räder blockieren und dann das Bremssystem in den ABS bzw. ESP Zustand umschlägt, sondern es werden von Anfang an die benötigten radindividuellen Bremskräfte nach den modellierten Kreisen und Ellipsen (Kurven) aufgebaut und verteilt.

[0073] Dazu ist eine schnelle Beobachtung von Raddrehzahlen vorteilhaft, um übermäßigen Schlupf rasch zu erkennen und damit die Radkraftvektorenkurven nicht nur von der dynamischen Radlastverteilung, die im Wesentlichen von der Bremsensteuerung vorgegeben wird, abhängig zu machen, sondern auch von den tatsächlichen Straßenhaftungsbedingungen. Ebenso ist die Kenntnis der momentanen Bremskräfte bzw. Bremsmomente erforderlich, um die Bremskräfte entsprechend regeln zu können.

[0074] Eine für die gegenständlich ausreichend schnelle Messung der Raddrehzahl kann mit den herkömmlichen Zahnscheiben (z.B. des Raddrehzahlsensors 5) an den Rädern 2₁, 2₂, 2₃, 2₄ durchgeführt werden. Wenn z.B. von einer Scheibe mit 30 Zähnen an einem Rad mit 0,64m Durchmesser ausgegangen wird, hat dieses Rad 2m Umfang und dreht sich bei 72 km/h zehn Mal. Bei 72 km/h laufen folglich 300 Zähne pro Sekunde am Zähler vorbei. Beim herkömmlichen Verfahren werden Zähne in einer definierten Torzeit gezählt, das könnte z.B. 1/10 s sein mit 30 Zählungen. Dies ist leider weder besonders schnell (alle 1/10 s) noch besonders genau (Auflösung 30). Andererseits könnte man im hier vorgestellten Verfahren die Zeit messen, die zwischen zwei Zähnen liegt und somit alle 1/300 s eine sehr genaue Zeitmessung machen, womit eine sehr genaue Raddrehzahlmessung in kurzen Folgezeiten möglich wird. Damit ist eine sehr schnelle Erfassung von Radschlupf möglich, indem z.B. eine Raddrehzahl festgestellt wird, die nicht in den momentanen Fahrzustand passt. Alternativ könnte die Raddrehzahl auch über eine Ermittlung der Fahrzeuggeschwindigkeit über Grund bestimmt werden, z.B. durch GPS oder Dopplereffekte.

[0075] Für die einzeln einstellbaren Bremskräfte, wie sie z.B. bei elektrisch betätigten Bremsen möglich sind, ist eine genaue Kontrolle der tatsächlich erreichten Bremskraft notwendig. Dies kann z.B. über den Strom des Elektromotors des Bremsenaktuators erfolgen, der den Bremsbelag andrückt. Das ist für Bremsen mit einer geringen bzw. bekannten Selbstverstärkung ausreichend genau. Eine zusätzliche mittelfristige Kalibrierung kann erfolgen, indem das (z.B. über den Bremsenaktorstrom) geschätzte Radbremsmoment mit den jeweils erzielten Radschlüpfen verglichen wird und mittelfristig davon ausgegangen wird, dass ähnliche Straßenreibbedingungen an den Rädern vorliegen, d.h. mittelfristig die Reibungsbremsen so betrieben werden, dass mittelfristig durchschnittlich gleiche Schlüpfе erzielt werden.

[0076] Eine sehr schnelle und kostengünstige alternative Messung des Radbremsmomentes (bzw. der Radbremskräfte) an einer Bremse mit Schwimmsattel (wie bei Fahrzeugen herkömmlicher Weise eingesetzt) kann auf einfache Weise durch eine zusätzliche Feder am bremsenaktuatorfernen Bremsbelag einer Schwimmsattelbremse erfolgen, wie in Fig. 7 schematisch dargestellt und nachfolgend erläutert. In einem Bremssattel 20 ist der bremsenaktuatorferne Bremsbelag 21 wie hinlänglich bekannt verschiebbar gelagert angeordnet, z.B. in einer Ausnehmung 22 im Bremssattel 20, wobei die Ausnehmung 22 gleichzeitig die Führung des Bremsbelags 21 bildet. Eine Feder 23, deren ein Ende am Bremssattel 20 gehalten wird, drückt den Bremsbelag 21 im ungebremsten Zustand an den oberen Anschlag 24, der hier durch die obere Begrenzung der Ausnehmung 22 gebildet wird. Wenn im Falle einer Bremsung die durch die Reibung zwischen Bremsbelag 21 und Bremsscheibe 25 hervorgerufene Mitnahmekraft (Bremskraft) F_B größer wird, wandert der Bremsbelag 21 unter Zusammendrücken der Feder 23 nach unten, bis ein unterer, hier durch die untere Begrenzung der Ausnehmung 22 gebildeter Anschlag 26 erreicht wird. Der Weg der Feder 23 zwischen den beiden Anschlägen 24, 26 ist ein Maß für die Bremskraft F_B . Um die Bremskraft F_B zu ermitteln, kann folglich entweder der

zurückgelegte Weg des Bremsbelags 21 oder nur ein Punkt (Abheben vom oberen Anschlag 24, Erreichen des unteren Anschlages 26) oder beide Punkte gemessen werden. Damit kann ein genauer Zusammenhang zwischen Bremsenaktuatordaten (z.B. Elektromotorstrom) und Bremskraft F_B hergestellt werden. Man erhält folglich also einen Punkt (oder zwei bzw. mehrere Punkte) auf einem Zusammenhang zwischen Weg der Feder 23 und Bremskraft F_B . Wenn keine Selbstverstärkung der Bremse vorliegt, kann z.B. von einem linearen Kurvenverlauf ausgegangen werden. Bei bekannter Selbstverstärkung bzw. bekanntem Verlauf der Selbstverstärkung während der Bremsung kann ebenfalls der Zusammenhang zwischen Weg der Feder 23 und Bremskraft F_B ermittelt werden.

[0077] Weiters fließen in die Bremsenregelung vorteilhaft die Wünsche des Fahrers ein, also z.B. eine Bremspedalstellung bzw. Kraft auf das Bremspedal, die Gaspedalstellung oder der Lenkradwinkel (als Maß für den gewünschten Kurvenradius). Ein Gaspedal (Gashebel) bewirkt allgemein das gleiche wie ein Bremswunsch mit anderem Vorzeichen. Auch die Geschwindigkeit der Fahrerwünsche kann ausgewertet werden. So kann z.B. ein schnelles Verlassen des Gaspedals als Hinweis auf eine folgende Bremsung verwendet werden, um die Bremsbeläge vorausblickend bereits anzulegen (und gegebenenfalls wieder zu lüften, wenn doch keine Bremsung folgt).

[0078] Im Idealfall und Normalfall können von den erreichbaren Radhaftungen sowohl gewünschter Kurvenradius als auch gewünschte Bremsung bzw. Beschleunigung erfüllt werden. Bei Überforderung der erreichbaren Radhaftungen kann der zuletzt getätigte Fahrerwunsch als wesentlich eingestuft werden, z.B. kann eine zuletzt getätigte Kurvenradiusverringering (weiterer Lenkeinschlag) als vorrangig vor Bremsen eingestuft werden, weil es sich um ein Ausweichmanöver handeln könnte. Es wird durch die Bremsenregelung in diesem folglich der Wunsch vorrangig bedient, der als wesentlich eingestuft wird.

[0079] Wenn die radindividuellen Bremskräfte wie oben beschrieben eingestellt werden, bleibt das Fahrzeug 1 theoretisch in einem unverändert stabilen Zustand, bis die möglichen Straßenhaftungen endgültig überschritten sind. Wenn in das Fahrzeug 1 eine bestimmte Gierrate eingebracht ist, würde diese theoretisch beibehalten werden, da durch das erfindungsgemäße Bremsverfahren von Haus aus keine neuen Drehmomente (die die Gierrate verändern könnten) in das Fahrzeug 1 eingebracht werden. Geringste Abweichungen der radindividuellen Einstellungen im Grenzzustand würden aber kleine Momente bewirken, die für eine Veränderung der Gierrate sorgen. Daher wird die tatsächliche Gierrate vorteilhaft mit der gewünschten Gierrate (z.B. abgeleitet aus dem Lenkradwinkel) verglichen und durch Anpassen der radindividuellen Bremskräfte entsprechend korrigiert.

Ansprüche

1. Elektrofahrzeug mit einer radindividuellen Reibungsbremse (4) an jedem Rad ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) des Elektrofahrzeugs (1), wobei zumindest die Räder ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) einer Achse des Elektrofahrzeugs durch einen Elektromotor (6,11) radindividuell angetrieben sind und der Elektromotor (6,11) sowohl als Antrieb, als auch als regenerative Bremse verwendbar ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Bremsfall an einem angetriebenen Rad ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) durch die Reibungsbremse (4) und/oder den als regenerative Bremse arbeitenden Elektromotor (6,11) ein Grundbremsmoment einstellbar ist, das durch ein durch den Elektromotor (6, 11) erzeugtes Modulationsbremsmoment überlagert ist und im Elektrofahrzeug (1) neben einer Batterie (9) eine weitere Energiesenke (10) vorgesehen ist, um die bei einer Bremsung entstehende regenerative Energie aufzunehmen.
2. Elektrofahrzeug nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Bremsfall vom Elektromotor (6,11) an einem Rad ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) anstelle eines Bremsmoments ein Antriebsmoment erzeugt wird.

3. Elektrofahrzeug nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass als weitere Energiesenke (10) eine elektrische Heizung, eine elektrische Klimaanlage, ein Schleppbetrieb eines range-extenders, ein Umrichter der Leistungselektronik (8) oder ein in Gegenstrombremsung betriebener Elektromotor (6, 11) vorgesehen ist oder ein Elektromotor oder die Leistungselektronik (8) in einen absichtlich schlechten Wirkungsgrad betrieben wird.
4. Verfahren zum Bremsen eines Elektrofahrzeuges (1) mit einer radindividuellen Reibungsbremse (4) an jedem Rad ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) des Elektrofahrzeuges, wobei zumindest die Räder ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) einer Achse des Elektrofahrzeuges (1) durch einen Elektromotor (6, 11) radindividuell angetrieben werden und der Elektromotor (6, 11) sowohl als Antrieb, als auch als regenerative Bremse verwendet wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Bremsfall an einem angetriebenen Rad ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) durch die Reibungsbremse und/oder den als regenerative Bremse arbeitenden Elektromotor (6, 11) ein Grundbremsmoment eingestellt wird, das durch ein durch den Elektromotor (6, 11) erzeugtes Modulationsbremsmoment überlagert wird und die bei der Bremsung entstehende regenerative Energie durch eine Batterie (9) und eine weitere Energiesenke (10) aufgenommen wird.
5. Bremsverfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Bremsfall vom Elektromotor (6, 11) an einem Rad ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) anstelle eines Bremsmoments ein Antriebsmoment erzeugt wird.
6. Bremsverfahren nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Regelung des Bremssystems des Elektrofahrzeuges (1) ein radkraftorientiertes Modell verwendet wird, bei dem an jedem Rad ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) Radkraftvektoren ($F_{V1}, F_{V2}, F_{V3}, F_{V4}$) berechnet werden, die zu einem auf das Elektrofahrzeug (1) wirkenden Summenkraftvektor und zu einem Summenmoment führen und die Radkraftvektoren ($F_{V1}, F_{V2}, F_{V3}, F_{V4}$) durch die Regelung durch radindividuelles Einstellen der Drehmomente den Anforderungen gemäß eingestellt werden.
7. Bremsverfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Regelung um einen radindividuellen Lenkwinkel erweitert wird und durch die Einstellung eines Lenkwinkels eines Rades ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) für das Rad ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) eine zusätzliche Seitenführungskraft eingestellt wird.
8. Bremsverfahren nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Ermittlung der momentanen Straßenhaftungsbedingungen laufend der momentane Schlupf an jedem Rad ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) ermittelt wird und für jedes Rad ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) aus dem Schlupf und aus den aktuellen Antriebskräften die momentan maximal verfügbaren Radkraftvektoren ($F_{V1max}, F_{V2max}, F_{V3max}, F_{V4max}$) bestimmt werden und weiters die momentan auf das Elektrofahrzeug (1) durch den aktuellen Fahrzustand wirkenden Kräfte ermittelt werden und dass im Fall einer Bremsung zusätzlich die momentanen Bremskräfte jedes gebremsten Rades ermittelt werden und die Bremskraft eines jeden gebremsten Rades ($2_1, 2_2, 2_3, 2_4$) in Abhängigkeit von den maximal verfügbaren Radkraftvektoren ($F_{V1max}, F_{V2max}, F_{V3max}, F_{V4max}$) so eingestellt wird, dass die Vektorsumme der momentan entstehenden Radkraftvektoren ($F_{V1}, F_{V2}, F_{V3}, F_{V4}$) die durch den aktuellen Fahrzustand auf das Elektrofahrzeug (1) momentan wirkenden Kräfte und Momente aufhebt.

Hierzu 4 Blatt Zeichnungen

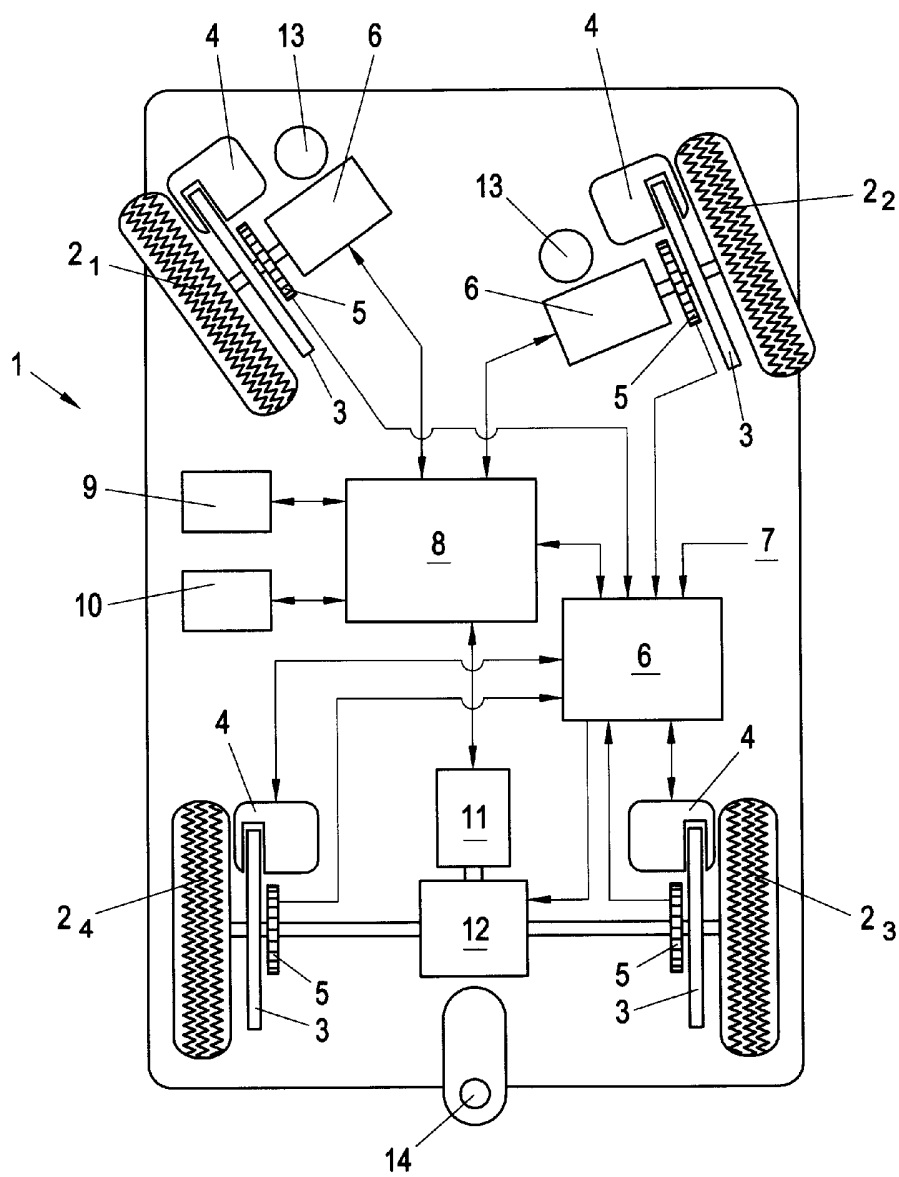


Fig. 1

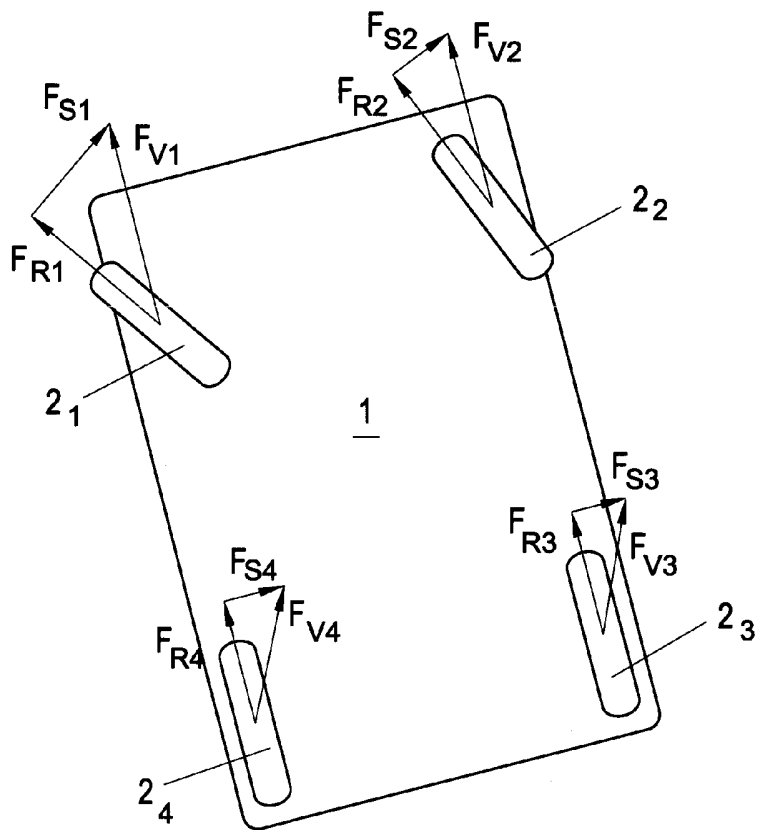


Fig. 2

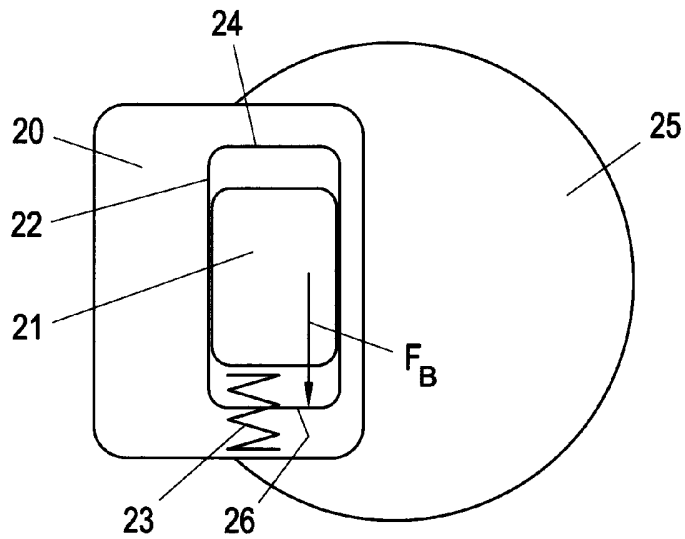
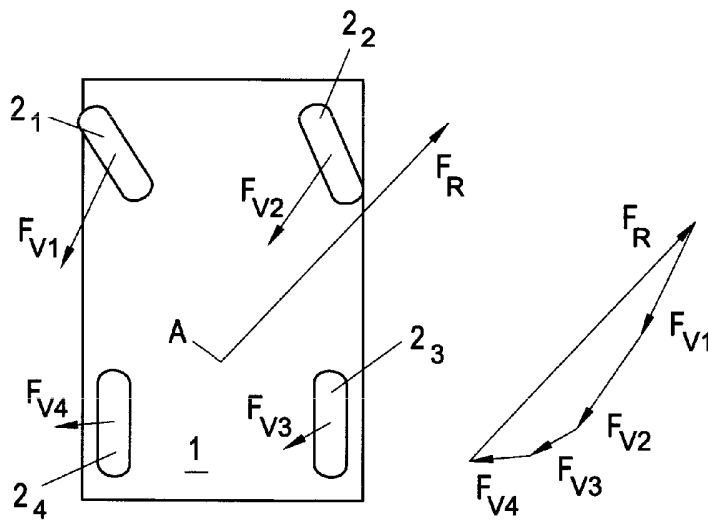
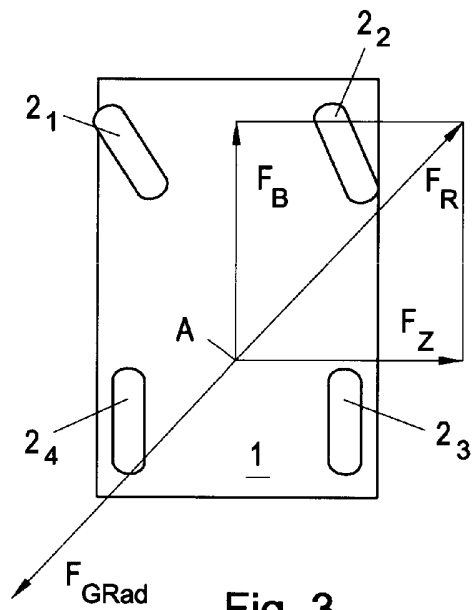


Fig. 7



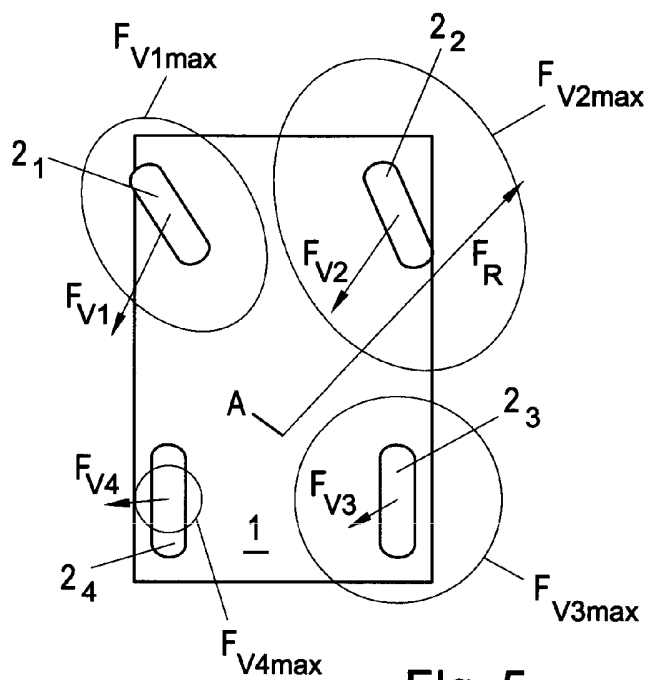


Fig. 5

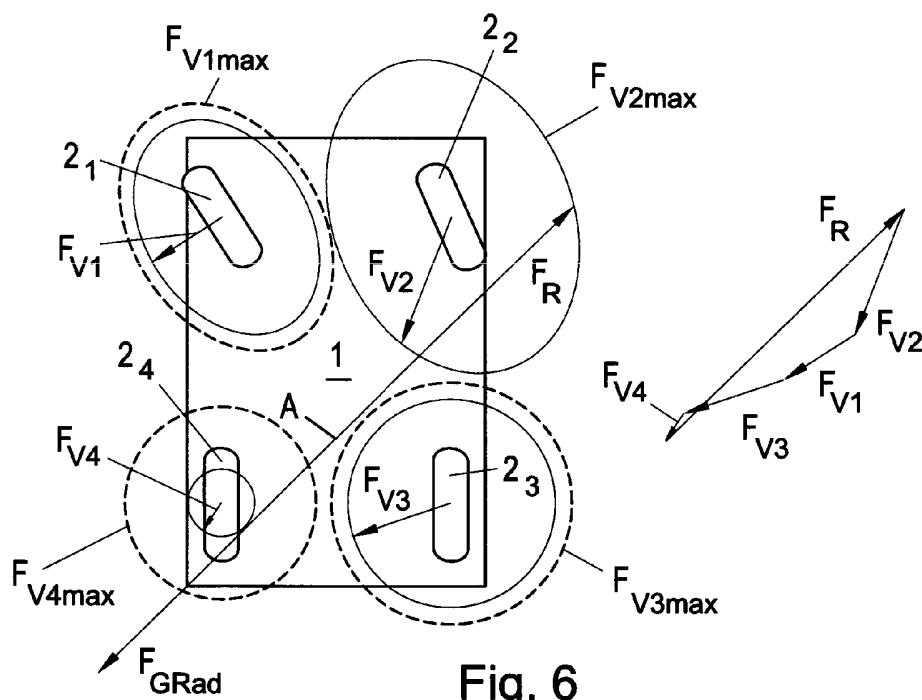


Fig. 6