

(19)



(11)

EP 1 861 546 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
03.09.2014 Patentblatt 2014/36

(51) Int Cl.:
E01C 19/28^(2006.01) E02D 3/074^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **06705412.2**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/CH2006/000172

(22) Anmeldetag: **23.03.2006**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2006/099772 (28.09.2006 Gazette 2006/39)

(54) **SYSTEM FÜR DIE KOORDINIERT E BODENBEARBEITUNG**

SYSTEM FOR CO-ORDINATED SOIL CULTIVATION

SYSTEME PERMETTANT DE TRAITER UN SOL DE MANIERE COORDONNEE

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI SK TR

- **KAUFMANN, Kuno**
CH-4553 Subingen (CH)
- **MARTI, Nicole**
CH-4900 Langenthal (CH)

(30) Priorität: **23.03.2005 EP 05405266**

(74) Vertreter: **Roshardt, Werner Alfred et al**
Keller & Partner
Patentanwälte AG
Schmiedenplatz 5
Postfach
3000 Bern 7 (CH)

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
05.12.2007 Patentblatt 2007/49

(73) Patentinhaber: **Ammann Schweiz AG**
4901 Langenthal (CH)

(56) Entgegenhaltungen:
WO-A-02/44475 WO-A-95/28524
WO-A-98/17865 WO-A-2004/090232
US-A- 5 727 900

(72) Erfinder:
• **ANDEREGG, Roland**
CH-4600 Olten (CH)

EP 1 861 546 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung**Technisches Gebiet**

- 5 **[0001]** Die Erfindung betrifft ein System für die koordinierte Bodenbearbeitung und ein Betriebsverfahren für das System.

Stand der Technik

- 10 **[0002]** In der WO 2005/028755 (Ammann) sind ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur Bestimmung von relativen sowie auch von absoluten Bodensteifigkeitswerten eines Bodenbereichs beschrieben. Zur Ermittlung der absoluten Bodensteifigkeitswerte wird die Vorrichtung in einem innigen Bodenkontakt betrieben. Boden und Vorrichtung bilden hierbei ein einziges Schwingungssystem. Zur Ermittlung der relativen Werte wird die Vorrichtung springend über die Bodenoberfläche bewegt und hierbei die Amplitudenwerte und Frequenzen der zur Anregungsfrequenz sich bildenden subharmonischen Frequenzwerte ausgewertet. Bei der Absolutmessung handelt es sich um eine Messung an einem Ort, während die Relativmessung während des Überfahrens erfolgt. Indem die Relativmessungen über die Absolutmessung in absolute Werte umgewandelt werden, kann eine beim verdichtenden Überfahren ermittelte relative Bodensteifigkeit in einen Absolutwert der Bodensteifigkeit umgewandelt werden. Die hierbei ermittelten Werte werden dem Fahrzeuglenker der Verdichtungsvorrichtung angezeigt, der dann über das weitere Verdichtungsverfahren zu entscheiden hat.
- 15 **[0003]** In der DE 199 56 943 A1 (Bomag) ist eine Vorrichtung zur Kontrolle der Verdichtung bei Vibrationsverdichtungsgeräten beschrieben. Die Verdichtungskontrolle dient dazu, bei Schwarzdecken im Strassen- und Wegebau einen ersten Verdichtungsmesswert, welcher mit einer ersten Verdichtungsvorrichtung erzeugt wird, zu messen und aufzuzeichnen und mit einem zweiten, von einer zweiten Verdichtungsvorrichtung erzeugten Verdichtungswert zu vergleichen, wobei der zweite Verdichtungswerte bei noch annähernd gleicher Asphalttemperatur ermittelt worden ist. Die zweite Verdichtungsvorrichtung ist mit der ersten im Wesentlichen spurgetreu verfolgend gekoppelt. Dabei können die verdichtenden Vibrationswalzen auch in zwei separaten Walzenzügen vorgesehen sein und die beiden Walzenzüge über ein rechnergestütztes Nachführsystem bzw. Lenksystem miteinander gekoppelt sein. Die gekoppelte spurgetreue Lenkung kann über ein Global-Positioning-System (GPS) oder über Radar, Ultraschall oder Infrarot erfolgen. Auf den Grad der erreichten Verdichtung wird durch eine Messung von Schwingungsreflexionen während des Verdichtungsprozesses geschlossen. Wenn sich bei der Verdichtungskontrollvorrichtung trotz zunehmender Anzahl von Verdichtungsübergängen die Verdichtung nicht mehr ändert, wird angenommen, dass die mit einem bestimmten Verdichtungsgerät erzielbare höchste Dichte erreicht ist. Die erreichten Verdichtungswerte werden auf einer Anzeigeeinheit dem Walzenführer angezeigt.
- 20 **[0004]** In der WO 95/28524, das als nächstliegender Stand der Technik gilt, wird ein gattungsgemäßes System für die koordinierte Bodenbearbeitung beschrieben.
- 25
- 30
- 35

Darstellung der Erfindung

- 40 **[0005]** Aufgabe der Erfindung ist es, ein dem eingangs genannten technischen Gebiet zugehörendes System zu schaffen, mit dem eine optimale Bodenverdichtung in einem optimalen Zeitrahmen erreichbar ist.
- [0006]** Die Lösung der Aufgabe ist durch die Merkmale des Anspruchs 1 definiert. Gemäss der Erfindung umfasst ein System für die koordinierte Bodenbearbeitung eine Mehrzahl von Verdichtungsvorrichtungen zur Bodenverdichtung, wobei die Verdichtungsvorrichtungen zum Ermitteln von ortsbezogenen relativen Verdichtungswerten ausgebildet sind. Weiter umfasst das System eine Eichvorrichtung zum Ermitteln von ortsbezogenen absoluten Verdichtungswerten und eine Recheneinheit zum Korrelieren von relativen und absoluten ortsbezogenen Verdichtungswerten, wobei Verdichtungsvorrichtungen, Eichvorrichtung und Recheneinheit nachrichtentechnisch miteinander verbunden sind. Schliesslich ist eine Systemsteuerung vorgesehen, welche derart ausgebildet ist, dass die ortsbezogenen relativen Verdichtungs-
werte der Verdichtungsvorrichtungen sowie die ortsbezogenen absoluten Verdichtungswerte laufend an die Recheneinheit übermittelt, dort abgespeichert und beim Vorhandensein von ortsgleichen Verdichtungswerten Verdichtungskorrelationswerte berechnet und an die Verdichtungsvorrichtungen übermittelt und dort als Korrekturwert abgespeichert werden.
- 45
- 50 **[0007]** Es handelt sich also um ein durchgehend vernetztes System, welches die Verdichtungsarbeiten einer grossen Baustelle kontrollieren, koordinieren und steuern kann, auf welcher zeitgleich oder zeitlich sequenziell mehrere (d.h. mindestens zwei, vorzugsweise mehr als drei) Verdichtungsvorrichtungen (Verdichtungsrollen, Vibrationsplatten etc.) an verschiedenen Orten arbeiten können. Die mit dem System verbundene Eichvorrichtung (z.B. Druckplatte) ermöglicht eine instantane Eichung bzw. Abgleichung der z.B. an einem anderen Ort der Baustelle im Einsatz befindlichen Verdichtungsvorrichtungen, welche die geeichte Stelle bearbeitet oder an dieser Stelle zumindest relative Verdichtungswerte ermittelt haben. Die Verdichtungswerte sind im System stets mit Ortskoordinaten versehen, d.h. ein ordnungsgemässer
- 55

Datensatz umfasst zumindest Verdichtungswert und Ort. Es können weitere Daten angehängt werden, wie z.B. Zeit, Identifikation der Maschine, Schichtdicke, Materialeigenschaft.

[0008] Die Systemsteuerung kann in verschiedenster Weise ausgeführt sein. Es handelt sich typischerweise um ein Computerprogramm, das verschiedene Module aufweist, die auf den Verdichtungsrichtungen, der Eichvorrichtung und der zentralen Recheneinheit installiert sind und den zeitlichen Ablauf und die nachrichtentechnische Kommunikation kontrolliert. Es kann z.B. von der Recheneinheit aus die verschiedenen Geräte abfragen.

[0009] Die Recheneinheit ist typischerweise enthalten in einem ortsfesten Server. Sie kann durch eine auf dem Server installierte Software verwirklicht sein. Es ist aber auch möglich, auf der Baustelle eine der verwendeten Vorrichtungen (z.B. die Eichvorrichtung oder eine der Verdichtungsrichtungen) mit der Recheneinheit zu versehen. Für die nachrichtentechnische Kommunikation unter den Geräten kann ein separates dediziertes Netz oder ein allgemein verfügbares öffentliches Netz (z.B. GSM, Funktelefon) verwendet werden.

[0010] Ein typisches erfindungsgemässes System wird verschiedene Walzen (Gewicht, Leistung, Technik) umfassen. Es ist daher sinnvoll, dass jede Verdichtungsrichtung im System mit einem Code identifiziert wird und wenn jede Messung mit der Identifikation der Verdichtungsrichtung versehen wird. Das System wird auf diese Weise skalierbar, d.h. es können nach Bedarf neue Geräte hinzugefügt (bzw. in das System integriert) werden. Ferner ist es auf diese Weise möglich, die Qualität der Verdichtungsrichtungen zu überwachen, weil es stets verschiedene Vergleichsmöglichkeiten gibt.

[0011] Es ist natürlich denkbar, dass das System nicht zentral sondern peripher gesteuert ist. Das bedeutet, dass eine Verdichtungsrichtung selbständig bei der Zentrale (Recheneinheit) anfragt, ob am Einsatzort bereits Verdichtungswerte erfasst sind und dass die Zentrale gegebenenfalls vorhandene Werte übersendet. Es ist dann nicht erforderlich, dass die Zentrale die Verdichtungswerte zusammen mit einer Identifikation speichert.

[0012] Die Abspeicherung der Daten erfolgt primär in der Recheneinheit. Dort wird praktisch eine Landkarte der Daten des zu bearbeitenden Terrains aufgebaut. Vorzugsweise sorgt die Systemsteuerung dafür, dass die Verdichtungsrichtungen in bestimmten Abständen bzw. abhängig von der Anzahl und Platzierung der verfügbaren absoluten Verdichtungswerte an die Orte der absoluten Eichmessungen fahren und dort den relativen Verdichtungswert ermitteln, welcher danach mit dem Eichwert verglichen bzw. korreliert werden kann. Ist eine Verdichtungsrichtung auf diese Weise mit einer Eichmessung korreliert bzw. geeicht, kann ein von dieser geeichten Verdichtungsrichtung bearbeiteter Bodenteilbereich wiederum als (ev. nur vorläufige) Referenz für eine weitere, noch gar nicht geeichte Verdichtungsrichtung verwendet werden. Die Messsysteme der Verdichtungsrichtungen können auf diese Weise systematisch und kontinuierlich systemweit aufeinander abgestimmt werden.

[0013] Es ist im Sinn einer Vereinfachung auch möglich, nur ganz bestimmte Eichstellen im System zu speichern. Es wird dann nur in Bezug auf diese individuellen Positionen eine Korrelation durchgeführt und es kann auf die Speicherung einer Bodenverdichtungsdatenkarte verzichtet werden.

[0014] Die erfindungsgemässe Anordnung der untereinander kommunizierenden Geräte wird vorzugsweise im Sinn eines kompletten Baustellenmanagementsystems ausgestaltet. Entsprechend werden auch technische bzw. physikalische Eigenschaften der Bodenbereiche abgespeichert (z.B. Geometrie, Konsistenz und sonstigen Eigenschaften der Bodenschichten). Es können auch Daten erfasst werden, die für die Kostenrechnung benötigt werden. Infolge dessen wird es möglich, das Terrain (z.B. das Trasse einer Strasse) schneller und kostengünstiger zu präparieren.

[0015] Die Ortsbestimmung kann auf verschiedene Weise durchgeführt werden. Vorzugsweise ist jede Einheit mit einem GPS-Empfänger (das heisst ganz allgemein einem Empfänger für eine satellitengestützte Ortsbestimmung) ausgerüstet. Lokal kann der Ort auch über ein baustellenspezifisches Referenzsystem ermittelt werden (indem ortsfeste Sender/- Empfänger positioniert werden, an welchen sich die Einheiten orientieren können).

[0016] Die Eichvorrichtung ist vorzugsweise eine normgemässe Vorrichtung zur Durchführung des Druckplattenversuchs (DIN 18 196). Sollte die Norm oder die Bauherrschaft zur Bestimmung des absoluten Verdichtungswertes eine andere Vorrichtung, z.B. eine Verdichtungswalze welche zur Bestimmung von absoluten Verdichtungswerten ausgebildet ist oder eine Vibrationsplatte zur Bestimmung von absoluten Bodensteifigkeitswerten (WO 2005/028755, Ammann) zulassen, dann ist auch eine solche als Eichvorrichtung im Sinn der Erfindung im System einsetzbar. Als Eichvorrichtung wird also eine weitere Verdichtungsrichtung verwendet, welche nicht nur zur Bestimmung relativer sondern auch absoluter Verdichtungswerte ausgebildet ist. Es ist an dieser Stelle zu vermerken, dass das erfindungsgemässe System ohne weiteres auch mehrere Eichvorrichtungen aufweisen kann.

[0017] Das erfindungsgemässe System kann nach verschiedensten Verfahren betrieben werden. Ein verdichteter Bodenbereich wird z.B. mit folgenden Schritten erstellt.

a) Überfahren zumindest eines Teilbereichs des Bodenbereichs mit einer Verdichtungsrichtung, welche beim Überfahren mindestens einen relativen, ortsbezogenen Verdichtungswert ermittelt,

b) Ermitteln eines absoluten ortsbezogenen Verdichtungswertes im Teilbereich mit einer Eichvorrichtung,

c) automatisches nachrichtentechnisches Übermitteln von gemäss Schritt a) und b) ermittelten relativen und ortsbezogenen absoluten Verdichtungswerten an eine Recheneinheit,

d) Ermitteln zumindest eines Korrelationswertes zwischen relativem und absolutem Verdichtungswert,

e) automatisches Übermitteln des Korrelationswertes an die Verdichtungsanordnung, und

f) Nachführen eines Referenzwertes - sofern nötig - in der Verdichtungsanordnung entsprechend dem übermittelten Korrelationswert.

[0018] Es kann zunächst mit der Eichanordnung der ortsbezogene absolute Verdichtungswert ermittelt und zu einem späteren Zeitpunkt mit der Verdichtungsanordnung der entsprechende Teilbereich in einer nicht-verdichtenden Weise befahren werden, um beim Überfahren mindestens einen ortsbezogenen relativen Verdichtungswert zu ermitteln.

[0019] Es kann aber auch zunächst mit der Verdichtungsanordnung der Teilbereich in einer verdichtenden Weise befahren und beim Überfahren mindestens ein ortsbezogener relativer Verdichtungswert ermittelt werden und zu einem späteren Zeitpunkt der ortsbezogene absolute Verdichtungswert ermittelt werden.

[0020] Typischerweise werden mehrere (mindestens zwei, vorzugsweise drei oder mehr) Teilbereiche sowohl mit einer ersten Verdichtungsanordnung als auch mit einer weiteren Verdichtungsanordnung überfahren. Die ortsbezogenen relativen Verdichtungswerte werden an die Zentrale übermittelt, welche eine Korrelation zwischen den verschiedenen Messwerten und somit zwischen den Verdichtungsanordnungen berechnet.

[0021] Ein Vorteil der Erfindung ist die Entlastung der Person (z.B. Walzenführer), welche die Verdichtungsanordnung zu führen hat. Da mit der Erfindung u.a. die Maschineneinstellungen (Überfahrwege, Überfahrgeschwindigkeit und Verdichterwerte) für eine optimale, zeitreduzierte Verdichtung selbsttätig vorgenommen werden, kann sich der Führer der Verdichtungsanordnung nun voll auf ein Führen der Verdichtungsanordnung und die zu beachtenden Sicherheitsbedingungen konzentrieren. Ein nachträgliches "Aufrütteln" von Bodenbereichen durch nicht notwendiges weiteres Überfahren wird ausgeschlossen. Ein weiteres Überfahren, welches beispielsweise zum Erreichen noch zu verdichtender Bereiche notwendig ist, kann nun derart vorgenommen werden, dass kein "Aufrütteln" mehr erfolgt. Auch ist ein Verbund von mehreren Verdichtungsanordnungen, welche zudem auch unterschiedliche Krafteinrichtungen für eine vorzunehmende Verdichtung aufweisen können, möglich.

[0022] Um dieses Ziel zu erreichen, werden Verdichtungsanordnungen mit einem selbsttätig einstellbaren Verdichterwerte verwendet. Unter den Verdichterwerten wird insbesondere eine einstellbare Bodenreaktionskraft F_B und ein Phasenwinkel φ verstanden. Der Phasenwinkel φ ist ein Winkel zwischen der maximalen senkrecht gegen die Oberfläche des Bodenbereichs gerichteten Bodenreaktionskraft F_B und einem maximalen Schwingungswert einer Schwingungsantwort eines Schwingungssystems. Dieses Schwingungssystem wird, wie unten ausgeführt ist, aus dem Bodenbereich und der die Verdichtung ausführenden Vibrationseinheit der Verdichtungsanordnung gebildet. Zur Verdichtung werden in der Regel Unwuchten mit einem Unwuchtmoment und einer Unwuchtfrequenz verwendet. Da bei der Erfindung die Verdichterwerte selbsttätig von einer geregelten Einstelleinrichtung eingestellt werden, werden analog Unwuchtmoment und Unwuchtfrequenz geregelt, d.h. durch eine Recheneinheit ermittelt eingestellt.

[0023] Bei einem ersten Überfahrvorgang werden nun beispielsweise Unwuchtmoment und Unwuchtfrequenz derart mit einer Einstelleinrichtung eingestellt, dass gemäss theoretischen Berechnungen ein vorgegebener Verdichtungssollwert eines Bodenbereiches oder eines auf einem Bodenbereich angeordneten Belages erreicht wird. In der Regel wird der Verdichtungssollwert über weite Strecken immer derselbe sein, muss es aber nicht, da ja Unwuchtmoment und Unwuchtfrequenz selbsttätig einstellbar sind. Wie im Speziellen unten ausgeführt ist, wird sofort bei Überfahren die erreichte Bodenverdichtung bestimmt und der ermittelte Verdichtungsistwert zusammen mit den Ortskoordinaten des Bereiches für eine spätere Behandlung abgespeichert.

[0024] Unter dem Ausdruck Verdichterwerte werden die Verdichtung hervorrufoende Bewegungen der Verdichtungsanordnung verstanden. Der Ausdruck "Verdichtung" ist jeweils auf den zu verdichtenden bzw. verdichteten Boden bzw. Belag bezogen.

[0025] Diese spätere Behandlung kann nun ein erneutes verdichtendes Überfahren sein oder auch eine Behandlung des Bodenbereiches, falls sich durch die wiederholten ortsbezogenen Verdichtungsmessungen herausstellt, dass dieser Bodenbereich gar nicht weiter, beispielsweise aufgrund seiner Materialzusammensetzung, des Untergrundes usw., verdichtbar ist.

[0026] Die Unmöglichkeit einer weiteren Verdichtung lässt sich dadurch feststellen, dass die erreichten Verdichtungsistwerte ortsbezogen bei jedem Verdichtungs Vorgang ermittelt und abgespeichert werden. Diese abgespeicherten Werte werden verglichen. Wird keine (signifikante) Zunahme der Verdichtung festgestellt, so ist eben dieser Bereich nicht weiter verdichtbar. Um in diesem Bereich durch weitere Verdichtungs Vorgänge keinen Schaden anzustellen bzw. Zeit zu vergeuden, können über diesem Bereich Unwuchtmoment und Unwuchtfrequenz derart eingestellt werden, dass lediglich ein oberflächenglättendes Überfahren erfolgt.

[0027] Unwuchtmoment und Unwuchtfrequenz werden zum oberflächenglättenden Überfahren auch dann eingestellt, wenn bereits ein Bereich auf den geforderten Verdichtungswert verdichtet ist und benachbarte Bereiche, oder Bereiche in einer vorgegebenen Fahrstrecke, diesen Wert noch nicht erreicht haben. Durch dieses oberflächenglättende "Zurückstellen" der Maschinenverdichtungsdaten kann einerseits schneller gefahren werden, andererseits wird ein "Aufrütteln" eines bereits verdichteten Bereiches vermieden.

[0028] Im Gegensatz zu den bekannten Bodenverdichtungssystemen können nun die Sollwerte für die Bodenkraft F_B und den Phasenwinkel φ direkt am betreffenden Ort (Bereich) ermittelt und eingestellt werden. Im Gegensatz zu den von "Hand eingestellten" Verdichtungsrichtungen des Stands der Technik, ist die erfindungsgemässe Verdichtungsrichtung ein "Verdichtungsautomat".

[0029] Sind mehrere Bereiche bereits ausreichend verdichtet, so können diese Bereiche umfahren werden. Dem Führer der Verdichtungsrichtung wird dann von der Recheneinheit, welche die ortsbezogenen Verdichtungsistwerte aus der Speichereinheit verarbeitet, ein Fahrweg vorgeschlagen. Der Vorschlag eines Fahrweges kann auf einer in der Fahrerkabine angeordneten Anzeigeeinheit dargestellt werden. Der Fahrweg kann aber auch auf die so genannte Windschutzscheibe gespiegelt werden oder direkt mit einem Lichtstrahl, insbesondere mittels eines Laserstrahls (z.B. einem roten Heliumneonlaserstrahl) auf den Bodenbereichen angezeigt werden. Eine Anzeige auf der Bodenoberfläche hat den Vorteil, dass den Arbeitern hierdurch angezeigt wird, den für die Verdichtung vorgesehenen Fahrweg frei zu geben bzw. nicht zu betreten bzw. Maschinen aus diesem Bereich zu entfernen.

[0030] Bei grösseren Baustellen wird in der Regel mit mehreren Verdichtungsrichtungen gearbeitet, welche auch unterschiedliche Vorrichtungsdaten für die vorzunehmende Verdichtung aufweisen können. Die Logik jeder Verdichtungsrichtung kennt ihre speziellen Verdichtungseigenschaften und kann aus den vorgegebenen Verdichtungssollwerten mit einer Einstelleinheit Unwuchtmoment und Unwuchtfrequenz entsprechend einstellen.

[0031] Da es sich in der Regel um grössere Massen zur Erzeugung der für die Verdichtung benötigten Vibration handelt, wird man vorzugsweise ein Zeitglied vorsehen. Das Zeitglied kennt die maschinentypische Einstellzeit und weiss damit bei vorgegebener Bewegungsgeschwindigkeit (in der Regel Verfahrgeschwindigkeit), in welcher Zeitspanne mit dem Verstellen angefangen werden muss, damit bei Erreichen des betreffenden Bereiches das ermittelte Unwuchtmoment und die ermittelte Unwuchtfrequenz zum Tragen kommen.

[0032] Bei der Verwendung mehrerer Verdichtungsrichtungen reicht es nicht mehr aus, den vorgegebenen bereichsspezifischen Verdichtungssollwert abzuspeichern, die Ortszuordnung mit einem Triangulationssystem oder GPS zu bestimmen und die ermittelten Verdichtungsistwerte ortsbezogen (bereichsspezifisch) abzuspeichern, damit sie bei einem erneuten Verdichtungs Vorgang in Betracht gezogen werden können. Sind mehrere Verdichtungsrichtungen vorhanden, wird in der Regel in Kolonnen gefahren, so dass nicht immer ein und dieselbe Verdichtungsrichtung über von ihr vorverdichtete Bereiche fährt. In diesem Fall wird man vorzugsweise die Verdichtungsistwerte über Sende- und Empfangsanlagen von Vorrichtung zu Vorrichtung übertragen. Vorzugsweise hat dann auch jede Verdichtungsrichtung ein System zur exakten Ortsbestimmung.

[0033] Man kann nun die Verdichtungs- und Ortsdaten direkt von Verdichtungsrichtung zu Verdichtungsrichtung übertragen. Es kann aber zusätzlich eine Zentrale verwendet werden. Aus dieser Zentrale können dann die bereichsspezifischen Verdichtungssollwerte, vorzugsweise funktechnisch, an die Verdichtungsrichtungen übermittelt werden. Die Verdichtungsrichtungen übermitteln dann ihrerseits die bereichsbezogenen Verdichtungsistwerte. Die Zentrale kann einmal als zwischengeschaltete "Intelligenz" fungieren; sie kann aber auch dazu dienen, dass die bereichsbezogenen Verdichtungsist- bzw. -endwerte zu Protokollzwecken abgespeichert und für ein Baustellenmanagement verwendet werden.

[0034] Neben einer Ermittlung der Verdichtungswerte (Bodensteifigkeit) können selbstverständlich zusätzlich auch noch andere Werte wie die Oberflächentemperatur und die Bodendämpfung ermittelt werden.

[0035] Bei der nachfolgenden Erklärung des Verfahrens zur Messung der Verdichtungsistwerte wird von einer so genannten Vibrationsplatte ausgegangen. Analog hierzu lässt sich mit jeder Verdichtungsrichtung verfahren.

[0036] Zur Absolutmessung wird auf die Vibrationseinheit eine zeitveränderliche Erregerkraft als periodische erste Kraft mit einem maximalen, gegen die Bodenoberfläche senkrecht gerichteten, ersten Schwingungswert erzeugt. Die Frequenz der Erregerkraft bzw. deren Periode wird derart eingestellt bzw. verstellt, bis ein Schwingungssystem, gebildet aus der Vibrationseinheit und einem zu verdichtenden bzw. auszumessenden Bodenbereich, mit dem die Vibrationseinheit in dauerndem Oberflächenkontakt ist, in Resonanz kommt. Die Resonanzfrequenz f wird festgehalten bzw. abgespeichert. Ferner wird ein Phasenwinkel φ zwischen dem Auftreten eines maximalen Schwingungswertes der Erregerkraft und einem maximalen Schwingungswert einer Schwingungsantwort des oben genannten Schwingungssystems ermittelt.

[0037] Arbeitet man z. B. mit einer Vibrationsplatte, so weiss man die schwingende Masse m_d des Unterwagens, und man weiss auch ein statisches Moment M_d eines Unwuchterregers, wobei hier sämtliche schwingende Unwuchten zu berücksichtigen sind. Neben dem Phasenwinkel φ wird die Amplitude A des Unterwagens gemessen. Aus der schwingenden Masse m_d [kg · m], der Resonanzfrequenz f [Hz], dem statischen Moment M_d [kg · m], der Amplitude A [m] und dem Phasenwinkel φ [°] kann mit der nachfolgenden Beziehung eine absolute Bodensteifigkeit k_B [MN/m] bestimmt

werden:

$$k_B = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot (m_d + \{M_d \cdot \cos \varphi\} / A) \quad \{A\}$$

[0038] Aus der ermittelten Bodensteifigkeit k_B (gilt für Absolut- wie auch für Relativwerte) lässt sich ein Elastizitätsmodul des betreffenden Bodenteilstücks mit der nachfolgenden Formel ermitteln:

$$E_B \text{ [MN/m}^2\text{]} = k_B \cdot \text{Formfaktor}$$

[0039] Der Formfaktor kann mit einer kontinuumsmechanischen Betrachtung eines Körpers, welcher sich mit einem elastischen halbinendlichen Raum in Kontakt befindet, gemäss "Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens", Bd. 10, Sept./Okt. 1939, Nr. 5, Berlin, S. 201 - 211, G. Lundberg, "Elastische Berührung zweier Halbräume", ermittelt werden.

[0040] Um Relativwerte zu ermitteln, wobei es sich hier um ein schnelles Verfahren handelt, wird die Erregerkraft derart erhöht, bis ein Springen der Vibrationseinheit eintritt. Auch wird man jetzt nicht mehr die Erregerkraft senkrecht zur Bodenoberfläche wirken lassen, sondern derart, dass sich die Vorrichtung mit der Vibrationseinheit über eine Bodenoberfläche selbständig bewegt (gilt insbesondere für die Vibrationsplatte) und von einem Vibrationsplattenführer nur noch in der gewünschten Richtung geführt werden muss. Die Messmittel der Vorrichtung sind in diesem Fall derart ausgebildet, dass lediglich eine Frequenzanalyse der Schwingungsantwort an der Vibrationsplatte vorgenommen wird. Es wird durch Filterschaltungen eine zur Erregerfrequenz tiefste subharmonische Schwingung ermittelt. Je tiefer die tiefste subharmonische Schwingung ist, desto grösser ist die erreichte Bodenverdichtung. Die Messung lässt sich noch verfeinern, indem Amplitudenwerte in der Schwingungsantwort für alle subharmonischen Schwingungen und eine erste Oberwelle zur anregenden Frequenz ermittelt werden. Diese Amplitudenwerte werden unter Verwendung von Gewichtsfunktionen ins Verhältnis zur Amplitude der Erregerfrequenz gemäss nachfolgender Gleichung gesetzt:

$$s = x_0 \cdot A_{2f}/A_f + x_2 \cdot A_{f/2}/A_f + x_4 \cdot A_{f/4}/A_f + x_8 \cdot A_{f/8}/A_f \cdot \{B\}$$

x_0, x_2, x_4 und x_8 sind Gewichtungsfaktoren, deren Ermittlung unten beschrieben ist. A_f ist der maximale Schwingungswert der auf die Vibrationseinheit wirkenden erregenden Kraft. A_{2f} ist der maximale Schwingungswert einer ersten Oberwelle zur erregenden Schwingung.

[0041] $A_{f/2}$ ist ein maximaler Schwingungswert einer ersten Subharmonischen mit der halben Frequenz der erregenden Schwingung. $A_{f/4}$ und $A_{f/8}$ sind maximale Schwingungswerte einer zweiten bzw. dritten Subharmonischen mit einer Viertelfrequenz bzw. einer Achtelfrequenz der erregenden Schwingung. $A_{2f}, A_{f/2}, A_{f/4}$ und $A_{f/8}$ werden aus der Schwingungsantwort ermittelt.

[0042] Je grösser nun der Wert von s ist, desto grösser ist auch die Bodenverdichtung. Da lediglich für eine Beurteilung der Bodenverdichtung maximale Schwingungswerte und deren Verhältnisse unter einer Summenbildung ermittelt werden müssen, handelt es sich hier um ein äusserst schnelles Messverfahren.

[0043] Bestimmt man nun die oben angeführten Gewichtungswerte, so folgt aus der Relativmessung eine Absolutmessung, wobei der Erhalt absoluter Werte immer an ein- und dieselbe Bodenzusammensetzung (Lehm, Sand, Kies, Lehm Boden mit einem vorgegebenen Kies- / Sandanteil, ...) gebunden ist.

[0044] Wird jeweils nach dem Verdichtungsverfahren z. B. mit einer Grabenwalze, mit einem Walzenzug usw. gemessen, so kann eine Verdichtungszunahme ermittelt werden. Ist die Verdichtungszunahme nur gering oder wird keine Verdichtungszunahme ermittelt, bringt auch ein weiteres Überfahren keine weitere Verdichtungszunahme. Ist dennoch eine weitere Verdichtungszunahme gefordert, muss mit anderen Verdichtermitteln gearbeitet werden, oder die Bodenzusammensetzung durch einen Materialaustausch geändert werden.

[0045] Da mit der hier angeführten Vorrichtung sowohl Absolutmessungen wie auch schnelle Relativmessungen der Bodenverdichtung vorgenommen werden können, ist es möglich, wie nachfolgend ausgeführt, nach einer Eichung auch schnelle Absolutmessungen vorzunehmen. Ausgehend von obiger Gleichung $\{A\}$ ist bei bekannten "Maschinenparametern", schwingende Masse m_d des Unterwagens und statisches Moment M_d eines Unwuchterregers, sofern eine Vibrationsplatte verwendet wird, und Messung der Schwingungsamplitude A des Unterwagens, der Resonanzfrequenz f [Hz] sowie des Phasenwinkels φ [°] die absolute Bodensteifigkeit k_B [MN/m] eines Bodenteilbereichs ermittelbar.

[0046] Entsprechend den vier Gewichtungsfaktoren x_0, x_2, x_4 und x_8 in Gleichung $\{B\}$ werden nun auf vier unterschiedlichen Bodenteilbereichen des Bodenbereichs mit jeweils einer Absolutmessung Bodensteifigkeitswerte k_{B1}, k_{B2}, k_{B3} und k_{B4} ermittelt, wobei sich hierbei unterschiedliche Bodensteifigkeiten bei derselben Bodenzusammensetzung ergeben sollten.

[0047] Nach der Ermittlung der Bodensteifigkeitswerte k_{B1} , k_{B2} , k_{B3} und k_{B4} werden die maximalen Schwingungswerte A_f , A_{2f} , $A_{f/2}$, $A_{f/4}$ und $A_{f/8}$ auf denselben vier Bodenteilbereichen ermittelt. Die erhaltenen Werte werden in die Gleichung $\{B\}$ eingesetzt, wobei für s die Bodensteifigkeitswerte k_{B1} , k_{B2} , k_{B3} und k_{B4} verwendet werden. Man hat nun vier Gleichungen, aus denen die vier noch unbekannten Gewichtungsfaktoren ermittelbar sind.

[0048] Sind diese Werte in einem Speicher einer Auswerteeinheit der unten beschriebenen Vorrichtung abgelegt, so müssen beim Überfahren von Bodenteilbereichen nur noch die maximalen Schwingungswerte A_f , A_{2f} , $A_{f/2}$, $A_{f/4}$ und $A_{f/8}$ ermittelt und mit den Gewichtungswerten verknüpft werden, um absolute Bodensteifigkeitswerte zu erhalten. Eine Absolutmessung kann nun genau so schnell wie die oben angeführten Relativmessungen vorgenommen werden.

[0049] Ändert sich die Bodenzusammensetzung, so können noch Relativmessungen vorgenommen werden; eine Nacheichung sollte jedoch vorgenommen werden. Gewichtungswerte für unterschiedliche Bodenzusammensetzungen kann man in einem Speicher der Vorrichtung (in der Regel jedoch in einer unten angeführten Zentrale) ablegen und Messungen innerhalb einer durch eine Bodenzusammensetzung vorgegebenen Toleranz vornehmen. Es sollte jedoch bei sich ändernden Bodenzusammensetzungen, um eine ausreichende Genauigkeit zu erhalten, immer eine Eichung vorgenommen werden. Eine Eichung ist zwar bedeutend langsamer als die schnelle Relativmessung; bei etwas Übung lässt sich jedoch eine Eichung in wenigen Minuten vornehmen.

[0050] Die ermittelten Bodenverdichtungswerte wird man vorzugsweise zusammen mit den jeweiligen Ortskoordinaten eines Bereichs, der ausgemessen wird, abspeichern bzw. gleich an eine Zentrale wie z.B. ein Baubüro übermitteln, damit von dort diese Daten wieder über eine Sende- und Empfangseinheit an die betreffenden Verdichtungsrichtungen übermittelt werden. Die Daten können aber auch, wie oben angeführt, für eine weitere Verarbeitung in der Verdichtungsrichtung abgespeichert werden.

[0051] Als Verdichtungsvorrichtung kann man vorzugsweise eine Vibrationsplatte nehmen, da es sich hier um ein preisgünstiges Produkt handelt. Es können aber auch andere Maschinen, wie beispielsweise Grabenwalze und Walzenzug verwendet werden. Die Vibrationsplatte hat jedoch den Vorteil, dass die Kontaktfläche mit der Bodenoberfläche definiert ist.

[0052] Als anregende Kraft wird man vorzugsweise zwei gegenläufig angetriebene Unwuchten nehmen. Die gegenseitige Lage der beiden Unwuchten muss gegeneinander verstellbar sein, damit einmal die Erregerkraft senkrecht auf die Bodenoberfläche (für eine Eichung und eine Absolutmessung) und einmal entgegen der Bewegungsrichtung schräg nach hinten richtbar ist. Auch muss die Frequenz der Erregerkraft (hier beispielsweise die gegenläufige Umdrehungszahl der Unwuchten) einstellbar sein, um in Resonanz gehen zu können. Das Suchen der Resonanzfrequenz kann manuell erfolgen; man wird es aber in vorteilhafter Weise durch einen automatischen "Scan"-Vorgang vornehmen lassen, der sich auf die Resonanzfrequenz einpendelt.

[0053] Das statische Unwuchtmoment ist mittels einer Einstelleinheit selbsttätig einstellbar ausgebildet, indem beispielsweise eine radiale Verstellung der Unwuchtmasse bzw. -massen vornehmbar ist.

[0054] Auch die Einwirkungsfrequenz auf die Bodenkontakteinheit ist mit der Einstelleinheit einstellbar. Bei einer einstellbaren Frequenz kann eine Resonanz des Schwingungssystems, bestehend aus Bodenkontakteinheit und dem zu verdichtenden bzw. verdichteten Bodenbereich, ermittelt werden. Ein Arbeiten in Resonanz ergibt eine Verdichtung bei reduzierter Verdichtungsleistung. Da das Schwingungssystem aufgrund der zu erbringenden Verdichtungsleistung ein gedämpftes System ist, ergibt sich aus dem Grad der Dämpfung ein Phasenwinkel zwischen der maximalen Amplitude der Anregung (z.B. Kraft durch die rotierenden Unwuchten) und der Schwingung des Systems (= Schwingung der Bodenkontakteinheit). Um diesen Phasenwinkel bestimmen zu können, wird man auf der Bodenkontakteinheit neben einem Sensor für die Subharmonischen (sowie auch für die Resonanzfrequenz und Oberwellen (Harmonische)) einen Sensor anbringen, der die zeitliche Auslenkung in Bodenverdichtungsrichtung misst. Die zeitliche Auslenkung der Anregung (Kraftaufbringung auf die Bodenkontakteinheit) kann ebenfalls gemessen werden; man kann sie jedoch leicht aus der augenblicklichen Stellung der Unwucht bzw. der Unwuchten ermitteln. Die zeitliche Lage der maximalen Amplituden (Anregungsschwingung zur Schwingung der Bodenkontakteinheit) wird man mit einem Komparator ermitteln. Die Anregung wird man vorzugsweise derart einstellen, dass die maximale Amplitude der Anregung um 90° bis 180° , vorzugsweise um 95° bis 130° der maximalen Amplitude der Bodenkontakteinheit vorausfällt. Die hierbei ermittelten Werte können, wie unten ausgeführt, bei einer veränderbaren Erregerfrequenz auch zur Ermittlung absoluter Verdichtungswerte herangezogen werden.

[0055] Vorzugsweise wird man auch die maximale Amplitude der anregenden Kraft einstellbar auslegen. Eine Verstellung der anregenden Kraft kann bei der Verwendung z.B. von zwei Unwuchten erreicht werden, welche mit gleicher Umdrehungsgeschwindigkeit rotieren und deren winkelmässiger Abstand änderbar ist. Die Unwuchten können gleichsinnig oder auch gegensinnig bewegt werden.

[0056] Ergänzend sei bemerkt, dass das Auftreten von Subharmonischen, sofern eine eine Bodenkontakteinheit aufweisende Bodenverdichtungsrichtung nicht entsprechend ausgelegt ist, zu Maschinenschäden führen kann. Man wird deshalb Dämpfungselemente zwischen der jeweiligen Bodenkontakteinheit und den restlichen Maschinenteilen derart auslegen, dass eine Übertragung der Subharmonischen gedämpft wird. Man kann natürlich die gesamte Bodenverdichtungseinheit derart auslegen, dass die tieffrequenten Subharmonischen keinen Schaden anrichten; deren Fre-

quenz ist ja gemäss den Ausführungen in der Detailbeschreibung bekannt. Man kann aber auch die Amplitude der anregenden Kraft so weit herunterfahren, dass die Amplituden der Subharmonischen keinen Schaden anrichten bzw. nicht mehr vorhanden sind.

[0057] Aus der nachfolgenden Detailbeschreibung und der Gesamtheit der Patentansprüche ergeben sich weitere vorteilhafte Ausführungsformen und Merkmalskombinationen der Erfindung.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0058] Die zur Erläuterung des Ausführungsbeispiels verwendeten Zeichnungen zeigen:

- Fig. 1 eine beispielsweise Geländeanordnung mit unterschiedlich verdichteten Bodenbereichen,
- Fig. 2 eine schematische dargestellte Vibrationsplatte zur Verdichtung eines Bodenbereichs und Messung von erreichten Verdichtungsstufenwerten,
- Fig. 3 Angaben zur Berechnung einer Bodenverdichtung aus einem gekoppelten schwingungsfähigen System Boden-Vorrichtung,
- Fig. 4 ein Beispiel einer Umsetzung eines dimensionslosen Modells in einem Simulink-Modell,
- Fig. 5 ein Bewegungsverhalten einer Vibrationsplatte bei gleich bleibenden Maschinenparametern über einem unterschiedlich harten Untergrund,
- Fig. 6 ein Blockschaltbild einer Ausführungsvariante der erfindungsgemässen Vorrichtung zur Verdichtung,
- Fig. 7 eine schematische Darstellung einer Geräteanordnung mit mehreren Verdichtungsanordnungen
- Fig. 8 eine zu Figur 7 analoge schematische Darstellung einer Geräteanordnung mit mehreren Verdichtungsanordnungen und einer Zentrale zur Datenübermittlung und Datenauswertung,
- Fig. 9 eine schematische Darstellung eines mit dem erfindungsgemässen System realisierbaren Bearbeitungsablaufs, und
- Fig. 10 eine schematische Darstellung der Systemsteuerung.

[0059] Grundsätzlich sind in den Figuren gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

Wege zur Ausführung der Erfindung

[0060] Anhand Figur 9 soll zunächst ein Beispiel für das Kontrollieren bzw. Steuern der Verdichtungsarbeiten auf einer Baustelle mit mehreren örtlich voneinander distanzierten Teilbereichen TB1, TB2, TB3, TB4 erläutert werden.

[0061] Im Teilbereich TB1 wird mit einer Eichvorrichtung EV zu einem Zeitpunkt t_1 am Ort mit den Ortskoordinaten x_1, y_1 ein absoluter Verdichtungswert als Eichwert $E_1(x_1, y_1)$ gemessen. Die Daten werden von der Eichvorrichtung EV per Funk an die Recheneinheit R übertragen und dort abgespeichert. Eine Verdichtungswalze W1, welche durch die Systemsteuerung auf den Teilbereich TB1 geführt wird, misst zunächst am Ort x_1, y_1 den relativen Verdichtungswert $V(W1;TB1;x_1,y_1)$ und übermittelt diesen an die Recheneinheit R. Die Recheneinheit R korreliert den relativen Verdichtungswert der Verdichtungswalze W1 mit dem Eichwert $E_1(x_1, y_1)$ und übermittelt das Ergebnis, z.B. in Form eines Korrekturfaktors $K(W1,TB1) = \text{corr.}[E_1(x_1,y_1) \leftrightarrow V(W1;TB1; x_1,y_1)]$, an die Verdichtungswalze W1. Diese kann nun den ganzen Teilbereich TB1 auf einen vorgegebenen absoluten Verdichtungswert verdichten. Dabei wird sie die tatsächlich erreichten relativen Verdichtungswerte $V(TB1,x_i,y_i; i = 1 \dots n)$, welche aufgrund der Korrelation zu $E_1(x_1,y_1)$ auch absolute Verdichtungswerte sind, vorzugsweise flächendeckend (d.h. in einem vorgegebenen Flächenraster x_i, y_i , wobei der Index i von 1 bis n läuft) der Recheneinheit R übermitteln. Noch während die Verdichtungswalze W1 am Bearbeiten des Teilbereichs TB1 ist, kann eine zwischenzeitlich frei gewordene Verdichtungswalze W2 auf den Punkt x_1, y_1 geführt werden, um dort den Boden (zu einem Zeitpunkt t_2) in einer nicht-verdichtenden Weise zu befahren und einen relativen Verdichtungswert $V(W2;TB1;x_1,y_1)$ zu messen. Dieser relative Verdichtungswert wird der Recheneinheit R übermittelt. Wenn die Stelle x_1, y_1 zum Zeitpunkt t_2 von der ersten Verdichtungswalze W1 noch nicht bearbeitet worden ist, korreliert die Recheneinheit R den von der zweiten Verdichtungswalze W2 erhaltenen Verdichtungswert direkt mit dem Eichwert $E_1(x_1, y_1)$ und übermittelt der Verdichtungswalze W2 den errechneten Korrekturfaktor $K(W2,TB1) = \text{corr.}[E_1(x_1,y_1) \leftrightarrow$

V(W2;TB1; x1,y1)]. Hat die erste Verdichtungswalze W1 dagegen die Stelle x1, y1 bereits auf den vorgegebenen Wert verdichtet, korreliert die Recheneinheit den von der zweiten Verdichtungswalze W2 erhaltenen relativen Verdichtungswert mit dem verdichteten Wert V(W1;TB1, x1, y1; t2), d.h. mit dem Verdichtungswert nach der Bearbeitung (= vorgegebener Sollwert). Weil die erste Verdichtungswalze W1 die Recheneinheit R ständig mit den erreichten Verdichtungswerten V(W1;TB1,xi,yi; i = 1 ... n) versorgt, ist die Recheneinheit R in der Lage, der zweiten Verdichtungswalze W2 den zutreffenden Korrekturfaktor zu übermitteln.

[0062] Die zweite Verdichtungswalze W2 kann gleich weiter zum Teilbereich TB2 fahren und dort die Bodenbearbeitung aufnehmen. Weil sie durch die Messung am Ort x1, y1 geeicht ist, kann sie ortsbezogene absolute Verdichtungswerte V(W2;TB2,xi,yi; i = 1 ... n) im Teilbereich TB2 bestimmen, auch wenn die Eichvorrichtung EV noch nicht auf dem Platz ist. Wenn die Eichvorrichtung ankommt, kann sie prüfen, ob im vordefinierten Messpunkt x2, y2 der geforderte Verdichtungswert erreicht ist. Ob die zweite Verdichtungswalze W2 zu diesem Zeitpunkt läuft oder stillsteht bzw. wo sie sich befindet, ist nicht relevant. Die Eichmessung kann unabhängig davon durchgeführt werden. Die Eichvorrichtung EV übermittelt wiederum die gemessenen absoluten Verdichtungswerte E2(x2,y2) zusammen mit den Ortskoordinaten x2, y2 an die Recheneinheit R. Da diese die von der zweiten Verdichtungswalze W2 im Teilbereich TB2 ermittelten Messwerte kennt, kann sie wiederum eine Korrelation durchführen und überprüfen, wie gut die zweite Verdichtungswalze W2 (aufgrund der Messung am Ort x1, y1) geeicht ist. Sie übermittelt den Korrekturfaktor unverzüglich an die Verdichtungswalze W2, welche zu diesem Zeitpunkt vielleicht bereits den Bodenbereich TB4 bearbeitet.

[0063] Schliesslich wird die Eichvorrichtung an die dritte Messposition x3, y3 im dritten Teilbereich TB3 gebracht. Hier kann auf die gleiche Weise die absolute Bodenverdichtung bestimmt werden, wie anhand der Teilbereiche TB1 und TB2 beschrieben.

[0064] Es gibt auf den verschiedenen Teilbereichen der Baustelle also geeichte Messungen an verschiedenen Orten (wobei pro Teilbereich natürlich auch mehrere Messungen vorgenommen werden können). Anhand dieser Eichpunkte kann das System die verschiedenen Verdichtungsrichtungen kalibrieren, wobei sehr flexibel auf den Ort der Maschinen und den jeweiligen Arbeitsstand Rücksicht genommen werden kann. Es ist somit nicht mehr nötig, dass für eine Eichmessung mehrere Geräte und Maschinenführer zur gleichen Zeit am gleichen Ort sein müssen. Die Wege, welche mit den Maschinen zurückgelegt werden, können minimiert werden. Zeitverschiebungen, die sich aufgrund ursprünglich nicht vorgesehener Arbeiten oder Kapazitätsveränderungen ergeben (weil mehr oder weniger Maschinenstunden zur Verfügung stehen), können im System planerisch berücksichtigt werden.

[0065] Wie das vorliegende Beispiel zeigt, werden die Verdichtungswerte V(W1;TB1,xi,yi; i = 1 ... n) zusammen mit einer Identifikation der Maschine abgespeichert, welche die Werte gemessen hat. Die Recheneinheit kann somit auch später noch Auswertungen durchführen und z.B. die Qualität der Messungen der verschiedenen Vorrichtungen verfolgen.

[0066] In Figur 10 ist schematisch die Systemsteuerung dargestellt. Jede Verdichtungswalze W1, W2, die Eichvorrichtung EV und die Recheneinheit R haben eine Steuereinheit CPU1, ..., CPU4. Diese Steuereinheiten CPU1, ..., CPU4 stehen miteinander in Verbindung und führen einen programmierten Verfahrensablauf durch. Auf diese Weise wird z.B. festgelegt, welche Maschine Daten erfasst und übermittelt und zu welchem Zeitpunkt dies erfolgen soll. Weiter kann vorgegeben bzw. gesteuert werden, wo die Maschinen sich hin bewegen sollen, an welche Maschine die Recheneinheit welche Daten übermittelt und anderes mehr.

[0067] Eine Korrelierung von relativ gemessenen Verdichtungswerten mit absolut gemessenen Werten ist immer dann von grossem Vorteil, wenn sich die Bodenzusammensetzung über einem auszumessenden bzw. zu verdichtenden Bodenbereich ändert. Es kann beispielsweise sandiger, lehmiger, steiniger (Schotter oder Kies) Bodenuntergrund in den unterschiedlichen Bodenbereichen vorhanden sein; auch kann beispielsweise ein unterschiedlicher Wassergehalt zugegen sein. Alle diese unterschiedlichen Bodenzusammensetzungen geben unterschiedliche relative Bodenverdichtungswerte.

[0068] Sind nun die Bereiche unterschiedlicher Bodenzusammensetzung in ihren geometrischen Positionen und Konturen bekannt, so wird man in jedem dieser Bodenbereiche einen Eichort mit ausgemessener absoluter Bodensteifigkeit vorgeben. Über diesen Ort bewegen sich dann die unterschiedlichen Bodenverdichtungsrichtungen, um ihre relativen Bodenverdichtungswerte in absolute Werte für die betreffenden Bereiche zu korrelieren.

[0069] **Figur 1** zeigt einen Geländebereich **14** mit mehreren in Bahnen verlaufenden Bodenbereichen **3** unterschiedlicher Verdichtung. Je höher die Verdichtung in Bezug auf einen Verdichtungssollwert ist, desto enger ist die hier gewählte kennzeichnende Schraffur. Ein Kästchenmuster zeigt eine erreichte Verdichtung an, welche bereits dem Verdichtungssollwert entspricht. Ziel der hier angestrebten Verdichtung, wie sie z. B. im Strassenbau benötigt wird, ist das Erreichen einer vorgegebenen Verdichtung, welche nicht über- und nicht unterschritten werden darf. Eine gleichförmige Verdichtung ist mit vertretbarem Aufwand nur gemäss der Erfindung möglich. Zur Darstellung des Verdichtungs Zustands ist hier beispielsweise eine unterschiedliche Schraffur gewählt worden; vorzugsweise wird man jedoch eine Darstellung mit unterschiedlichen Farben wählen.

[0070] Die Verdichtungswerte dieses Geländebereichs sind z.B. in der Recheneinheit abgespeichert. (Sie können auch in jeder Verdichtungsrichtung abgespeichert sein, so dass die Verdichtungsrichtung selbständig arbeiten kann, auch wenn die Funkverbindung zur zentralen Recheneinheit vorübergehend unterbrochen sein sollte.) Zusätzlich

können in der Datenkarte die Geometrie (Schichtdicke, Anzahl aufgetragene Schichten) und Materialbeschaffenheit (Kies, Gemisch, Herkunft etc.) abgespeichert sein.

[0071] Als Verdichtungsvorrichtung wird beispielsweise eine Vibrationsplatte **1** verwendet. Die Vibrationsplatte **1** dient somit als Verdichtungs- und als Messgerät. Sie hat generell eine Bodenkontakteinheit (Unterwagen **5** mit Bodenplatte **4**) mit zwei gegenläufig rotierenden Unwuchten **13a** und **13b** (**Figur 2**) mit einer Gesamtmasse m_d , welche auch einen Unwuchterreger mit einschliesst. m_d symbolisiert die gesamte anregende schwingende Masse. Auf den Unterwagen **5** stützt sich ein statisches Auflastgewicht des Oberwagens **7** mit einer Masse m_f (statisches Gewicht) über Dämpfungselemente **6** (Steifigkeit k_G , Dämpfung c_G) ab. Das statische Gewicht m_f ergibt zusammen mit den Dämpfungselementen **6** ein fusspunkterregtes Schwingungssystem, das tief abgestimmt wird (tiefe Eigenfrequenz). Der Oberwagen **7** wirkt im Vibrationsbetrieb gegenüber den Schwingungen des Unterwagens **5** als Tiefpass zweiter Ordnung. Damit wird die in den Oberwagen **7** transmittierte Vibrationsenergie minimiert.

[0072] Der auszumessende, zu verdichtende bzw. verdichtete Boden des Bodenbereichs **3** ist ein Baustoff, für den, je nach untersuchten Eigenschaften, unterschiedliche Modelle existieren. Für den Fall des oben erwähnten Systems (Bodenkontakteinheit - Boden) kommen einfache Feder-Dämpfer-Modelle (Steifigkeit k_B , Dämpfung c_B) zur Anwendung. Die Federeigenschaften berücksichtigen die Kontaktzone zwischen Bodenverdichtungseinheit (Unterwagen **5**) und elastischem Halbraum (Bodenbereich). Im Bereich der Erregerfrequenzen des oben genannten Gerätes, die oberhalb der tiefsten Eigenfrequenz des Systems (Bodenkontakteinheit - Boden) liegen, ist die Bodensteifigkeit k_B eine statische, frequenzunabhängige Grösse. Diese Eigenschaft konnte in der hier vorliegenden Anwendung im Feldversuch für homogene und geschichtete Böden nachgewiesen werden.

[0073] Führt man das Geräte- und Bodenmodell unter Berücksichtigung der einseitigen Bindung in ein Gesamtmodell zusammen, beschreibt das nachfolgende Gleichungssystem (1) für die Freiheitsgrade x_d des Unterwagens **5** und x_f des Oberwagens **7** die zugehörigen Bewegungsdifferentialgleichungen.

$$\begin{cases} m_d \ddot{x}_d + F_B + c_G (\dot{x}_d - \dot{x}_f) + k_G (x_d - x_f) = M_d \Omega^2 \cos(\Omega \cdot t) + m_d g \\ m_f \ddot{x}_f + c_G (\dot{x}_f - \dot{x}_d) + k_G (x_f - x_d) = m_f g \end{cases} \quad (1)$$

[0074] Ausgehend von einer einseitigen, bodenkraftgesteuerten Bindung ergibt sich:

$$\begin{aligned} F_B &= c_B \dot{x}_d + k_B x_d \quad \text{für } F_B > 0 \\ F_B &= 0 \quad \text{sonst} \end{aligned}$$

m_d : schwingende Masse [kg] z.B. Unterwagen **5**

m_f : stat. Auflastgewicht [kg] z.B. Oberwagen **7**

M_d : stat. Moment Unwucht [kg m]

x_d : Bewegung schwingende Masse [mm]

x_f : Bewegung Auflastgewicht [mm]

Ω : Erregerkreisfrequenz [s^{-1}] $\Omega = 2\pi f$

f : Erregerfrequenz [Hz]

k_B : Steifigkeit der Unterlage/des Bodenbereichs [MN/m];

c_B : Dämpfung der Unterlage/des Bodenbereichs [MN/m]

k_G : Steifigkeit der Dämpfungselemente [MN/m]

c_G : Dämpfung der Dämpfungselemente [MN/m]

[0075] Eine Bodenreaktionskraft F_B zwischen Unterwagen **5** und auszumessenden, verdichtetem bzw. zu verdichtendem Bodenbereich **3** steuert dabei die Nichtlinearität der einseitigen Bindung.

[0076] Die analytische Lösung der Differentialgleichungen (1) besitzt die folgende, allgemeine Form:

$$x_d = \sum_j A_j \cos(j \cdot \Omega \cdot t + \varphi_j) \quad (2)$$

j = 1 lineare Schwingungsantwort, Auflastbetrieb

j = 1,2,3,... periodisches Abheben (die Maschine verliert pro Erregungsperiode einmal den Kontakt zum Boden)

j = 1,1/2, 1/4, 1/8,... und zugehörige Oberwellen: Springen, Taumeln, chaotischer Betriebszustand.

[0077] φ ist ein Phasenwinkel zwischen dem Auftreten eines maximalen Schwingungswertes der Erregerkraft und einem maximalen Schwingungswert einer Schwingungsantwort des oben genannten Schwingungssystems.

[0078] Für die nachfolgenden Betrachtungen des "Springens" wird eine senkrecht auf die Bodenoberfläche 2 wirkende Kraft F_B angenommen. Bei der oben beschriebenen Vibrationsplatte hingegen wirkt diese Kraft nicht senkrecht auf die Bodenoberfläche 2, sondern schräg nach hinten, um z.B. eine springende Bewegung in Vorwärtsrichtung zu erhalten. Bei den nachfolgenden mathematischen Betrachtungen ist somit die senkrechte Komponente der schrägen Kraft einzusetzen. Die schräg auf die Bodenoberfläche wirkende Erregerkraft wird erreicht, indem die gegensinnig rotierenden Unwuchten **13a** und **13b** derart rotationsmässig gegeneinander verschoben sind, dass ihre sich addierenden Unwuchtmomente der Unwuchten **13a** und **13b** einen maximalen Kraftvektor etwa unter einem Winkel von 20° nach rechts unten in **Figur 3** haben. Zur Ermittlung der Absolutwerte (Resonanzfall) zeigt der maximale Kraftvektor (wäre identisch mit F_B) senkrecht auf die Bodenoberfläche 2.

[0079] Eine numerische Simulation erlaubt die Berechnung der Lösungen der Gleichungen (1). Insbesondere für den Nachweis chaotischer Schwingungen ist die Verwendung numerischer Lösungsverfahren unerlässlich. Mit Hilfe analytischer Berechnungsverfahren, wie der Mittelungsmethode, können für lineare und nichtlineare Schwingungen sehr gute Näherungslösungen und Aussagen grundsätzlicher Natur zu einer Bifurkation der Grundsicherungen getroffen werden. Die Mittelungstheorie ist beschrieben in Anderegg Roland (1998), "Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern", Fortschritte VDI, Reihe 4, VDI Verlag Düsseldorf. Dies erlaubt einen guten Gesamtüberblick über die auftretenden Lösungen. Bei mehrfach verzweigenden Systemen sind analytische Methoden mit einem unverhältnismässig hohen Aufwand verbunden.

[0080] Als Simulationswerkzeug wird das Programmpaket Matlab/Simulink® verwendet. Dessen graphische Benutzeroberfläche und die zur Verfügung stehenden Tools sind sehr geeignet zur Behandlung des vorliegenden Problems. Die Gleichungen (1) werden zuerst in eine dimensionslose Form transformiert, um eine höchstmögliche Allgemeingültigkeit der Resultate zu erreichen.

$$\text{Zeit: } \tau = \omega_0 t; \quad \omega_0 = \sqrt{k_B / m_d}$$

$$\text{Resonanzverhältnis: } \kappa = \frac{\Omega}{\omega_0} \text{ mit } \Omega = 2\pi \cdot f$$

d,h, $\kappa = f/f_0$, wobei f die Anregungs- und f_0 die Resonanzfrequenz [Hz] ist.

ω_0 ist die Kreis-Resonanzfrequenz des Schwingungssystems "Maschine-Boden" [s⁻¹].

[0081] Ort: $\eta = \frac{x_d}{A_0}; \quad \zeta = \frac{x_f}{A_0}; \quad \eta^* = \omega_0^2 \eta; \quad \zeta^* = \omega_0^2 \zeta;$ Amplitude A_0 f ist frei wählbar Materialkenngrößen:

$$\delta = \frac{c_B}{\sqrt{m_d k_B}} = 2d_B; \quad \lambda_c = \frac{c_G}{c_B}; \quad \lambda_k = \frac{k_G}{k_B}; \quad \text{Massen} \quad \text{und} \quad \text{Kräfte:}$$

$$\lambda_m = \frac{m_f}{m_d}; \quad A_{th} = \frac{m_u r_u}{m_d}; \quad \gamma = \frac{A_{th}}{A_0}; \quad f_B = \frac{F_B}{k_B \cdot A_0} = k_B A_0 (\eta + \delta \eta^*); \quad \eta = \frac{x_d}{A_0}; \quad \eta_0 = \frac{m_d \cdot g}{k_B A_0}; \quad \zeta_0 = \frac{m_f \cdot g}{k_B A_0};$$

$$\left. \begin{aligned} \eta'' + f_B + \lambda_c \delta(\eta' - \zeta') + \lambda_k (\eta - \zeta) &= \gamma \kappa^2 \cos(\kappa \tau) + \eta_0 \\ \lambda_m \zeta'' + \lambda_c \delta(\zeta' - \eta') + \lambda_k (\zeta - \eta) &= \zeta_0 \end{aligned} \right\} \text{ wobei gilt: } f_B = \begin{cases} \delta \eta' + \eta & \text{falls } f_B > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3)$$

[0082] Die resultierenden Gleichungen (3) werden graphisch mit Mathelab Simulink® modelliert, siehe Figur 4. Die Nichtlinearität wird vereinfacht als eine rein kraftgesteuerte Funktion betrachtet und mit Hilfe des "Switch"-Blocks aus der Simulink-Bibliothek modelliert.

[0083] Die Figur 4 zeigt folgendes:

80	Chassis / Oberwagen	81	Boden, entkoppelt
82	Bandage / Unterwage	83	Eigengewicht Chassis
84	Beschleunigung Chassis	85	Beschleunigung Bandage
86	Lambda, Dämpfung Chassis	87	Geschwindigkeit Chassis
88	Geschwindigkeitssignal Chassis	89	Weg Chassis
90	Wegsignal Chassis	91	Phasenkurve Chassis
92	Lambda Steifigkeit Chassis	93	Switch 1
94	Weg Boden	95	Steifigkeit / Dämpfung
96	Äussere Erregung	97	Eigengewicht Bandage
98	Null	99	Switch
100	Kraft	101	Bodenkontaktkraft
102	Steifigkeit	103	Dämpfung
104	Geschwindigkeit Bandage	105	Beschleunigung Bandage
106	Geschwindigkeitssignal Bandage	107	Weg Bandage
108	Wegsignal Bandage	109	Phasenkurve Bandage
110	Arbeitsdiagramm		

[0084] Das Koordinatensystem der Gleichungen (1) und (3) beinhaltet eine statische Einsenkung infolge des Eigengewichts (statisches Auflastgewicht m_f , schwingende Masse m_d). Im Vergleich mit Messungen, die aus der Aufintegration von Beschleunigungssignalen resultieren, muss die statische Einsenkung zu Vergleichszwecken im Simulationsresultat subtrahiert werden. Die Anfangsbedingungen für die Simulation sind alle "0" gesetzt. Die Resultate werden für den Fall des eingeschwungenen Zustands angegeben. Als Lösungssolver wird "ode 45" (Dormand-Price) mit einer variablen Integrationsschrittweite (max. Schrittweite 0.1 s) im Zeitbereich von 0 s bis 270 s gewählt.

[0085] Für die Betrachtung des chaotischen Maschinenverhaltens der Vibrationsplatte 1 genügt es in der Regel, den schwingenden Teil zu untersuchen, Insbesondere bei gut abgestimmten Gummidämpferelementen sind in den Elementen (Unter- und Oberwagen) die dynamischen Kräfte gegenüber den statischen Kräften vernachlässigbar klein und es gilt $\ddot{x}_f \ll \ddot{x}_d$. In diesem Fall können die beiden Gleichungen in (1) bzw. (3) addiert werden und es ergibt sich eine Gleichung (4a) für einen Freiheitsgrad des schwingenden Elements $x_d \equiv x$. Das zugehörige analytische Modell findet sich in Figur 3.

$$F_B = -m_d \ddot{x} + M_d \Omega^2 \cos(\Omega \cdot t) + (m_f + m_d) \cdot g \quad (4a)$$

[0086] F_B ist die auf den Bodenbereich wirkende Kraft; siehe Figur 3. Diese gewöhnliche Differentialgleichung 2. Ordnung wird in die beiden nachfolgenden Differentialgleichungen 1. Ordnung umgeschrieben:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{F_B}{m_d} + A_0 \Omega^2 \cos(\Omega \cdot t) + \left(1 + \frac{m_d}{m_f}\right) \cdot g \end{aligned} \quad (4b)$$

mit $A_0 = \frac{M_d}{m_d}$ und $F_B = c_B \dot{x}_d + k_B x$ für $F_B > 0$ als bodenkraftgesteuerte Nichtlinearität.
 $F_B = 0$ sonst

Es gilt die Identität $x_2 \equiv \dot{x}$.

[0087] Daraus wird eine Phasenraum-Darstellung mit $x_1(t)$ - $x_2(t)$, bzw. $x(t)$ - $\dot{x}(t)$ abgeleitet.

[0088] Die Phasenkurven, auch als Orbitale bezeichnet, sind im Fall linearer, stationärer und monofrequenter Schwingungen geschlossene Kreise bzw. Ellipsen. Bei nichtlinearen Schwingungen, bei denen zusätzlich Oberwellen auftreten (periodisches Abheben der Bandage vom Boden), sind die Oberwellen als aufmodulierte Periodizitäten zu erkennen. Erst bei Periodenverdoppelungen, also subharmonischen Schwingungen wie dem "Springen", mutiert der ursprüngliche Kreis zu geschlossenen Kurvenzügen, die Schnittpunkte in der Phasenraum-Darstellung aufweisen.

[0089] Es hat sich gezeigt, dass das Auftreten von subharmonischen Schwingungen in Form von Verzweigungen oder Bifurkationen ein weiteres, zentrales Element stark nichtlinearer und chaotischer Schwingungen ist. Im Gegensatz zu Oberwellen stellen subharmonische Schwingungen einen neuen, gesondert zu behandelnden Betriebszustand eines nichtlinearen Systems dar; dieser Betriebszustand unterscheidet sich stark vom ursprünglichen, linearen Problem. Oberwellen sind nämlich klein im Verhältnis zur Grundschiwingung, d. h. die nichtlineare Lösung des Problems verbleibt, mathematisch betrachtet, in der Umgebung der Lösung des linearen Systems.

[0090] Eine Messwerterfassung kann in der Praxis durch den Impuls einer Hall-Sonde, welche den Null-Durchgang der Vibrowelle erfasst, ausgelöst werden. Damit lassen sich auch Poincaré-Abbildungen generieren. Werden die periodisch erfassten Amplitudenwerte in Funktion des variierten Systemparameters, in unserem Falle also der Bodensteifigkeit k_B , aufgetragen, entsteht das Bifurkations- oder so genannte Feigenbaum-Diagramm (**Figur 5**). In diesem Diagramm erkennt man zum einen die Eigenschaft der sich bei steigender Steifigkeit im Bereich der Verzweigung schlagartig vergrößernden Amplituden, die Tangente an die zugehörige(n) Kurve(n) verläuft im Verzweigungspunkt vertikal. Deshalb ist in der Praxis auch keine zusätzliche Energiezufuhr für das Springen der Walze erforderlich. Das Diagramm zeigt weiter auf, dass bei steigender Steifigkeit (Verdichtung) weitere Verzweigungen folgen, und zwar in immer kürzeren Abständen bezogen auf die kontinuierlich zunehmende Steifigkeit k_B . Die Verzweigungen erzeugen eine Kaskade neuer Schwingungsanteile mit der jeweils halben Frequenz der vorhergehend tiefsten Frequenz des Spektrums. Da sich die erste Verzweigung aus der Grundschiwingung mit der Frequenz f , bzw. Periode T , absplattet, entsteht die Frequenz-Kaskade f , $f/2$, $f/4$, $f/8$ etc. Analog zur Grundschiwingung generieren auch die subharmonischen Oberwellen und es entsteht ein Frequenzkontinuum im tieffrequenten Bereich des Signalspektrums. Dies ist ebenfalls eine spezifische Eigenschaft des chaotischen Systems, im vorliegenden Fall also der vibrierenden Vibrationsplatte.

[0091] Man beachte, dass sich das System des Verdichtungsgerätes in einem deterministischen und nicht in einem stochastischen chaotischen Zustand befindet. Da die Parameter, welche den chaotischen Zustand bewirken, nicht alle messbar sind (nicht vollständig beobachtbar), kann der Betriebszustand der subharmonischen Schwingungen nicht für die praktische Verdichtung prädiziert werden. Das Betriebsverhalten in der Praxis ist zudem durch viele Unwägbarkeiten gekennzeichnet, die Maschine kann durch den starken Kontaktverlust zum Boden wegrutschen, die Belastung der Maschine durch die tieffrequenten Schwingungen wird sehr hoch. Laufend können weitere Bifurkationen des Maschinenverhaltens (unverhofft) auftreten, die sofort starke Zusatzbelastungen zur Folge haben. Hohe Beanspruchungen treten auch zwischen Bandage und Boden auf; dies führt zur unerwünschten Auflockerung oberflächennaher Schichten und zieht Kornzertrümmerungen nach sich.

[0092] So wird bei neuen Geräten, die über eine aktive Regelung der Maschinenparameter in Funktion gemessener Größen verfügen (z.B. ACE: Ammann Compaction Expert) bei Auftreten der ersten subharmonischen Schwingung mit der Frequenz $f/2$ sofort die Unwucht und damit die Energiezufuhr verringert. Diese Massnahme verhindert zuverlässig das unerwünschte Springen oder Taumeln der Bandage. Zudem garantiert eine kraftgesteuerte Regelung von Amplitude und Frequenz des Verdichtungsgerätes eine Steuerung der Nichtlinearität und damit eine sichere Verhinderung des Springens/Taumelns, die ja letztlich die Folge der auftretenden Nichtlinearität ist.

[0093] Aufgrund der Tatsache, dass die subharmonischen Schwingungen einen jeweils neuen Bewegungszustand der Maschine darstellen, müssten Relativmessungen, z. B. zur Erfassung des Verdichtungszustandes des Bodens, für jede neu auftretende subharmonische Schwingung neu auf die Bezugsprüfverfahren, wie beispielsweise den Druckplattenversuch (DIN 18 196) geeicht werden. Auf diese Relativmessung kann verzichtet werden, wie unten erläutert wird.

[0094] Im Fall eines "Kompaktometers", bei dem zur Verdichtungskontrolle das Verhältnis von erster Oberwelle $2f$ zu Grundschiwingung f verwendet wird, ändert sich mit dem Auftreten des Springens die Korrelation grundsätzlich; nur

innerhalb des jeweiligen Verzweigungszustandes der Bewegung existiert ein linearer Zusammenhang des Messwerts mit der Bodensteifigkeit.

[0095] Bei konstant belassenen Maschinenparametern kann das kaskadenartige Auftreten der Bifurkationen und Oberwellen mit ihren zugehörigen Periodenverdoppelungen analog den Grosswalzen als Indikator für die zunehmende Bodensteifigkeit und Verdichtung dienen (relative Verdichtungskontrolle).

[0096] Währenddem Walzen, vom Walzenzug bis zur handgeführten Grabenwalze, die Abrollbewegung der Bandagen für ihre Fortbewegung nutzen und damit kein direkter Zusammenhang zwischen Vibration und Vorwärtsbewegung besteht, ist die Vibrationsplatte für ihre Fortbewegung immer auf das periodische Abheben vom Boden angewiesen, gesteuert durch die Neigung ihres Richtschwingers. Deshalb sind die Vibrationen und die Fortbewegung miteinander direkt gekoppelt, Platten und Stampfer weisen in der Folge immer ein nichtlineares Schwingungsverhalten auf. Dadurch geraten die Geräte mit zunehmender Steifigkeit k_B schneller in den Bereich des Periodenverdoppelungsszenarios, chaotische Betriebszustände treten bei ihnen häufiger auf als bei Walzen.

[0097] Der Sensor zur Aufnahme der Schwingungsform des Schwingungssystems ist gemäss obiger Beschreibung am Unterwagen **5** oder am Oberwagen **7** angeordnet. Bei einer Anordnung am Oberwagen **7** sind Schwingungsbeeinflussungen durch die Dämpfungselemente, wie oben skizziert, zu beachten.

[0098] Die zur Verdichtung wenigstens eines Bodenbereichs **3** über dessen Bodenoberfläche **2** bewegbare Vorrichtung **1** hat hier beispielsweise eine Unwuchteinheit **40**, eine Einstelleinheit **41**, ein Zeitglied **43**, eine Vergleichereinheit **45**, eine Messeinheit **47**, eine Speichereinheit **49**, eine Ortsbestimmungseinheit **51** und eine Sende- und Empfangseinheit **53**. Diese Funktionsblöcke sind schematisch in **Figur 6** dargestellt.

[0099] Die Unwuchteinheit **40** hat ein einstellbares Unwuchtmoment und eine einstellbare Unwuchtfrequenz. Die Verstellung bzw. Einstellung wird mittels einer mit der Unwuchteinheit **40** mechanisch verbundenen Einstelleinheit **41** vorgenommen. Die Ortsbestimmungseinheit **51** ist signalmässig mit der Speichereinheit **49** verbunden. Mit der Ortsbestimmungseinheit wird die Lage des gerade im Verdichtungsprozess befindlichen Bodenbereichs **3** ermittelt. Die Lage d.h. die Ortskoordinaten können trigonometrisch über Peilung oder mittels GPS bestimmt werden. Die Messeinheit **47** ist hier beispielsweise auf der Bodenplatte **4** angeordnet und signalmässig mit der Vergleichereinheit **45** und der Speichereinheit **49** verbunden. Die Messeinheit **47** ermittelt gemäss obigen Ausführungen selbsttätig den Verdichtungsstwert des Bodenbereichs **3** während der Verdichtung. Dieser Bodenverdichtungsstwert wird zusammen mit den durch die Ortsbestimmungseinheit **51** ermittelten Ortskoordinaten als bereichsspezifischer Verdichtungsstwert in der Speichereinheit **49** abgespeichert. Die Vergleichereinheit **45** dient zum Vergleich des jeweiligen bereichsspezifischen Verdichtungsstwertes mit einem zugeordneten bereichsspezifischen Verdichtungssollwertes, um durch die Einstelleinheit **41** korrigierte bereichsspezifische Unwucht- und Unwuchtfrequenzwerte für eine nachfolgende Verdichtungsüberfahrt zu erhalten. Die Vergleichereinheit **45** ist signalmässig mit der Messeinheit **47**, der Speichereinheit **49** und dem Zeitglied **43** verbunden.

[0100] Die Recheneinheit **50** beinhaltet das Zeitglied **43**, die Vergleichereinheit **45**, die Speichereinheit **49** und eine "Central-Processing-Unit" **52**. Die Recheneinheit **50** ist zudem mit der Sende- und Empfangseinheit **53** und der Ortsbestimmungseinheit **51** verbunden. Die Recheneinheit **50** führt sämtliche Berechnungen durch, um aus abgespeicherten und übermittelten Daten die entsprechenden Maschinendaten für eine optimale Verdichtung einzustellen. Sie stellt auch die Daten für eine Übermittlung zu einer Zentrale oder anderen Verdichtungsanordnungen zur Verfügung.

[0101] Das Zeitglied **43** dient dazu der Einstelleinheit **41** zum richtigen Zeitpunkt die Werte für eine Verstellung des Unwuchtmomentes und der Unwuchtfrequenz zur Verfügung zu stellen. Es müssen hier insbesondere Massen verstellt, beschleunigt bzw. abgebremst werden. Hierzu wird Zeit benötigt. Das Zeitglied muss somit vorausschauend aus der Bewegungsrichtung und Bewegungsgeschwindigkeit die Einstellwerte ermitteln.

[0102] Die Datenempfangs- und -übermittlungseinheit **53** dient zum Empfang bereichsspezifischer Verdichtungssollwerte, insbesondere zum Empfang von bereichsspezifischen Verdichtungsstwertes eines vorgängigen Verdichtungs Vorganges. Ferner dient die Datenempfangs- und -übermittlungseinheit **53** zur Übermittlung der Lage von Bereichen und deren bei der Verdichtung ermittelten Verdichtungsstwertes. Die Datenempfangs- und -übermittlungseinheit **53** ist signalmässig mit der Speichereinheit **49** verbunden, von der dann eine signalmässige Verbindung mit der Vergleichereinheit **45**, der Messeinheit **47** und über das Zeitglied **43** mit der Einstelleinheit **41** gegeben ist.

[0103] Der obige Verdichtungs Vorgang ist anhand einer Vibrationsplatte lediglich beispielsweise erklärt worden. Anstelle der Vibrationsplatte können selbstverständlich jegliche Arten von Walzen und Stampfern verwendet werden.

[0104] Bei der Vibrationsplatte ist die Fahrtrichtungseinstelleinheit lediglich durch eine Bedienung der Führungsdeichsel **9** gegeben. Bei den diversen Walzentypen erfolgt eine Fahrtrichtungseinstellung in der Regel durch ein Lenkrad.

[0105] **Figur 7** zeigt analog zum Geländebereich **14** einen zu verdichtenden Geländeabschnitt **60**, der mit zwei schematisch dargestellten Walzen **61a** und **61b** und einer Vibrationsplatte **63** verdichtet werden soll. Die Walzen **61a** und **61b** sowie die Vibrationsplatte **63** haben je eine Ortsbestimmungseinheit **65a** bis **65c**. Die Kommunikation zwischen diesen drei Vorrichtungen **61a**, **61b** und **63** zur Datenübertragung der jeweiligen bereichsspezifischen Verdichtungsstwertes erfolgt von jeder Vorrichtung zu jeder Vorrichtung, schematisch durch die Doppelpfeile **67a**, **67b** und **67c** angedeutet. Zur weiteren Veranschaulichung enthält der Geländeabschnitt **60** eine Fehlstelle **69** als nicht verdichtbaren

Bereich. Eine der drei Vorrichtungen **61a**, **61b** und **63** wird diese Fehlstelle **69** versuchen zu verdichten und dann einen bereichsspezifischen Verdichtungsistwert feststellen, der unterhalb des bereichsspezifischen Verdichtungssollwertes liegt. Dieser Verdichtungsistwert wird mit der entsprechenden Lageposition an die beiden anderen Vorrichtungen übermittelt und in der gerade verdichtenden Vorrichtung gespeichert. Bei einem nun folgenden Verdichtungsverfahren stellt nun dieselbe Vorrichtung oder eine der anderen Vorrichtungen fest, dass bei einem weiteren Verdichtungsverfahren der bereichsspezifische Verdichtungsistwert innerhalb eines vorgegebenen Toleranzwertes nicht zugenommen hat. Bei weiteren Verdichtungsverfahren wird nun diese Fehlstelle **69** als nicht verdichtbar ausgenommen d.h. nicht mehr überfahren. Sollte ein Ausklammern des Überfahrens nicht möglich sein, da ansonsten anliegende Bereiche nicht verdichtend überfahren werden können, so wird mit einer erhöhten Verfahrensgeschwindigkeit und zurückgesetzter Verdichtungsleistung (lediglich Glätten der Oberfläche) diese Fehlstelle **69** überfahren. Analog wird mit Bereichen verfahren, welche bereits den vorgegebenen bereichsspezifischen Verdichtungsistwert erreicht haben.

[0106] Eine Abwandlung zu der in **Figur 7** dargestellten Geräteanordnung, zeigt **Figur 8**. In **Figur 8** ist eine Zentrale **70** vorhanden, mit der sämtliche Verdichtungsvorrichtungen, hier ebenfalls beispielsweise die Vibrationsplatte **63** und die beiden Walzen **61a** und **61b**, über deren Datenempfangs- und -übermittlungseinheit **71** miteinander kommunizieren. Die Zentrale **70** wird in der Regel das so genannte Baubüro sein, bei dem alle Informationen zusammenlaufen. Zu dieser Zentrale **70** übermitteln dann die Verdichtungsvorrichtungen **61a**, **61b** und **63** die bereichsspezifischen Verdichtungsistwerte, welche entsprechend in einem Datenspeicher **73** gesammelt und ausgewertet werden. In der Zentrale **70** entsteht dann analog zu **Figur 1** (jedoch mit bedeutend gleichmäßigeren Verdichtungswerten) ein Geländebereich aus dem dann die erreichten Verdichtungswerte erkennbar sind. Die Fehlstelle **69** würde sich in einer derartigen Darstellung gut herausheben. Die Zentrale **70** würde dann Massnahmen, wie z.B. einen Materialaustausch des Bodenmaterials vornehmen.

[0107] In der obigen Beschreibung wurden Bodenbereiche verdichtet. In einer analogen Verfahrensweise mit denselben Verdichtungsvorrichtungen lassen sich jedoch auch auf einem Bodenbereich aufgebraachte Beläge, wie Asphaltbeläge, verdichten.

[0108] Zusammenfassend ist festzustellen, dass durch die Erfindung ein System geschaffen worden ist, welches neue Möglichkeiten für eine effiziente Baustellenbewirtschaftung schafft.

Patentansprüche

1. System für die koordinierte Bodenbearbeitung, umfassend

a) eine Mehrzahl von Verdichtungsvorrichtungen (W1, W2) zur Bodenverdichtung, wobei die Verdichtungsvorrichtungen (W1, W2) zum Ermitteln von ortsbezogenen relativen Verdichtungswerten ($V(W1;TB1, xi, yi; i = 1...n)$) ausgebildet sind,

gekennzeichnet durch :

b) eine Eichvorrichtung (EV) zum Ermitteln von ortsbezogenen absoluten Verdichtungswerten,

c) eine Recheneinheit (R) zum Korrelieren von relativen und absoluten ortsbezogenen Verdichtungswerten, wobei Verdichtungsvorrichtungen (W1, W2), Eichvorrichtung (EV) und Recheneinheit (R) nachrichtentechnisch miteinander verbunden sind, und

d) eine Systemsteuerung (CPU1, ..., CPU4), welche derart ausgebildet ist, dass die ortsbezogenen relativen Verdichtungswerte der Verdichtungsvorrichtungen (W1, W2) sowie die ortsbezogenen absoluten Verdichtungswerte laufend an die Recheneinheit (R) übermittelt, dort abgespeichert und beim Vorhandensein von ortsgleichen Verdichtungswerten Verdichtungskorrelationswerte berechnet und an die Verdichtungsvorrichtungen übermittelt und dort als Korrekturwert abgespeichert werden.

2. System nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Systemsteuerung derart ausgebildet ist, dass jeder Verdichtungsvorrichtung eine Identifikation zugeordnet wird und dass in der Recheneinheit ortsbezogene relative Verdichtungswerte zusammen mit der Identifikation gespeichert werden.

3. System nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Recheneinheit zum Abspeichern einer Bodenbereichskarte ausgebildet ist.

4. System nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Recheneinheit derart ausgebildet ist, dass ein ortsbezogener relativer Verdichtungswert mit Eigenschaftswerten einer bearbeiteten Bodenschicht verknüpft wird.

5. System nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** Eichvorrichtung und Verdichtungs-

vorrichtung mit einem GPS-Gerät zur Ortsbestimmung ausgerüstet sind.

6. System nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Eichvorrichtung als Verdichtungs-
vorrichtung, insbesondere als Verdichtungswalze ausgebildet ist.
7. System nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** es eine Mehrzahl von Verdichtungs-
vorrichtungen ohne Eichvorrichtungen hat.
8. Betriebsverfahren für das System nach Anspruch 1 zum Erstellen eines verdichteten Bodenbereichs mit folgenden
Schritten:
 - a) Überfahren zumindest eines Teilbereichs des Bodenbereichs mit einer Verdichtungsvorrichtung, welche beim
Überfahren mindestens einen relativen, ortsbezogenen Verdichtungswert ermittelt,
 - b) Ermitteln eines absoluten ortsbezogenen Verdichtungswertes im Teilbereich mit einer Eichvorrichtung,
 - c) automatisches nachrichtentechnisches Übermitteln von gemäß Schritt a) und b) ermittelten relativen und
ortsbezogenen absoluten Verdichtungswerten an eine Recheneinheit,
 - d) Ermitteln zumindest eines Korrelationswertes zwischen relativem und absolutem Verdichtungswert,
 - e) automatisches Übermitteln des Korrelationswertes an die Verdichtungsvorrichtung, und
 - f) Nachführen eines Referenzwertes - sofern nötig - in der Verdichtungsvorrichtung entsprechend dem über-
mittelten Korrelationswert.
9. Betriebsverfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** zunächst der absolute ortsbezogene Ver-
dichtungswert ermittelt wird und zu einem späteren Zeitpunkt mit der Verdichtungsvorrichtung der Teilbereich in
einer nicht-verdichtenden Weise befahren wird, um beim Überfahren mindestens einen relativen, ortsbezogenen
Verdichtungswert zu ermitteln.
10. Betriebsverfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** zunächst mit der Verdichtungsvorrichtung
der Teilbereich in einer verdichtenden Weise befahren wird und beim Überfahren mindestens ein relativer, ortsbe-
zogener Verdichtungswert ermittelt wird und dass zu einem späteren Zeitpunkt der absolute ortsbezogene Verdich-
tungswert ermittelt wird.
11. Betriebsverfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Eichvorrichtung eine weitere Verdich-
tungsvorrichtung verwendet wird, welche nicht nur zur Bestimmung relativer sondern auch absoluter Verdichtungs-
werte ausgebildet ist.
12. Betriebsverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** mehrere Teilbereiche
sowohl mit der Verdichtungsvorrichtung als auch mit einer weiteren Verdichtungsvorrichtung überfahren werden.
13. Betriebsverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** in der Recheneinheit Daten,
insbesondere Material und Schichtdicke, über den Schichtaufbau abgespeichert werden und diese Daten den Ver-
dichtungswerten zugeordnet werden.

Claims

1. System for co-ordinated ground processing, comprising
 - a) a plurality of compaction apparatuses (W1, W2) for ground compaction, with the compaction apparatuses
(W1, W2) being designed to determine position-related relative compaction values ($V(W1;TB1, x_i, y_i; i = 1...n)$),
characterized by:
 - b) a calibration apparatus (EV) for determination of position-related absolute compaction values,
 - c) a computation unit (R) for correlation of relative and absolute position-related compaction values, with the
compaction apparatuses (W1, W2), calibration apparatus (EV) and computation unit (R) being connected to
one another for information transmission purposes, and
 - d) a system controller (CPU1, ..., CPU4) which is designed such that the position-related relative compaction
values of the compaction apparatuses (W1, W2) and the position-related absolute compaction values are trans-
mitted continuously to the computation unit (R), are stored there and, if compaction values of the same position
are present, compaction correlation values are calculated, are transmitted to the compaction apparatuses and

are stored there as a correction value.

2. System according to Claim 1, **characterized in that** the system controller is designed such that each compaction apparatus is allocated an identification, and **in that** position-related relative compaction values are stored together with the identification in the computation unit.
3. System according to Claim 1 or 2, **characterized in that** the computation unit is designed to store a ground area map.
4. System according to one of Claims 1 to 3, **characterized in that** the computation unit is designed to link a position-related relative compaction value with characteristic values of a processed ground layer.
5. System according to one of Claims 1 to 4, **characterized in that** the calibration apparatus and compaction apparatus are equipped with a GPS appliance for position-finding.
6. System according to one of Claims 1 to 5, **characterized in that** the calibration apparatus is in the form of a compaction apparatus, in particular a compaction roller.
7. System according to one of Claims 1 to 6, **characterized in that** the system has a plurality of compaction apparatuses without calibration apparatuses.
8. Operating method for the system according to Claim 1 for creation of a compacted ground area having the following steps:
 - a) at least one subarea of the ground area is driven over with a compaction apparatus which determines at least one relative, position-related compaction value while the area is being driven over,
 - b) determination of an absolute position-related compaction value in the subarea by means of a calibration apparatus,
 - c) automatic transmission of information relating to relative and position-related absolute compaction values determined in step a) and b) to a computation unit,
 - d) determination of at least one correlation value between the relative and absolute compaction value,
 - e) automatic transmission of the correlation value to the compaction apparatus, and
 - f) readjustment of a reference value - if necessary - in the compaction apparatus corresponding to the transmitted correlation value.
9. Operating method according to Claim 8, **characterized in that** the absolute position-related compaction value is determined first of all, and the subarea is driven over in a non-compacting manner at a later time with the compaction apparatus in order to determine at least one relative, position-related compaction value while driving over this area.
10. Operating method according to Claim 8, **characterized in that** the subarea is first of all driven over in a compacting manner by the compaction apparatus and at least one relative, position-related compaction value is determined while driving over this area, and **in that** the absolute position-related compaction value is determined at a later time.
11. Operating method according to Claim 8, **characterized in that** a further compaction apparatus is used as the calibration apparatus and is designed to determine not only relative but also absolute compaction values.
12. Operating method according to one of Claims 8 to 11, **characterized in that** a plurality of subareas are driven over both by the compaction apparatus and by a further compaction apparatus.
13. Operating method according to one of Claims 8 to 12, **characterized in that** data, in particular material and layer thickness, relating to the layer structure is stored in the computation unit, and this data is associated with the compaction values.

Revendications

1. Système pour le traitement coordonné du sol, comprenant
 - a) une pluralité de dispositifs de compactage (W1, W2) pour le compactage du sol, les dispositifs de compactage

(W1, W2) étant configurés pour déterminer des valeurs de compactage ($V(W1 ; TB1, x_i, y_i ; i = 1 \dots n)$) relatives localisées,

caractérisé par :

b) un dispositif d'étalonnage (EV) pour déterminer des valeurs de compactage absolues localisées,

c) une unité de calcul (R) pour corrélérer les valeurs de compactage localisées relatives et absolues, les dispositifs de compactage (W1, W2), le dispositif d'étalonnage (EV) et l'unité de calcul (R) étant reliés informatiquement entre eux, et

d) un contrôleur de système (CPU1 ..., CPU4) qui est configuré de telle sorte que les valeurs de compactage relatives localisées des dispositifs de compactage (W1, W2) ainsi que les valeurs de compactage absolues localisées sont continuellement communiquées à l'unité de calcul (R), y sont enregistrées et, en présence de valeurs de compactage locales identiques, des valeurs de corrélation de compactage sont calculées et communiquées aux dispositifs de compactage et y sont enregistrées en tant que valeur de correction.

2. Système selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le contrôleur de système est configuré de telle sorte qu'une identification est associée à chaque dispositif de compactage et **en ce que** des valeurs de compactage relatives localisées sont enregistrées dans l'unité de calcul en association avec l'identification.

3. Système selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** l'unité de calcul est configurée pour enregistrer une carte de la zone du sol.

4. Système selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** l'unité de calcul est configurée de telle sorte qu'une valeur de compactage relative localisée est combinée avec des valeurs de propriété d'une couche de sol traitée.

5. Système selon l'une des revendications 1 à 4, **caractérisé en ce que** le dispositif d'étalonnage et le dispositif de compactage sont équipés d'un appareil GPS pour la détermination de l'emplacement.

6. Système selon l'une des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** le dispositif d'étalonnage est configuré sous la forme d'un dispositif de compactage, notamment sous la forme d'un cylindre de compactage.

7. Système selon l'une des revendications 1 à 6, **caractérisé en ce qu'il** est muni d'une pluralité de dispositifs de compactage sans dispositifs d'étalonnage.

8. Procédé de fonctionnement pour le système selon la revendication 1 en vue de créer une zone de sol compactée, comprenant les étapes suivantes :

a) passage sur au moins une zone partielle de la zone du sol avec un dispositif de compactage qui, lors du passage, détermine au moins une valeur de compactage localisée relative,

b) détermination d'une valeur de compactage localisée absolue dans la zone partielle avec un dispositif d'étalonnage,

c) communication automatique de manière informatique à une unité de calcul des valeurs de compactage localisées absolues et relatives déterminées selon les étapes a) et b),

d) détermination d'au moins une valeur de corrélation entre les valeurs de compactage relative et absolue,

e) communication automatique de la valeur de corrélation au dispositif de compactage, et

f) poursuite d'une valeur de référence, si nécessaire, dans le dispositif de compactage conformément à la valeur de corrélation communiquée.

9. Procédé de fonctionnement selon la revendication 8, **caractérisé en ce que** la valeur de compactage localisée absolue est déterminée initialement et un passage sans compactage est effectué à un moment ultérieur avec le dispositif de compactage sur la zone partielle afin de déterminer lors du passage au moins une valeur de compactage localisée relative.

10. Procédé de fonctionnement selon la revendication 8, **caractérisé en ce qu'un** passage avec compactage est effectué initialement sur la zone partielle avec le dispositif de compactage et au moins une valeur de compactage localisée relative est déterminée lors du passage et **en ce que** la valeur de compactage localisée absolue est déterminée à un moment ultérieur.

11. Procédé de fonctionnement selon la revendication 8, **caractérisé en ce que** le dispositif d'étalonnage utilisé est un

dispositif de compactage supplémentaire qui est configuré pour déterminer non seulement les valeurs de compactage relatives, mais aussi absolues.

5 12. Procédé de fonctionnement selon l'une des revendications 8 à 11, **caractérisé en ce qu'**un passage sur plusieurs zones partielles est effectué aussi bien avec le dispositif de compactage qu'avec un dispositif de compactage supplémentaire.

10 13. Procédé de fonctionnement selon l'une des revendications 8 à 12, **caractérisé en ce que** dans l'unité de calcul sont enregistrées des données, notamment le matériau et l'épaisseur de couche, sur la structure stratifiée et ces données sont associées aux valeurs de compactage.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

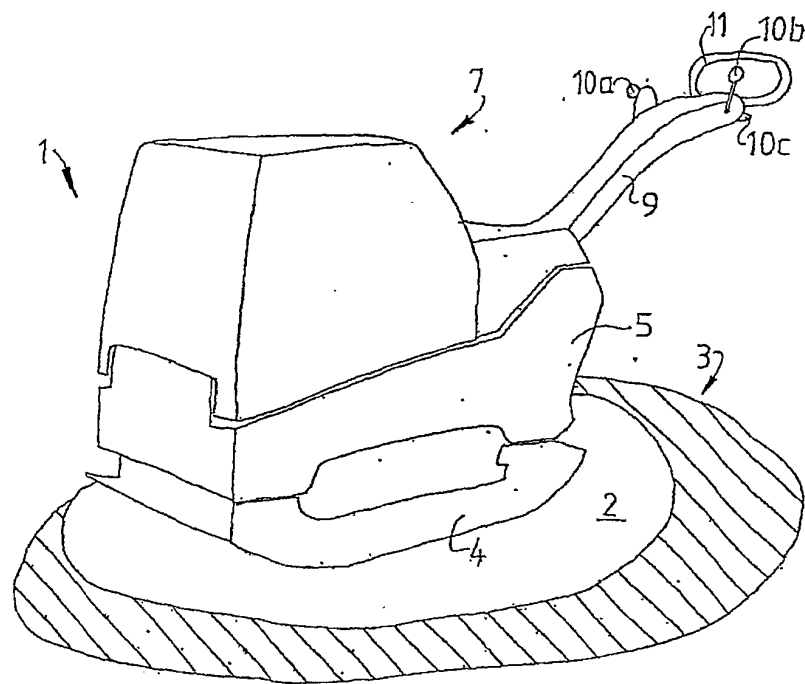
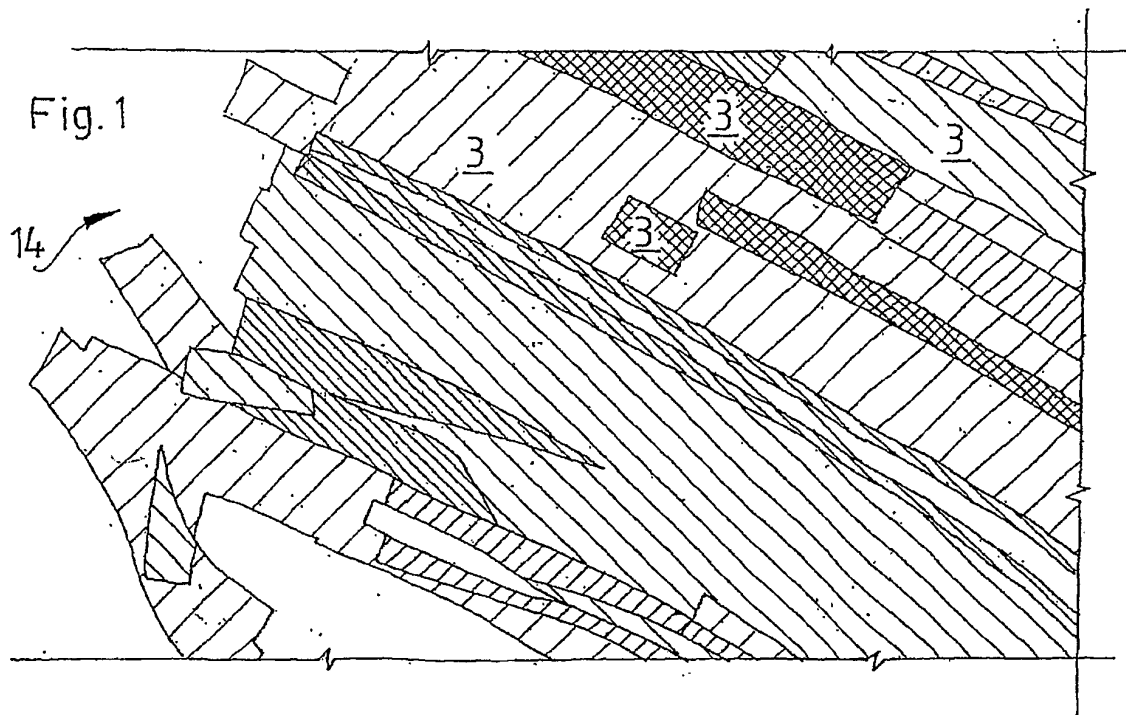


Fig. 2

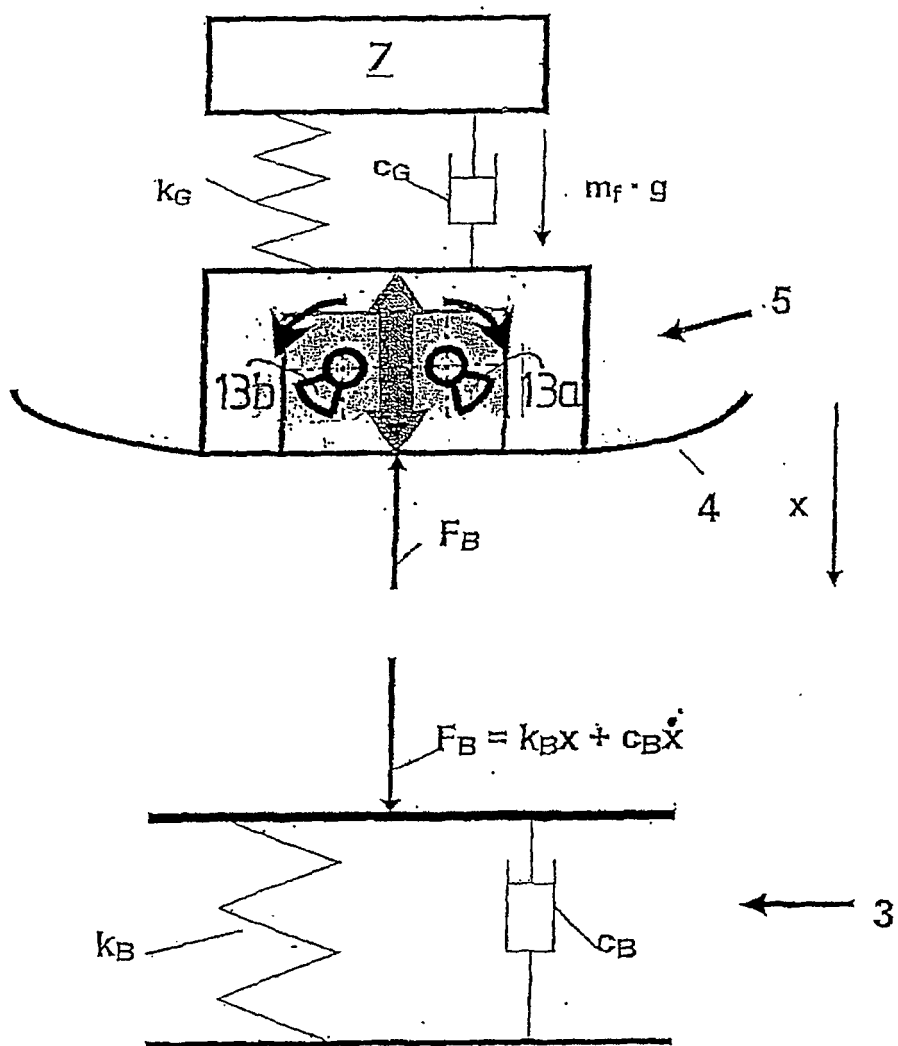
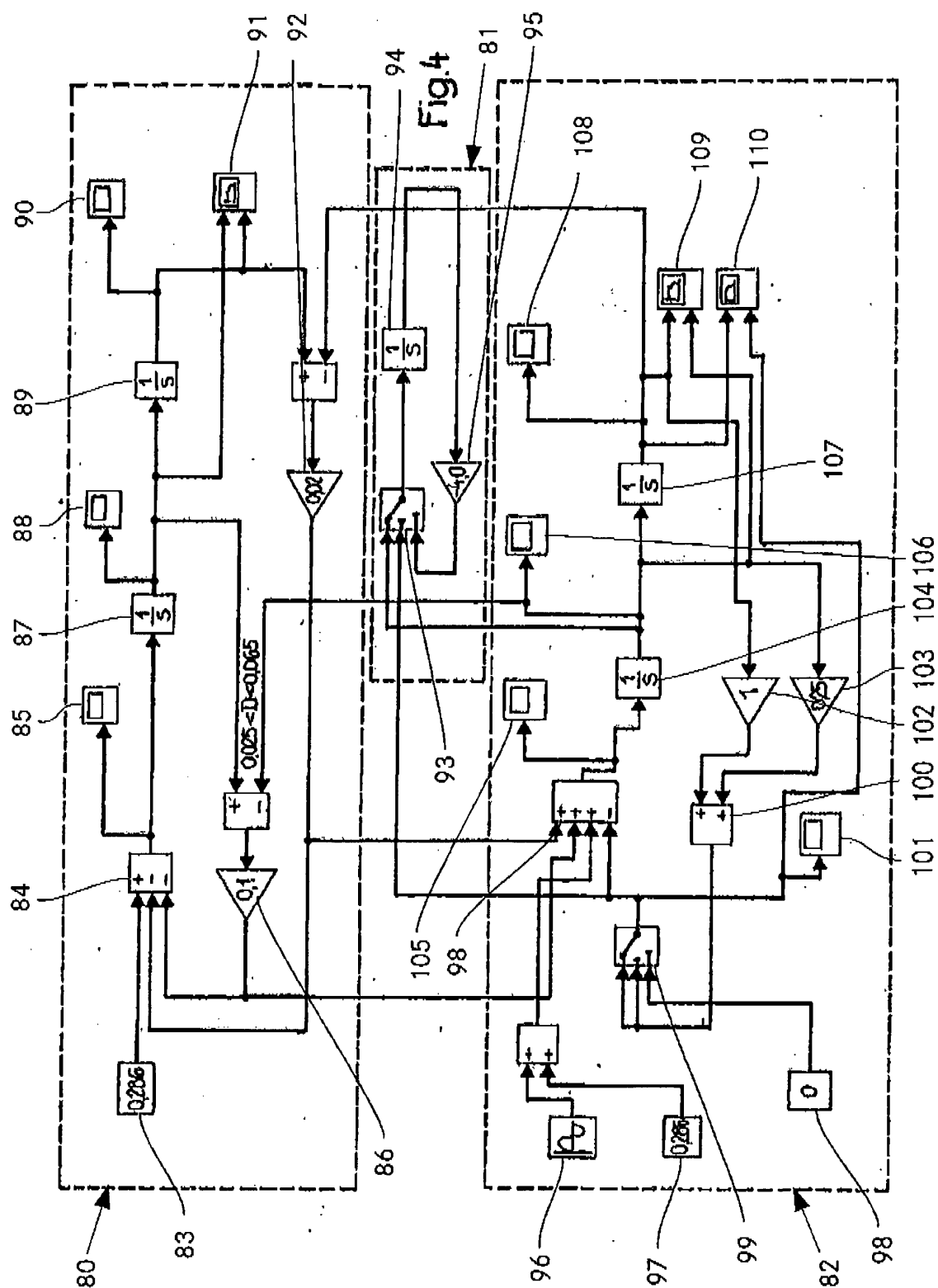


Fig. 3



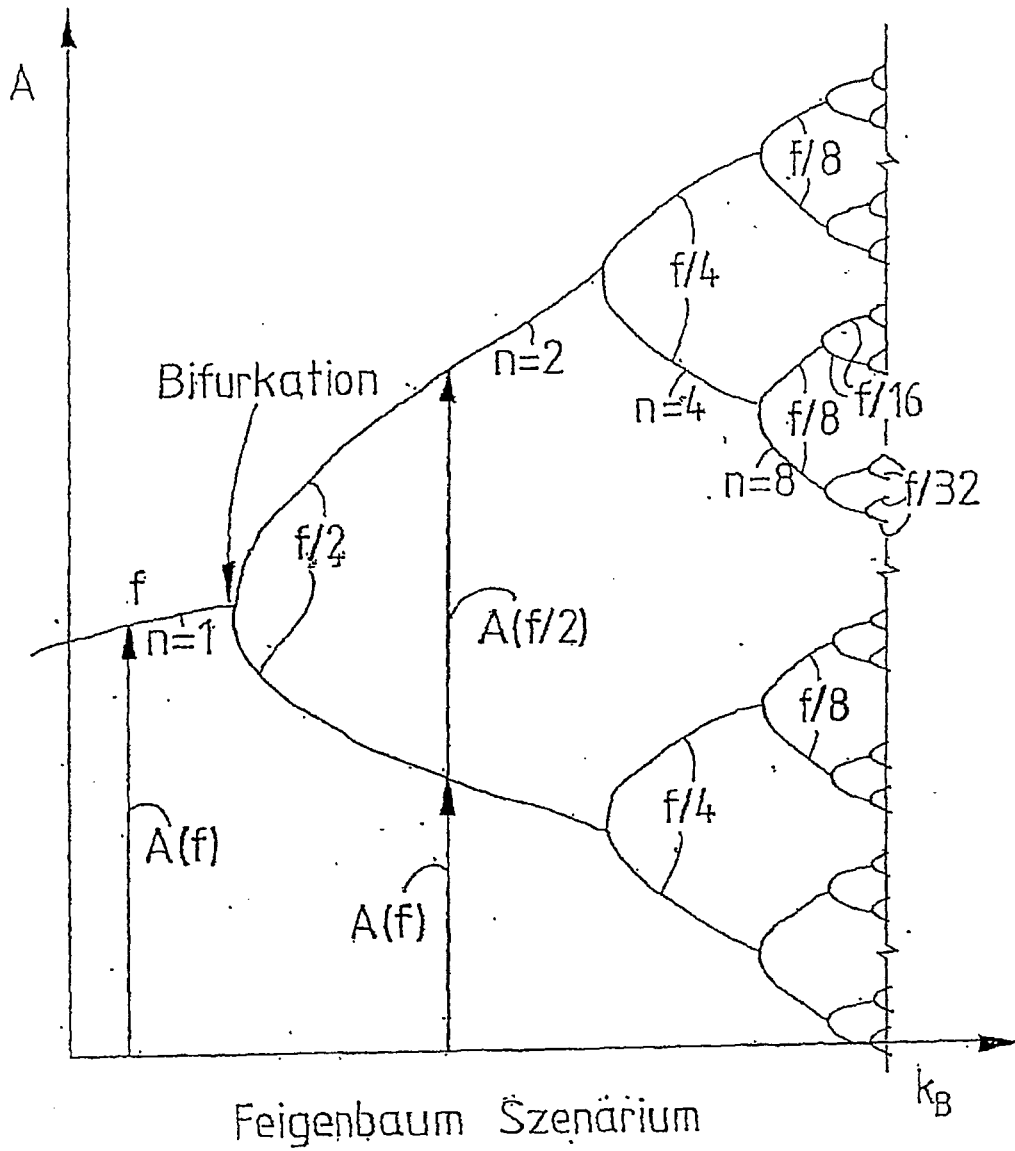
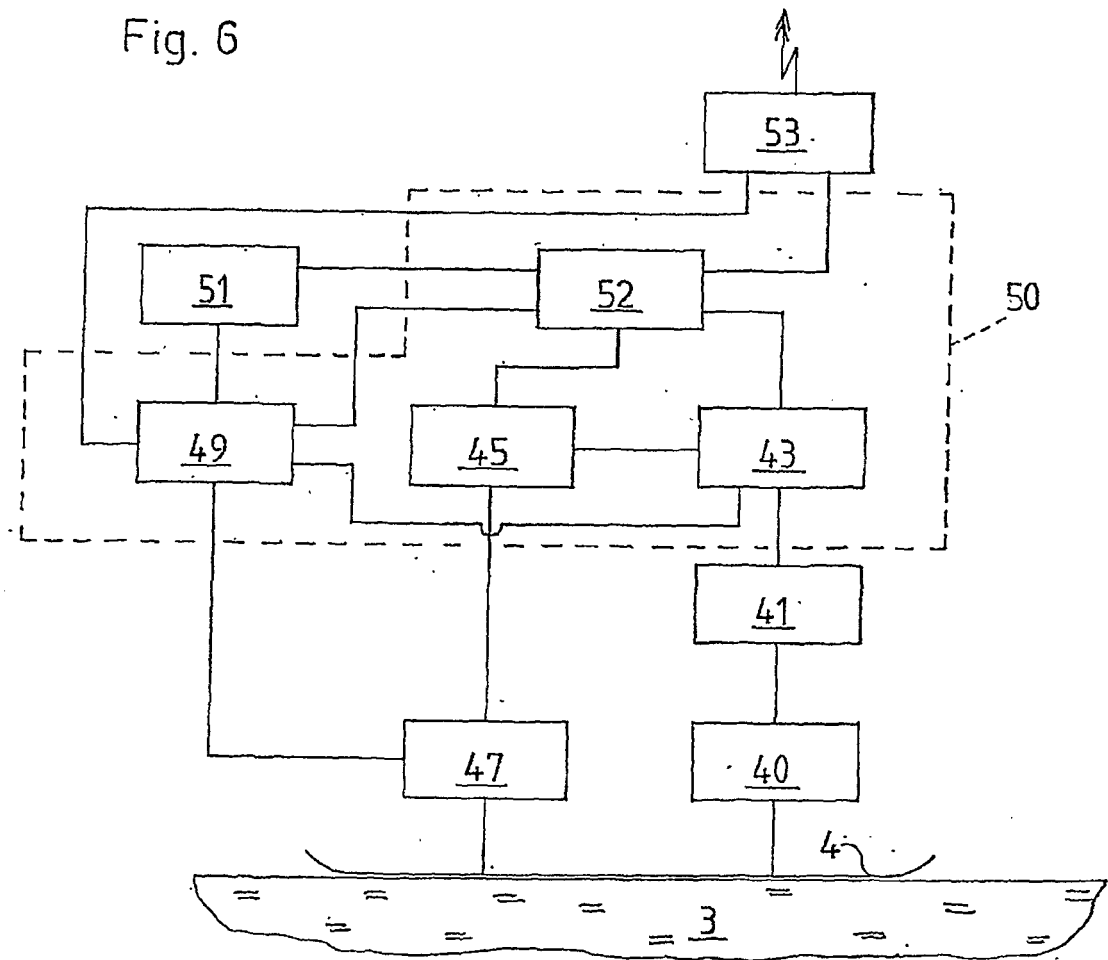


Fig. 5

Fig. 6



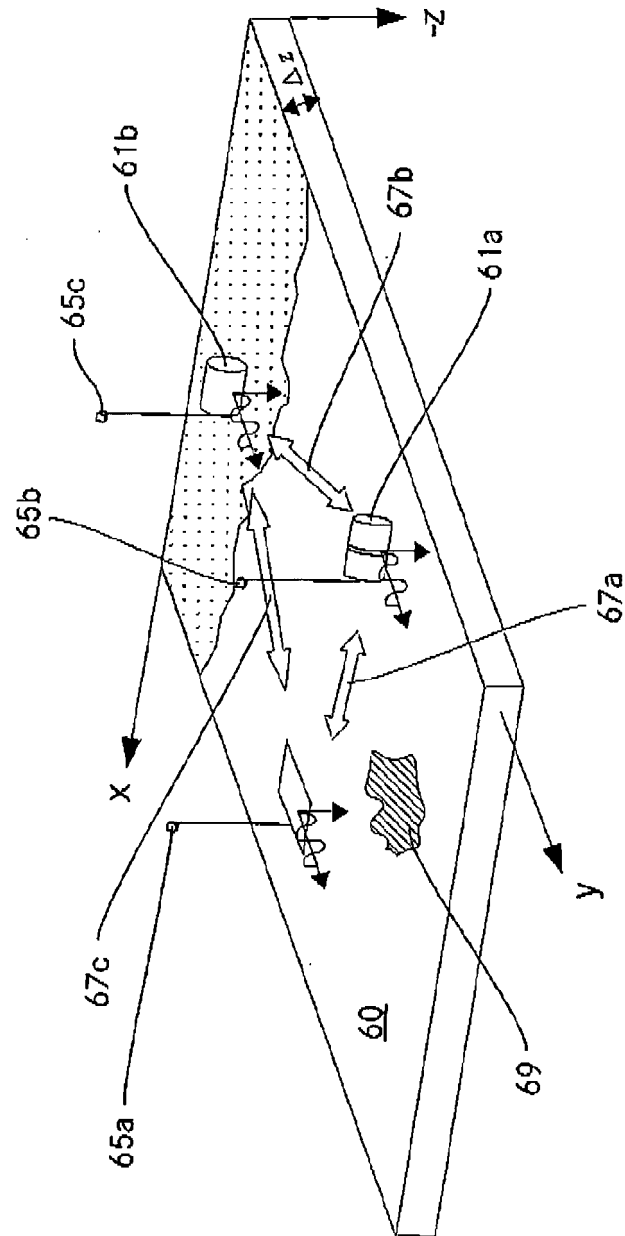
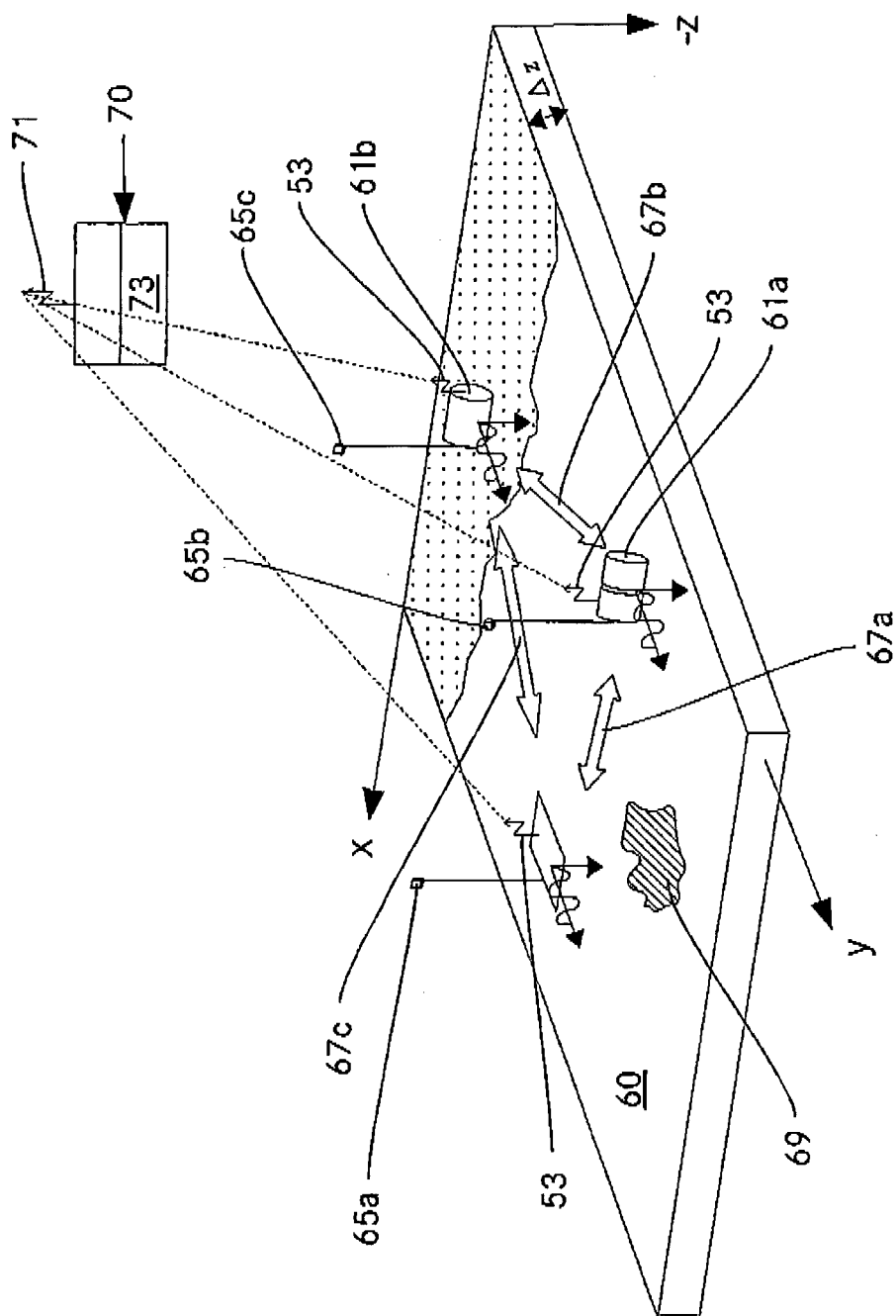


Fig. 7



∞
 $\dot{b}_0$
 $\dot{E}$

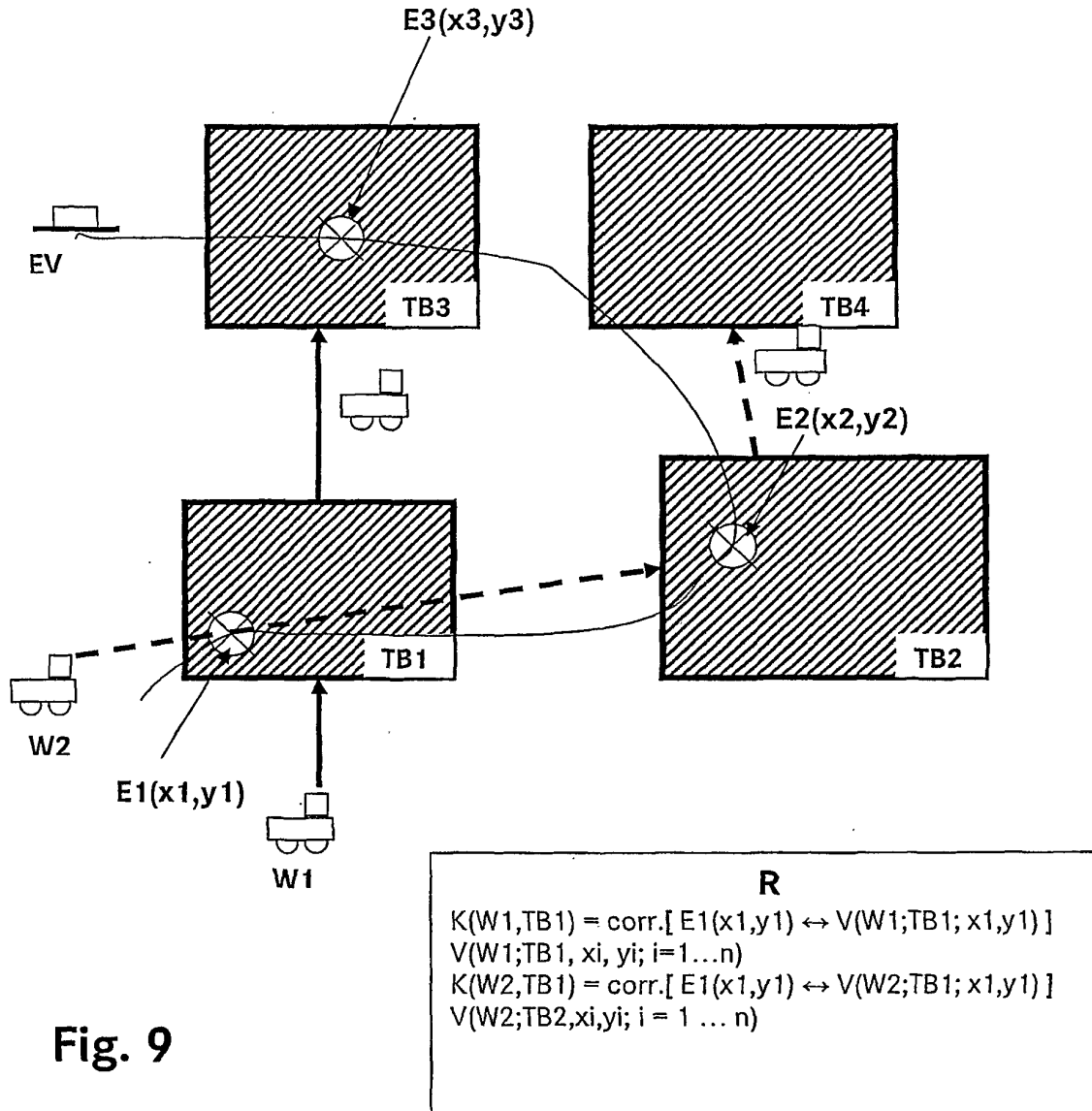


Fig. 9

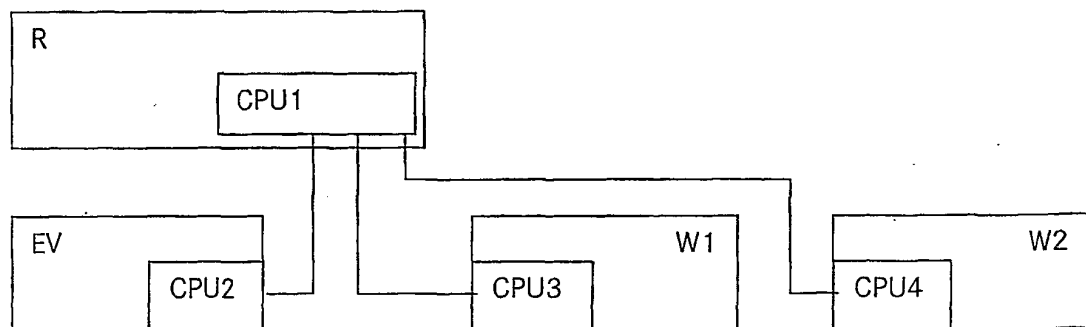


Fig. 10

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- WO 2005028755 A, Ammann [0002] [0016]
- DE 19956943 A1, Bomag [0003]
- WO 9528524 A [0004]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **G. LUNDBERG.** Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens. *Elastische Berührung zweier Halbräume*, September 1939, vol. 10, 201-211 [0039]
- Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern. **ANDEREGG ROLAND.** Fortschritte VDI, Reihe 4. VDI Verlag, 1998 [0079]