

(19)



(11)

EP 1 516 961 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
25.12.2013 Patentblatt 2013/52

(51) Int Cl.:
E01C 19/28^(2006.01) E02D 3/046^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **03405688.7**

(22) Anmeldetag: **19.09.2003**

(54) Verfahren zur Ermittlung einer Bodensteifigkeit und Bodenverdichtungsanordnung

Method for determining soil rigidity and soil compaction device

Méthode de détermination de la rigidité du sol et dispositif de compactage de sol

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

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

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
23.03.2005 Patentblatt 2005/12

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

(56) Entgegenhaltungen:
US-A- 5 695 298 US-B1- 6 244 102 US-B1- 6 431 790

- (72) Erfinder:
- **Anderegg, Roland, Dr. CH-4600 Olten (CH)**
 - **Drees, Ulrich D-59063 Hamm (DE)**
 - **Kuban, Andreas D-53332 Bornheim (DE)**
 - **Von Felten, Dominik CH-5000 Aarau (CH)**

- **ANDEREGG R: "VIBRATIONSWALZEN MIT REGELBAREN PARAMETERN UND DIE FDVK" STRASSEN UND TIEFBAU, GIESEL VERLAG FÜR PUBLIZITÄT, ISERNHAGEN, DE, Nr. 12, 1997, Seiten 11-17, XP000764416**

EP 1 516 961 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 Verfahren zur Ermittlung eines Masses für die Bodensteifigkeit (Verdichtungsgrad) eines verdichteten bzw. zu verdichtenden Bodenbereichs gemäss dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1, sowie eine Bodenverdichtungsvorrichtung gemäss dem Oberbegriff des Patentanspruchs 7.

Stand der Technik

10 **[0002]** In der Veröffentlichung von R. Anderegg, "Vibrationswalzen mit regelbaren Parametern und die FDVK", Straßen- und Tiefbau, Giesel Verlag für Publizität, Iserhagen, DE, Nr. 12. 1997, S. 11-17 wurde eine flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) beschrieben, welche zur Überwachung laufender und einer Nachprüfung abgeschlossener Verdichtungsarbeiten diene. Es wurden hauptsächlich Bandagenschwingungen in vertikaler Richtung berücksichtigt, wobei die Bandage und der verdichtete bzw. noch zu verdichtende Bodenbereich ein Schwingungssystem bildeten. Da die Bandage mit dem Boden nicht fest verbunden war, konnten lediglich zwischen Bodenbereich und Bandage Druck-, nicht aber Zugkräfte übertragen werden. Die Bodenreaktionskraft nahm deshalb nur positive Werte an. Die Bandage konnte vom Boden abheben. Durch den periodischen Kontaktverlust zwischen Bandage und Boden ergaben sich nicht-lineare Effekte, welche zu Oberschwingungen führten. Bei einer weiteren Zunahme der Nichtlinearität konnte eine subharmonische Schwingung mit halber Anregungsfrequenz auftreten. Die Verdichtungsvorrichtung begann zu springen oder zu taumeln. Traten subharmonische Schwingungen auf, wurde zu deren Vermeidung vorgeschlagen, die Unwucht zu verkleinern, da insbesondere das Taumeln zu Kornzertrümmerungen im Untergrund führte und die Bauwerks-
 20 fläche beschädigt wurde. Eine wachsende Eigenfrequenz des Systems Bandage /Bodenbereich dient als Mass für eine zunehmende Verdichtung.

25 **[0003]** In der deutschen Offenlegungsschrift DE-A 100 19 806 wurde ebenfalls versucht, ein "Springen" einer Bodenverdichtungsvorrichtung zu verhindern, da hierdurch eine Lockerung des bereits verdichteten Bodens eintreten kann, sowie eine rapide Erhöhung des Maschinenverschleisses auftritt. Hierzu wurden Schwingungen detektiert, welche Oberwellen der anregenden Schwingungen eines Bodenverdichtungselements sind. Es wurde hier davon ausgegangen, dass Oberwellen durch eine Rückwirkung einer überhöhten Schlagenergie auf einen bereits verdichteten Boden entstehen.
 30

[0004] In der DE-A 100 28 949 wurde ein System vorgestellt, welches sich zur Bestimmung eines Verdichtungsgrades sowohl bei Walzen wie auch bei Plattenrüttlern eignete. Es wurde ein Wegsensor zur Messung einer vertikalen Bewegung des Oberbaus an diesem angeordnet. Das mit dem Sensor gemessene Signal wurde in ein erstes und in ein zweites Teilsignal aufgeteilt. Das erste Teilsignal durchlief ein Hochpassfilter und das zweite Teilsignal ein Bandpassfilter. Das Hochpassfilter war derart eingestellt, dass es Frequenzen knapp unter der Anregungsfrequenz passieren liess, also bei einer Anregungsfrequenz von 60 Hz konnten 51 Hz noch passieren. Das Bandpassfilter war derart eingestellt, dass Frequenzen von 15% bis 60% der Anregungsfrequenz passieren konnten. Die vom Bandpassfilter kommenden Signale wurden durch die vom Hochpassfilter kommenden Signale dividiert. Der Quotient nahm mit der Anzahl von Passagen über einem zu verdichtenden Bereich kontinuierlich zu und sollte ein zuverlässiger Indikator für die Bodensteifigkeit sein.
 35

40 **[0005]** In der WO 98/17865 ist eine Bodenverdichtungsvorrichtung mit einem Beschleunigungsaufnehmer an einer Bandage beschrieben. Mit der Bodenverdichtungsvorrichtung konnten gemäss Ausführungen in der WO 98/17865 die drei nachfolgenden Verdichtungsvorgänge eingestellt werden:

45 > Auflastbetrieb: Die Vorrichtung bleibt in Bodenkontakt. Der Beschleunigungsaufnehmer misst nur die Umlauffrequenz der Unwucht ($1 \cdot f$).

> Optimaler Betriebszustand: Die Bandage hebt periodisch vom Boden ab. Der Beschleunigungsaufnehmer misst Oberschwingungen ($2 \cdot f$, $3 \cdot f$ usw.) mit stark abnehmender maximaler Amplitude.

50 > Instabiler Zustand: Die ganze Bodenverdichtungsvorrichtung (Walze) fängt an zu springen. Es treten zu den Oberschwingungen Subharmonische ($1/2 \cdot f$, $3/2 \cdot f$, $5/2 \cdot f$ usw.) auf.

[0006] Eine Verdichtung sollte immer dann optimal sein, d. h. am schnellsten und unter geringstem Energieaufwand vollziehbar, wenn Resonanz des Bodenverdichtungssystems auftrat. Das Bodenverdichtungssystem war aus dem zu verdichtenden Boden und der auf diesen einwirkenden Verdichtungseinrichtung gebildet.
 55

[0007] In der US-A 4,546,425 wird dargelegt, wie ein zu verdichtender Boden bei gleichbleibenden Maschinendaten durch mehrere Überfahrten immer härter wurde und die verdichtende Walze zu springen begann. Um dieses Springen zu verhindern, wurde ein einstellbarer Exzenter verwendet.

[0008] In der US-A 5,695,298 wurden mit einem an einer Halterung und an einer Bandage angeordneten Beschleunigungsmesser Schwingungen dieser Bandage ermittelt. Das Messsignal wurde auf ein erstes Bandpassfilter für die Anregungsfrequenz (oder höhere Frequenzen) und auf ein zweites Bandpassfilter für eine halbe Anregungsfrequenz gegeben. Mit einer Divisionsschaltung wurde das Ausgangssignal des zweiten Bandpasses (Amplitude der halben Anregungsschwingung) durch das Ausgangssignal des ersten Bandpasses (Amplitude der Anregungsfrequenz) dividiert. Der Quotient sollte einen vorgegebenen Wert, beispielsweise 5% nicht überschreiten, damit noch ein stabiles Arbeiten unter Vermeidung instabiler Zustände möglich war.

[0009] Bei einer nur geringen Anregung oder einem weichen Boden mass der Beschleunigungsmesser eine nicht harmonische Schwingung. Wurde die Anregung gesteigert oder war ein steiferer und elastischerer Boden erreicht, trat eine Periodizität der Schwingung mit halber Frequenz auf. Dieser Zustand wurde als noch stabil betrachtet. Wurde nun die Anregung noch mehr gesteigert oder war der Boden noch steifer, trat Springen der Bandage auf. Der gemessene Quotient war hier bedeutend höher als oben erwähnt.

[0010] In der US-A 5,727,900 ist eine Kontrolleinrichtung für eine Bodenverdichtungsvorrichtung beschrieben. Als Messdaten wurden hierbei die Beschleunigung horizontal und vertikal der Bandage, die Position des Exzenters, die Exzentrizität des Exzenters und die Rollgeschwindigkeit der Verdichtungsvorrichtung gemessen. Die hier beschriebene Bodenverdichtungsvorrichtung arbeitete analog zur US-A 5,695,298 mit demselben Stabilitätskriterium, dass das Erscheinen einer halben Anregungsfrequenz bezogen auf die Amplitude der Anregungsfrequenz auf maximal 5% zu beschränken war.

Darstellung der Erfindung

Aufgabe

[0011] Aufgabe der Erfindung ist es, einen Bodenbereich auf eine vorgegebene oder auf eine entsprechend einer Maschinenauslegung maximal erreichbare Bodensteifigkeit zu verdichten, den erreichten Verdichtungsgrad zu ermitteln sowie eine Bodenverdichtungsvorrichtung zu schaffen, mit der diese optimale Bodenverdichtung vorzunehmen ist.

Lösung

[0012] Die Lösung der Aufgabe erfolgt verfahrensmässig durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 und Vorrichtungsmässig durch die Merkmale des Patentanspruchs 7. Um eine optimale Bodenverdichtung, d.h. eine Bodenverdichtung mit einer vorgegebenen bzw. maximal möglichen Bodensteifigkeit (Verdichtungsgrad) zu erreichen, wird eine auf den Bodenbereich einwirkende Bodenkontakteinheit einer Bodenverdichtungsvorrichtung über diesen bewegt. Auf die Bodenkontakteinheit wirkt hierbei eine zeitlich sich periodisch mit wenigstens einer Einwirkungsfrequenz ändernde Kraft ein. Die Schwingungen eines Schwingungssystems, bestehend aus der Bodenverdichtungsvorrichtung mit der Bodenkontakteinheit und dem jeweiligen Bodenbereich, werden ermittelt. Die Schwingungsform der Schwingung des Schwingungssystems wird aufgenommen und aus der Schwingungsform, aus den Maschinenparametern der Bodenverdichtungsvorrichtung und aus der zeitlichen Lage der einen Bodenverdichtungskraft wird dann die Bodensteifigkeit (Verdichtungsgrad) ermittelt.

[0013] Im Gegensatz zu den bekannten Bodenverdichtungsverfahren bzw. den bekannten Bodenverdichtungsvorrichtungen wird hier nicht versucht, Subharmonische zur Einwirkungsfrequenz zu eliminieren. Im Gegenteil, sie werden bewusst ausgewertet. Erfindungsgemäß wird nämlich von der Erkenntnis ausgegangen, wie in der Detailbeschreibung dargelegt ist, dass die Frequenzen der Subharmonischen einen erreichten Bodenverdichtungsgrad definieren. Je tiefer die Frequenz der tiefsten Subharmonischen ist, desto grösser ist der Bodenverdichtungsgrad, über den eine Bodenkontakteinheit einer Bodenverdichtungsvorrichtung bewegt wird.

[0014] In einer besonderen Ausführungsvariante werden nicht nur die Subharmonischen ermittelt, sondern auch deren Amplituden, welche zur Amplitude der Einwirkungsfrequenz ins Verhältnis gesetzt werden. Vorzugsweise wird man die maximalen Amplitudenwerte hierzu verwenden. Es können aber auch Amplitudenwerte bei einer vorgegebenen Phasenlage verwendet werden. Wie aus einem unten beschriebenen Feigenbaum Szenario ersichtlich ist, ergibt diese Berücksichtigung neben der Ermittlung der Subharmonischen eine exaktere Bestimmung der erreichten bzw. vorhandenen Bodensteifigkeit.

[0015] Man kann nun die Bodenkontakteinheit, welche mit dem zu verdichtenden bzw. bereits verdichteten Boden in Kontakt ist, mit einer einzigen Sinus-Schwingung in der Regel durch einen umlaufenden Exzenter oder durch zwei winkelmässig gegeneinander verstellbare Exzenter kraftmässig beaufschlagen. Es können aber auch mehrere Exzenter mit unterschiedlichen Umlauffrequenzen verwendet werden. Zu jeder dieser Frequenzen ergibt sich dann eine Reihe von Subharmonischen je nach erreichtem Bodenverdichtungsgrad. Werden mehrere "Grundfrequenzen" verwendet, kann eine detailliertere Aussage über die erreichte bzw. die zu messende Bodenverdichtung gemacht werden.

[0016] Vorzugsweise wird man jedoch die Einwirkungsfrequenz auf die Bodenkontakteinheit einstellbar wählen. Bei

einer einstellbaren Frequenz kann nämlich 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 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 einer Vergleichereinheit 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 vorseilt.

[0017] 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.

[0018] Das Auftreten von Subharmonischen kann, sofern eine eine Bodenkontakteinheit aufweisende Bodenverdichtungsrichtung nicht entsprechend ausgelegt ist, zu Maschinenschäden führen. 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 Frequenz 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.

[0019] Aus der nachfolgenden Detailbeschreibung und der Gesamtheit der Patentansprüche ergeben sich weitere vorteilhafte Ausführungsformen und Merkmalskombinationen der Erfindung.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0020] Die zur Erläuterung der Ausführungsbeispiele verwendeten Zeichnungen zeigen

Fig. 1 eine schematische Darstellung zur Erklärung eines analytischen Modells eines schwingungsfähigen Systems mit einem beispielsweise Walzenzug und einem zu verdichtenden bzw. verdichteten Bodenbereich,

Fig. 2 ein Beispiel einer Umsetzung eines dimensionslosen Modells in ein Simulink-Modell,

Fig. 3 einen Vergleich zwischen einer gemessenen (links) und einer berechneten (rechts) Bewegung einer springenden Bandage auf einem harten Bodenbereich, wobei auf der Abszisse die Zeit und in der Ordinate die jeweilige Auslenkung aufgetragen sind,

Fig. 4 ein vereinfachtes Modell einer schwingenden Bodenkontakteinheit auf einem zu verdichtenden bzw. verdichteten Bodenbereich,

Fig. 5 einen gemessenen (rechts) und einen berechneten (links) Phasenraum (Orbital) einer Bodenverdichtungseinheit (Bandage des Walzenzuges AC 110 Ammann), wobei die Abszisse die Auslenkung in x-Richtung und die Ordinate die Geschwindigkeit in X-Richtung zeigt (ein einzelner Kurvenzug schliesst sich immer nach der Zeit einer Grundschwingung = Anregungsfrequenz der Bandage),

Fig. 6 ein Bewegungsverhalten eines Walzenzuges bei gleichbleibenden Maschinenparametern über einem unterschiedlich harten Untergrund,

Fig. 7 ein Beispiel einer chaotischen Bewegung einer Grabenwalze auf hartem Untergrund (Bodenbereich), wobei die obere Abbildung eine Auslenkung des Oberwagens (gestrichelt) und eines Unterwagens (ausgezogen) der Grabenwalze über der Zeit darstellt, die mittleren beiden Abbildungen das zur Auslenkung gehörende Frequenzspektrum und die unteren drei Abbildungen links einen Phasenraum für den Oberwagen, die mittlere Abbildung die verwendete Grabenwalze und die rechte Abbildung einen Phasenraum für den Unterwagen zeigen,

Fig. 8 eine zu Figur 7 analoge Darstellung jedoch für eine Vibrationsplatte,

Fig. 9 eine Zusammenstellung dynamischer Verdichtungsgeräte im Verzweigungsdiagramm, wobei $n = 1$ eine Anregung mit einer Grundschiwingung, $n = 2$ eine erste Subharmonische ($f/2$), $n = 4$ die nächste Subharmonische ($f/4$), $n = 8$ eine dritte Subharmonische ($f/8$) kennzeichnet,

Fig. 10 eine einfache Ausführung zur Abschätzung einer Bodenverdichtung, wie man sie vorzugsweise an einer Vibrationsplatte anordnen kann und

Fig. 11 eine Variante zu der in **Figur 10** dargestellten Schaltung.

[0021] Grundsätzlich sind in den Figuren gleiche Teile und Elemente mit gleichen Bezugszeichen versehen.

Wege zur Ausführung der Erfindung

[0022] Bei einer analytischen Beschreibung dynamischer Bodenverdichtungsrichtungen nimmt eine Betrachtung einer Bodenkontakteinheit zusammen mit dem verdichteten bzw. zu verdichtenden Boden als ein einziges System eine zentrale Rolle ein. In **Figur 1** ist hierzu ein Walzenzug **1** mit hinteren, gummbereiften Rädern **3** und einer vorderen Bandage **5** als Bodenkontakteinheit sowie einem Chassis **6** dargestellt. Ausgehend von diesem System ist eine einseitige Bindung zwischen einem zu verdichtenden Bodenbereich **7** (Unterbau) und dem Walzenzug **1** (Verdichtungsgerät) der Hauptgrund für das Auftreten nichtlinearer Effekte. Die einseitige Bindung wird begründet durch die Tatsache, dass zwischen dem Verdichtungsgerät **1** und dem Bodenbereich **7** Druckkräfte aber keine Zugkräfte übertragen werden können. Dementsprechend handelt es sich um eine kraftgesteuerte Nichtlinearität; das Verdichtungsgerät **1** verliert bei Überschreiten maximaler Bodenkraftwerte periodisch den Kontakt zum Bodenbereich **7** (Untergrund). Zusätzliche nicht-lineare Elemente der Bodeneigenschaften, wie beispielsweise schubdehnungsgesteuerte Steifigkeitsveränderungen, können im Vergleich dazu vernachlässigt werden. Auch die überlineare Federkennlinie von (Gummi-) Dämpfungselementen **8** zwischen Chassis **6** und Bodenkontakteinheit **5** (Bandage), bzw. einem Oberwagen **9** und einem Unterwagen **11** einer später erläuterten Grabenwalze **12** ist von untergeordneter Bedeutung und beeinflusst die Rechenergebnisse einer analytischen Beschreibung nicht wesentlich. Analoges gilt für eine Vibrationsplatte **14** mit einem Oberwagen **15** und einem Unterwagen **17**.

weitere Bezugszeichen Fig. 1

[0023]

51 Boden-Feder

52 Bandagenmasse

53 Elastische Radaufhängung

54 Schwingungssystem

55 Boden-Dämpfer

56 Modell des Walzenzuges

57 Modell des Untergrundes

58 In den Untergrund dissipierte Energie W

[0024] Ein Verdichtungsgerät hat generell, wie auch der Walzenzug **1** in **Figur 1**, eine Bodenkontakteinheit (Bandage **5**, Unterwagen **11** bzw. **17**) mit einem vibrierenden Teil z.B. mit einer rotierenden Unwucht **13** mit einer Masse m_d samt einem Unwuchterreger. Auf diesen vibrierenden Teil **13** stützt sich ein statisches Auflastgewicht des Chassis **6** mit einer Masse m_f (statisches Gewicht) über Dämpfungselemente **8** (Steifigkeit k_G , Dämpfung c_G) ab. Das statische Gewicht m_f ergibt zusammen mit den Dämpfungselementen **8** ein fusspunkterregtes Schwingungssystem, das tief abgestimmt wird (tiefe Eigenfrequenz). Der Oberwagen **9** oder **15** bzw. das Chassis **6** wirkt im Vibrationsbetrieb gegenüber den Schwingungen des Unterwagens **11** oder **17** bzw. der Bandage **5** als Tiefpass zweiter Ordnung. Damit wird die in das Chassis

6 bzw. den Oberwagen 9 oder 15 transmittierte Vibrationsenergie minimiert.

[0025] Der zu verdichtende bzw. verdichtete Boden des Bodenbereichs 7 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 (Bandage) und elastischem Halbraum (Bodenbereich). Im Bereich der Erregerfrequenzen von Verdichtungsgeräten, 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.

[0026] Führt man Maschinen- und Bodenmodell unter Berücksichtigung der einseitigen Bindung in ein Gesamtmodell zusammen, beschreibt das nachfolgende Gleichungssystem (1) für die Freiheitsgrade x_d der Bandage 5 und x_f des Chassis 6 die zugehörigen Bewegungsdifferentialgleichungen.

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

[0027] Ausgehend von einer einseitigen, bodenkraftgesteuerten Bindung ergibt sich:

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

m_d : schwingende Masse [kg] z.B. Bandage 5 bzw. Unterwagen 11 bzw. 17

m_f : stat. Auflastgewicht [kg] z.B. Chassis 6 bzw. Oberwagen 9 bzw. 15

$m_d r_u$: stat. Moment Unwucht [kg m]

x_d : Bewegung schwingende Masse [mm]

x_f : Bewegung Auflastgewicht [mm]

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

f : Erregerfrequenz [Hz]

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

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

k_G : Steifigkeit der Dämpfungselemente [MN/m]

c_G : Dämpfung der Dämpfungselemente [MNs/m]

[0028] Eine Bodenreaktionskraft F_B zwischen Bandage 5 und verdichtetem bzw. zu verdichtendem Bodenbereich 7 steuert dabei die Nichtlinearität der einseitigen Bindung.

[0029] 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

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

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

[0030] Für Grabenwalzen (Figur 7), Vibrationsplatten (Figur 8) und Stampfer gelten grundsätzlich dieselben Überlegungen, unter Berücksichtigung des jeweiligen Erregerprinzips resultieren analoge Gleichungen.

[0031] 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 Grundschwingungen 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.

[0032] 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.

5
Zeit: $\tau = \omega_0 t$; $\omega_0 = \sqrt{k_B / m_d}$

10
Resonanzverhältnis: $\kappa = \frac{\Omega}{\omega_0}$ mit $\Omega = 2\pi \cdot f$

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

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

15
Ort: $\eta = \frac{x_d}{A_0}$; $\zeta = \frac{x_f}{A_0}$; $\eta'' = \omega_0^2 \eta$; $\zeta'' = \omega_0^2 \zeta$; Amplitude $A_0 f$ ist frei wählbar

Materialkenngrößen: $\delta = \frac{c_B}{\sqrt{m_d k_B}} = 2d_B$; $\lambda_c = \frac{c_G}{c_B}$; $\lambda_k = \frac{k_G}{k_B}$;

20
Massen und Kräfte: $\lambda_m = \frac{m_f}{m_d}$; $A_{th} = \frac{m_u r_u}{m_d}$; $\gamma = \frac{A_{th}}{A_0}$; $f_B = \frac{F_B}{k_B \cdot A_0} = k_B A_0 (\eta + \delta \eta')$;

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

$\lambda_m \zeta'' + \lambda_c \delta (\zeta' - \eta') + \lambda_k (\zeta - \eta) = \zeta_0$

25
[0033] Die resultierenden Gleichungen (3) werden graphisch mit Simulink® modelliert, siehe **Figur 2**. Die Nichtlinearität wird vereinfacht als eine rein kraftgesteuerte Funktion betrachtet und mit Hilfe des "Switch"-Blocks aus der Simulink-Bibliothek modelliert.

Fig. 2:

30
[0034]

- 130: Oberwagen
- 131: Eigengewicht Chassis
- 35 132: Lambda Dämpfung Chassis
- 133: Beschleunigung Chassis
- 134: Beschleunigung Bandage
- 135: Geschwindigkeit Chassis
- 136: Geschwindigkeitssignal Chassis
- 40 137: Weg Chassis
- 138: Wegsignal Chassis
- 139: Phasenkurve Chassis
- 140: Lambda Steifigkeit Chassis
- 141: 0,025 < D < 0,065
- 45 150: Boden, entkoppelt
- 151: Switch 1
- 152: Weg Boden
- 153: Steifigkeit/Dämpfung
- 160: Unterwagen
- 50 161: Aeussere Erregung
- 162: Eigengewicht Bandage
- 163: Beschleunigung Bandage
- 164: Beschleunigung Bandage
- 165: Geschwindigkeit Bandage
- 55 166: Geschwindigkeitssignal Bandage
- 167: Weg Bandage
- 168: Wegsignal Bandage
- 169: Null

- 170: Switch
- 171: Kraft
- 172: Steifigkeit
- 173: Dämpfung
- 5 174: Phasenkurve Bandage
- 175: Bodenkontaktkraft
- 176: Arbeitsdiagramm

Parameter:

10 **[0035]**

- $A_0=1$ [mm]
- 15 - $k_B=140$ [MN/m]
- $D\text{-grad}=0,25$
- 20 - AC 110, 28 Hz, 1.8 mm

25 **[0036]** 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.

30 **[0037]** In Figur 3 ist ein Vergleich zwischen einem simulierten und einem gemessenen Fall eines "starken Springens" eines Walzenzugs 1, hier eines Walzenzuges der Firma Ammann AC 110 mit 11 t Gesamtgewicht, dargestellt. Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem Schwingungsverhalten einer Bandage 5 ist erkennbar. Neben einem Amplitudenverhältnis der Grundschiwingung ($j = 1$) zu einer Subharmonischen ($j = 1/2$) ist ein identischer Phasenwinkel bei einer Messung und bei der Berechnung zu erkennen (gleiche Schwingungsform). Die Messdaten wurden mit einem in vertikaler Richtung am nichtdrehenden, schwingenden Teil der Bandage 5 montierten Beschleunigungssensor erfasst, das Signal anschliessend verstärkt und mit Hilfe eines Programmpakets z.B. LabView/DIADEM® analysiert.

35 **[0038]** Aus diesem Vergleichsbeispiel ergibt sich, dass mit dem oben angeführten, vergleichsweise einfachen Modell gemäss Figur 2 bzw. den Gleichungen (1) und (2) das Betriebsverhalten eines dynamischen Bodenverdichtungsgerätes sehr treffend auch für den Fall stark nichtlinearer Effekte, wie dem "Springen", beschrieben werden kann und das Berechnungsmodell somit alle relevanten Parameter berücksichtigt.

40 **[0039]** Zur Ermittlung der in **Figur 3**, rechte Abbildung, dargestellten Schwingungsform sind in dem in **Figur 2** dargestellten Simulations-Modell u.a. als Parameter eine Amplitude A_0 von 1 mm und eine Bodensteifigkeit k_B von 140 MN/m vorgegeben worden. Misst man die Bewegung in einem Zeitbereich für das "Springen" eines Walzenzuges, so kann durch ein iteratives Berechnungsverfahren auch die tatsächliche Bodensteifigkeit bis auf eine Toleranz bestimmt werden. Es müssen hierzu die Maschinenparameter des Verdichtungsgeräts, der Betriebszustand und die zeitliche Position der Unwucht bzw. der Unwuchten bekannt sein.

45 **[0040]** Der praktisch gemessene und numerisch simulierte Betriebszustand des Springens des Walzenzuges AC 110 stellt im Hinblick auf die Chaostheorie ein nichtlineares System nach Auftreten der ersten Periodenverdoppelung dar. Die Verdichtungsgeräte gehören damit zu den technischen Systemen, die grundsätzlich zu chaotischem Verhalten fähig sind. Ihre Dynamik kann folglich mit den Methoden der nichtlinearen und chaotischen Schwingungslehre beschrieben werden. Damit eröffnet sich ein grosses Feld verschiedener Analysemethoden, welche in Theorie und Praxis der Verdichtungstechnik angewendet werden können.

50 **[0041]** In der Chaostheorie haben sich verschiedene Betrachtungsmethoden nichtlinearer Schwingungen etabliert, mit deren Hilfe die Struktur des deterministischen, chaotischen Bewegungsverhaltens untersucht und nachgewiesen wird. Es wird hierzu auf die Veröffentlichungen von Moon, Francis C. (1992); "Chaotic and Fractal Dynamics, An Introduction for Applied Scientists and Engineers"; Mc Graw Hill sowie Thompson, J.M.T.; Stewart, H.B., (2002) "Nonlinear Dynamics and Chaos, 2. Edition, John Wiley & Sons, Ltd. hingewiesen.

55 **[0042]** Es handelt sich insbesondere um die Analyse von:

- Zeitreihen, d. h. Bewegungsverhalten in Funktion der Zeit;

- Spektralanalysen der Zeitreihe (Fast Fourier Transformation FFT), beispielsweise zur Erkennung subharmonischer Schwingungsanteile, chaotische Systeme besitzen kontinuierliche Spektren;
- Phasenraumanalysen, Betrachten der Weg-Geschwindigkeits-Entwicklung in Funktion des Parameters Zeit, $x(t)-\dot{x}(t)$;
- Zeichnet man im Phasenraum nur jene Punkte auf, für welche $t = nT$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) ist, erhält man die Poincaré-Abbildung; chaotische Systeme zeigen in diesen Abbildungen ihre fraktale Struktur besonders ausgeprägt;
- Berechnung des Ljapunov-Exponenten; für Werte des Exponenten grösser, bzw. gleich "0" verhält sich das System instabil. Im Bereich chaotischer Bewegungen und der jeweiligen Bifurkationspunkte tritt dieser Fall auf, es existieren mehrere Attraktoren gleichzeitig, man befindet sich im Grenzgebiet (Separatrix) zweier oder mehrerer Lösungseinzugsbereiche.

[0043] Für die Betrachtung des chaotischen Maschinenverhaltens von Bodenverdichtungsgeräten genügt es meist, den schwingenden Teil zu untersuchen. Insbesondere bei gut abgestimmten Gummidämpferelementen sind in den Elementen (Bandage, Chassis, ...) 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 4**.

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

[0044] F_B ist die auf den Bodenbereich wirkende Kraft; siehe **Figur 2**. Diese gewöhnliche Differentialgleichung 2. Ordnung wird in die beiden nachfolgenden Differentialgleichungen 1. Ordnung umgeschrieben:

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

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

[0045] Es gilt die Identität $x_2 \equiv \dot{x}$.

[0046] Daraus wird eine Phasenraum-Darstellung mit $x_1(t)-x_2(t)$, bzw. $x(t)-\dot{x}(t)$ abgeleitet.

[0047] 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.

[0048] Bezogen auf die Auswertung von **Figur 3** für den dortigen Walzenzug (Ammann AC 110) auf harter Unterlage ergibt sich die in **Figur 5** dargestellte Phasenkurve. Die linke Darstellung zeigt die gemessenen und die rechte Darstellung die berechneten Werte. Wiederum zeigt sich die Übereinstimmung der Simulation mit den in der Praxis gemessenen Daten.

[0049] Mit zunehmender Zahl der Subharmonischen treten immer mehr Schnittpunkte auf, vergl. die Phasenkurven in **Figur 7** für eine Grabenwalze und für eine Vibrationsplatte in **Figur 8**.

[0050] 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.

[0051] Die zugehörigen Amplituden der zusätzlichen subharmonischen Schwingungsanteile befinden sich hingegen in derselben Größenordnung wie die Grundschiwingung. Die **Figur 6** zeigt das gemessene, unvermittelte Auftreten des Springens eines Walzenzugs (Ammann AC 110) beim Übergang der Maschine von einer sehr weichen Unterlage (Reifen) auf ein bereits verdichtetes, hartes Sand-Kies-Gemisch. Bei ansonsten gleichbleibenden Maschinenparametern sind Bodensteifigkeit und Dämpfung die veränderlichen Systemparameter. In **Figur 6** oben ist das gemessene Schwingungsverhalten dargestellt, welches sofort auf den Systemparameterwechsel reagiert und ohne zusätzliche Energiezufuhr zu "springen" beginnt, d. h. die erste Subharmonische mit der Frequenz $f/2$, bzw. der Periodizität $2T$ tritt sofort auf (Zeitdauer des Wechsels: ca. 4 Umdrehungen der Unwucht bei 36 [Hz] Vibrationsfrequenz => ca. 1/9 [s] Übergangszeit, $m_d = 4000$ [kg]). Man beachte, dass sich die Bandage auf dem weichen Pneu (Bereich 201) ($k_B = 30$ MN/m) im linearen Auflastbetrieb befindet, währenddem auf der harten Unterlage ($k_B = 140$ MN/m) (Bereich 203) sofort ein Abheben, bzw. ein Springen einsetzt (Bifurkation 202).

[0052] Die durchgeführte FFT zeigt in **Figur 6** links das lineare, monofrequente Schwingungsverhalten auf dem Reifen, Pneu (weicher Boden) 204; die auf harter Unterlage zusätzlich auftretende subharmonische Schwingung weist im Vergleich zur Grundschiwingung eine rund doppelt so grosse Amplitude auf (rechte Darstellung in **Figur 6**), harter Boden 205. Misst man bei jeder Unwuchtumdrehung in einer ausgezeichneten Position des rotierenden Exzenters die zugehörige Schwingungsamplitude, bzw. den Deformationswert der Bewegung, ist dieser auf dem Pneu immer konstant (harmonisch), auf der harten Unterlage alterniert der Wert jedoch entsprechend des zusätzlichen subharmonischen Schwingungsanteils. Oberwellen sind infolge ihrer Periodizität bei dieser Art der Signalerfassung nicht zu erkennen. Die 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 sogenannte Feigenbaum-Diagramm (untere mittlere Darstellung in **Figur 6**), Feigenbaum-Szenarium 206. 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 , abspaltet, 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 des vibrierenden Walzenzugs.

[0053] 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.

[0054] 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.

[0055] Aufgrund der Tatsache, dass die subharmonischen Schwingungen einen jeweils neuen Bewegungszustand der Maschine darstellen, müssen 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. 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.

[0056] Für die betrachteten Maschinen tritt die Bifurkation in Form des Periodenverdoppelungsszenarios auf, die **Figur 7** bzw. die **Figur 8** zeigen dies anhand des FFT-Spektrums für eine Grabenwalze bzw. eine Vibrationsplatte.

Fig. 7

[0057]

- 5 211 x_d Unterwagen
- 212 x_f Oberwagen (Erregerfrequenz $f_E \approx 30$ Hz)
- 213 Dämpfungsisolation zwischen Ober- und Unterwagen
- 10 214 FFT x_f Oberwagen
- 215 FFT x_d Unterwagen

15 Fig. 8

[0058]

- 20 221 x_f Unterwagen
- 222 x_d Oberwagen
- 223 FFT x_d Oberwagen
- 25 224 Isolationswirkung
- 225 FFT x_f Unterwagen

30 [0059] Dieses Szenario ist grundsätzlich für alle technischen und physikalischen Systeme mit einer einseitigen Bindung gültig. Falls eine Unterlagssteifigkeit k_B sehr, bez. "unendlich" hoch wird, spricht man von auftretenden Impacts oder Stößen.

35 [0060] Der Phasenraum der Bewegungen des Ober- und Unterwagens der Vibroplatte und der Grabenwalze ($x'_d - x_d$ und $x'_f - x_f$) zeigen im Vergleich zum entsprechenden Orbital des Walzenzugs (**Figur 5**) deutlich die Zunahme der Komplexität der Bewegungen beim Auftreten des fortgeschrittenen Periodenverdoppelungsszenarios, bzw. des deterministischen Chaos.

[0061] 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).

40 [0062] 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. In der **Figur 8** ist ein gemessenes, chaotisches Frequenzspektrum dargestellt; der tiefste, ausgeprägte Schwingungsanteil mit einer Frequenz $f_E/8$ belegt die dritte aufgetretene Bifurkation des Systems, die Oberwellen, insbesondere bei $3 \times f_E/8$ (zweite Oberwelle der Subharmonischen $f_E/8$; auch die anderen Subharmonischen können Oberwellen bilden) sind stark ausgeprägt.

45 [0063] Da es sich bei Platten und Stampfern um Geräte mit einem Gewicht zwischen 50 bis 500 kg handelt, kann man salopp sagen: je kleiner das Gerät, umso grösser die vibrationstechnische Herausforderung.

50 [0064] Entscheidend ist die Erkenntnis, dass alle vibrierenden Geräte für die maschinelle Bodenverdichtung, vom Stampfer bis zum Walzenzug, in ihrem nichtlinearen Verhalten mit Hilfe der Chaostheorie erklärt werden können. Sämtliche Bewegungsverhaltensformen können im Rahmen des Periodenverdoppelungsszenarios eindeutig verschiedenen Bifurkationszuständen zugeordnet werden [vom periodischen Abheben (keine Bifurkation) bis zum voll ausgebildeten chaotischen Verhalten]. Die Chaostheorie ermöglicht erst den Gesamtüberblick über das Bewegungsverhalten der verschiedenen Geräteklassen.

55 [0065] Eine Bemerkung zur Schwingungsisolation des Chassis, bzw. Oberwagens: Diese Maschinenbaugruppe wird als fusspunkterregtes Teilsystem tief abgestimmt. Damit werden Schwingungen im Bereich der Erregerfrequenz sehr

gut isoliert. Mit zunehmender Zahl der auftretenden Bifurkationen geraten die subharmonischen Schwingungsanteile zunehmend in den Bereich der Resonanzfrequenz des Oberwagens/Chassis und die Schwingungsanteile werden dadurch mit steigender Zahl der aufgetretenen Bifurkationen transmittiert. In der Praxis ist dies an den grossen Bewegungen der entsprechenden Maschinenteile zu erkennen. Auch aus diesem Grund sind subharmonische Schwingungen unerwünscht und möglichst zu vermeiden.

Fig. 9

[0066]

231 Vibrationsplatte

232 Grabenwalze

233 Walzenzug

234 Amplitude

235 Verdichtungsgrad % / Steifigkeit k_B

[0067] Die durch eine mit den oben erwähnten Bodenverdichtungsrichtungen erreichte und bestimmte Bodensteifigkeit k_B kann, sofern auf genaue (exakte) Bodensteifigkeitswerte verzichtet wird und man nur eine Anzeige wünscht, welche angibt, ob die Bodensteifigkeit bei weiteren Überfahrten mit der Vorrichtung ansteigt oder einen bereits zufriedenstellenden Wert erreicht hat, stark vereinfacht und damit preisgünstig mit der nachfolgenden in **Figur 10** gezeigten Messvorrichtung **20** vorgenommen werden. Eine derartige Messvorrichtung **20** für einen Bodensteifigkeitsrichtwert wird man hauptsächlich bei den ohnehin preisgünstigen Vibrationsplatten einbauen.

[0068] Die Schwingungen des Unterwagens **17** werden mit einem Beschleunigungssensor **21** aufgenommen, mit einem Verstärker **23** verstärkt und mit einem Integrator **25** über einen vorgegebenen Zeitraum integriert. Die Integration wird vorgenommen um aus dem Beschleunigungswert, gemessen mit dem Beschleunigungssensor **21** nach zweimaliger Intergration einen Weg zu erhalten. Anschliessend wird das Ausgangssignal des Integrators **25** auf mehrere Bandpassfilter **27** geführt. Das Bandpassfilter ist derart ausgelegt, dass einmal die Anregungsfrequenz f , die erste Oberwelle mit der doppelten Anregungsfrequenz $2 \cdot f$, die erste Subharmonische mit der halben Anregungsfrequenz $f/2$, die zweite Subharmonische mit einer vierten Anregungsfrequenz $f/4$ und die dritte Subharmonische mit einer achteil Anregungsfrequenz $f/8$ auf jeweils einen Ausgang **29a** bis **29e** transmittiert werden. Die Messvorrichtung hat hier beispielsweise für eine Überwachung der Frequenzen $2 \cdot f$, f , $f/2$, $f/4$ und $f/8$ vier Quotientenbildner **31a** bis **31d**. Der Ausgang **29b** (Ausgangssignal zu f) ist als Divisor mit allen Quotientenbildnern **31a** bis **31d** verbunden. Alle Ausgänge sind mit je einem Quotientenbildner **31a** bis **31d** verbunden. Der Ausgang **29a** (Ausgangssignal zu $2 \cdot f$) ist als Dividend mit dem Quotientenbildner **31a** verbunden, dessen Ausgangssignal (Quotient) an dessen Ausgang **33a** anliegt. Der Ausgang **33a** ist über eine Normierungsschaltung **35** an zwei Leuchten **37a** in einem Anzeigetableau **39** geführt.

[0069] Analog wird mit den Ausgängen **29c** ($f/2$), **29d** ($f/4$) und **29e** ($f/8$) verfahren, welche als Dividend auf die Quotientenbildner **31b**, **31c** bzw. **31d** geführt werden. Ein Ausgang **33b**, **33c** bzw. **33d** des Quotientenbildners **31b**, **31c** bzw. **31d** wird über die Normierungsschaltung **35** an jeweils zwei Leuchten **37b**, **37c** bzw. **37d** im Anzeigetableau **39** geführt. Leuchten nur die Leuchten **37a** ist der betreffende Bodenbereich noch nicht ausreichend verdichtet. Leuchten die Leuchten **37b** ist eine bereits bessere Verdichtung erreicht, wobei die Verdichtung dann bis zu den Leuchten **37d** immer besser wird. Leuchten beispielsweise die Leuchten **37b** auch bei mehrmaligem Überfahren mit der Vibrationsplatte nicht auf, so ist eine weitere Verdichtung, sei es aufgrund der Bodenzusammensetzung oder der Maschinendaten der verwendeten Vibrationsplatte, nicht möglich. Analoges gilt für die Leuchten **37c** bzw. **37d**.

[0070] Anstelle der beiden Leuchten könnte sofern nur das Auftreten der Subharmonischen angezeigt werden soll nur eine einzige Leuchte verwendet werden. Es wird jedoch mit der Messvorrichtung **20** nicht nur das Frequenzverhalten ermittelt, es werden auch die maximalen Schwingungsamplituden der einzelnen Schwingungen (Einwirkungsfrequenz f , Oberwellen $n \cdot f$, Subharmonische $f/[2-n]$) ausgewertet. In **Figur 6** sind in der mittleren unteren Darstellung ("Feigenbaum Szenario") beim Auftreten der ersten Subharmonischen $f/2$ für einen bestimmten Zustand die Amplituden $A(f)$ und $A(f/2)$ der Einwirkungsfrequenz f und der ersten Subharmonischen $f/2$ eingezeichnet. Das untere rechte Bild in derselben **Figur 6** zeigt die beiden Amplitudenwerte. Es ist hier ersichtlich, dass die maximale Amplitude $A(f)$ mit der Einwirkungsfrequenz f kleiner ist als diejenige $A(f/2)$ der ersten Subharmonischen $f/2$. Die zu erwartenden maximalen Amplituden können analog aus dem "Feigenbaum Szenario" abgelesen werden. Auf der Abszisse des "Feigenbaum Szenarios" ist die Bodensteifigkeit k_B (Verdichtungsgrad) aufgetragen. Sind somit die tiefste vorhandene Subharmonische sowie die maximalen Amplituden der Schwingungsfrequenzen bekannt, kann auf die Bodensteifigkeit k_B (Verdich-

tungsgrad) geschlossen werden. Ist ein durch die Normierungsschaltung **35** vorgegebener Amplitudenwert erreicht, leuchtet die jeweils zweite Leuchte der Leuchtenanordnung. Selbstverständlich kann auch die Leuchtstärke in Abhängigkeit der Amplitudenhöhe gesteuert werden.

[0071] Anstelle des Bandpassfilters **27** kann auch eine Einheit verwendet werden, welche eine schnelle Fourier-Transformation (Fast Fourier Transformation FFT) ausführt.

[0072] Anstelle eines Bandpassfilters **27** kann auch innerhalb von Zeitfenstern die jeweilige Schwingungsamplitude bestimmt werden. Hierbei wird man, ausgehend immer von der untersten Lage des Exzentrers und bekannter Umdrehungsgeschwindigkeit, die Amplitudenwerte für die erste Oberwelle und entsprechenden Subharmonischen aufnehmen, sofern sie vorhanden sind.

[0073] In **Figur 11** ist eine Variante zu der in **Figur 10** dargestellten Schaltung dargestellt. Im Gegensatz zur Schaltung **20** in **Figur 10** wird in dieser Schaltung **40** ein zum Beschleunigungssensor **21** analog ausgebildeter Beschleunigungssensor **42** am Oberwagen **15** einer Vibrationsplatte **14** angeordnet. Durch (nicht dargestellte) Dämpfungselemente zwischen Ober- und Unterwagen erfolgt eine Schwingungsdämpfung. Die Ausgangssignale des Beschleunigungssensors **42** für die erste Oberwelle **2f** und die erste und zweite Subharmonische **f/2** und **f/4** werden nun im Gegensatz zur Schaltung **20** nicht integriert und als Beschleunigungssignale nach einer Verstärkung durch den Verstärker **23** in einem Bandpassfilter **41** bearbeitet. Die Signale sind nämlich in der Regel ausreichend hoch. Das Signal der dritten Subharmonischen **f/8** wird nun, da es in der Regel klein ist, mit einem Integrator **43** integriert und analog wie in **Figur 10** verarbeitet. Es muss nicht erst ab der dritten Subharmonischen **f/8** integriert werden. Es kann auch bereits die zweite Subharmonische **f/4** oder erst die vierte Subharmonische **f/16** integriert werden (x: Faktor, $x \approx 1-2$).

[0074] Der Sensor zur Aufnahme der Schwingungsform des Schwingungssystems ist gemäss obiger Beschreibung am Unterwagen **11** bzw. **17** oder am Chassis **6** angeordnet; er kann aber auch am Oberwagen **9** bzw. **15** angeordnet werden. Bei einer Anordnung am Oberwagen **9** bzw. **15** sind Schwingungsbeeinflussungen durch die Dämpfungselemente, wie oben skizziert, zu beachten.

[0075] Der Nachweis des chaotischen Verhaltens dynamisch erregter Verdichtungsgeräte stellt die aus verschiedenen Untersuchungen bekannten Schwingungsverhaltensweisen in einen gemeinsamen Kontext. Basis ist die einseitige Bindung zwischen Boden (Asphaltschicht) und dem schwingenden Teil des Gerätes. Die Vergrößerung der Schwingungserregung und/oder die zunehmende Steifigkeit des Bodens mit zunehmender Verdichtung führt zum periodischen Abheben des Verdichtungsgerätes vom Boden. Die resultierende Nichtlinearität nimmt mit grösserer Unwucht, bzw. weiter zunehmender Verdichtung zu, was zur Bifurkation des Bewegungsverhaltens führt. Die Verzweigung tritt plötzlich auf und stellt je nach Maschinentyp einen unerwünschten oder gewollten Betriebszustand dar. Deshalb wird dieser bei geregelten Walzen durch Verringern der vertikal wirksamen Unwucht vermieden. Bei unregelmässigen Verdichtungsgeräten tritt der schwingende Teil in das Periodenverdoppelungsszenario ein, das Bewegungsverhalten wird chaotisch. Die nichtlinearen Schwingungen aller Verdichtungsgeräte führen mit zunehmender Nichtlinearität über das Periodenverdoppelungsszenario ins deterministische Chaos. Die subharmonischen Schwingungen übertragen sich zudem auf den Oberwagen, bzw. das Chassis. Das chaotische Verhalten der Bandage macht das Lenken der Maschine unmöglich, Kornzertrümmerungen und Auflockerungen an der Oberfläche sind weitere, unerwünschte Folgen. Dieser Betriebszustand beansprucht die Maschine zudem sehr stark und ist somit in der Praxis zu unterbinden.

[0076] Der Nachweis des chaotischen Betriebsverhaltens zeigt die Obergrenzen der Verdichtungsleistung heutiger Geräte auf. Die maximal mögliche, in den Boden einzutragende Leistung wird durch das beginnende Periodenverdoppelungsszenario begrenzt. Will man Verdichtungsgeräte mit besserer Leistung bauen, muss die Energie auf alternative Art und Weise in den Untergrund eingebracht werden. Ausgelöst wird das deterministische Chaos durch die kraftgesteuerte Nichtlinearität der einseitigen Bindung zwischen Bandage/Unterwagen und Boden. Die optimale Anpassung von Amplitude und Frequenz in Funktion des Bodenzustands bei der neusten Generation selbstregelnder Vibrationswalzen und Walzenzüge ist eine sehr effektive Möglichkeit, den Leistungseintrag in den Boden zu maximieren.

[0077] Die Bandbreite praktisch auftretender Schwingungsformen kann mit der chaostheoretischen Betrachtung des Verdichtungsgerätes einfach abgeschätzt und die einzelnen Maschinenteile für die zu erwartenden Extrembelastungen dimensioniert werden. Viele praktische Beanspruchungsbilder lassen sich erst mit Hilfe der subharmonischen Schwingungen erklären.

[0078] Klassische und moderne Methoden der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) fassen sowohl bezüglich ihrer Grundlagen als auch ihrer praktischen Anwendungen (Normen) auf der Chaostheorie.

[0079] Die Erkenntnisse aus der Anwendung der Theorie des deterministischen Chaos bilden eine hervorragende Basis für die künftige Verdichtungsgeräteentwicklung.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung eines Masses für die Bodensteifigkeit (k_B), bzw. den Verdichtungsgrad eines verdichteten bzw. zu verdichtenden Bodenbereichs (**7**), in dem eine auf den Bodenbereich (**7**) einwirkende Bodenkontakteinheit

(5; 11; 17) einer Bodenverdichtungs­vorrichtung (1; 12; 14) über diesen bewegt wird, wobei auf die Bodenkontakt­einheit (5; 11; 17) eine zeitlich sich periodisch mit wenigstens einer Einwirkungs­frequenz (f) ändernde Bodenverdichtungs­kraft (F_B) einwirkt und Schwingungen eines Schwingungssystems, welches die Bodenverdichtungs­vorrichtung (1; 12; 14), die Bodenkontakt­einheit (5; 11; 17) und den Bodenbereich (7) enthält, ermittelt werden, eine Schwingungsform der Schwingung des Schwingungssystems (f , $f/[2 \cdot n]$, $A(f)$, $A(f/[2 \cdot n])$) aufgenommen wird, und aus der Schwingungsform, aus Maschinenparametern der Bodenverdichtungs­vorrichtung und aus einer zeitlichen Lage der einen Bodenverdichtungs­kraft (F_B) das Mass für die Bodensteifigkeit (k_B), bzw. den Verdichtungsgrad ermittelt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Einwirkungs­frequenz (f) mehrere Subharmonische ($f/2$, $f/4$, $f/8$ usw.) aus der Schwingungsform (f , $f/[2 \cdot n]$, $A(f)$, $A(f/[2 \cdot n])$) des Schwingungssystems ermittelt werden und aus sämtlichen Subharmonischen ($f/2$, $f/4$, $f/8$ usw.) zur Einwirkungs­frequenz (f) diejenige mit einer tiefsten Frequenz ($f/[2 \cdot n]$) als Mass für die Bodensteifigkeit (k_B) ermittelt wird, wobei eine erreichte Bodensteifigkeit umso höher ist, je tiefer die Frequenz der tiefsten subharmonischen Frequenz ($f/[2 \cdot n]$) ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zeitlich sich periodisch ändernde Bodenverdichtungs­kraft (F_B) eine reine "Sinus"-Schwingung einer einzigen Frequenz (f) oder vorzugsweise eine Überlagerung mehrerer "Sinus"-Schwingungen ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einwirkungs­frequenz (f) der sich zeitlich ändernden Bodenverdichtungs­kraft (F_B) auf eine Resonanzfrequenz (f_0) des Schwingungssystems eingestellt wird oder vorzugsweise auf eine Frequenz eingestellt wird, welche die Resonanzfrequenz (f_0) um einen vorgegebenen, lediglich von Einstellstabilitäten bestimmten, Frequenzwert überschreitet.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die jeweils tiefste Subharmonische ($f/[2 \cdot n]$) bei einer Bewegung der Bodenkontakt­einheit (5; 11; 17) über einen jeweiligen Bodenbereich (7) diesem Bodenbereich (7) zugeordnet abgespeichert wird und mit einer tiefsten gemessenen Subharmonischen ($f/[2 \cdot n]$) bei einem erneuten Überfahren verglichen wird und ein weiteres Überfahren eingestellt wird, sofern keine tiefere Subharmonische ($f/[2 \cdot n]$) nach einer vorgegebenen Anzahl Überfahrten erreicht wird, da keine weitere Bodenverdichtung bei den eingestellten Maschinendaten erreichbar ist.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** Amplitudenwerte der Schwingungen der Subharmonischen über einen jeweiligen Bodenbereich (7) diesem Bodenbereich (7) zugeordnet abgespeichert werden und mit den Amplitudenwerten bei einem erneuten Überfahren verglichen werden und ein weiteres Überfahren eingestellt wird, sofern ein erhöhter Amplitudenwert der tiefsten Subharmonischen nach einer vorgegebenen Anzahl Überfahrten erreicht wird, da keine weitere Bodenverdichtung bei den eingestellten Maschinendaten erreichbar ist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Amplitude (A_0) der anregenden Bodenverdichtungs­kraft (F_B) unmittelbar nach der Ermittlung der jeweils tiefsten Subharmonischen ($f/[2 \cdot n]$) auf einen Wert zurückgestellt wird, bis eine stabile Lage der Bodenverdichtungs­vorrichtung erreicht ist.

7. Bodenverdichtungs­vorrichtung (1; 12; 14) zur Verdichtung eines Bodenbereichs (7) auf ein vorgegebenes Mass für die Bodensteifigkeit (k_B) bzw. den Verdichtungsgrad mit einer auf den Bodenbereich (7) einwirkenden Bodenkontakt­einheit (5; 11; 17), mit einem Antrieb für wenigstens eine schwingende Masse (m_d), welche auf die Bodenkontakt­einheit (5; 11; 17) eine periodisch sich ändernde Bodenverdichtungs­kraft (F_B) ausübt, und mit wenigstens einem Sensor (21) zur Ermittlung einer Schwingung eines Schwingungssystems, welches die Bodenverdichtungs­vorrichtung (1; 12; 14) mit der Bodenkontakt­einheit (5; 11; 17) und den Bodenbereich (7) enthält, **gekennzeichnet durch** eine mit dem wenigstens einen Sensor (21) verbundene Auswerteeinheit (20), mit der ausgehend von einer auf die Bodenkontakt­einheit (5; 11; 17) wirkenden, anregenden Schwingung bzw. anregenden Schwingungen mit einer Einwirkungs­frequenz (f) bzw. -frequenzen eine Schwingungsform aufnehmbar und abspeicherbar ist und aus der Schwingungsform, aus Maschinenparametern der Bodenverdichtungs­vorrichtung (1; 12; 14) und aus einer zeitlichen Lage der Bodenverdichtungs­kraft (F_B) das Mass für die Bodensteifigkeit (k_B) bzw. den Verdichtungsgrad mit der Auswerteeinheit (20) ermittelbar ist, wobei zur Einwirkungs­frequenz (f) der wenigstens einen schwingenden Masse (m_d) mit der Auswerteeinheit (20) hierzu mehrere Subharmonische ($f/2$, $f/4$, $f/8$ usw.) ermittelbar sind und aus diesen Subharmonischen ($f/2$, $f/4$, $f/8$ usw.) diejenige mit einer tiefsten Frequenz ($f/[2 \cdot n]$) als Mass für die Bodensteifigkeit (k_B) bzw. den Verdichtungsgrad ermittelbar ist, und die erreichte Bodensteifigkeit (k_B) umso höher ist, je tiefer die Frequenz der tiefsten subharmonischen Frequenz ($f/[2 \cdot n]$) ist.

8. Bodenverdichtungs­vorrichtung (1; 12; 14) nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit der Auswerteein-

heit (20), maximale, Amplitudenwerte ($A(f)$, $A(f/[2 \cdot n])$) der Subharmonischen ($f/[2 \cdot n]$) aus der Schwingungsform sowie der Einwirkfrequenz (f) miteinander in eine gegenseitige Beziehung zur exakteren Ermittlung des Masses für die Bodensteifigkeit (k_B) bzw. den Verdichtungsgrad gebracht werden.

- 5 9. Bodenverdichtungsrichtung (1; 12; 14) nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** der wenigstens eine Sensor mit dem Antrieb verbunden ist und die Frequenz der wenigstens einen schwingenden Masse durch den Antrieb derart einstellbar ist, dass eine maximale Schwingungsamplitude erreichbar ist, was eine Resonanz eines Schwingungssystems anzeigt.
- 10 10. Bodenverdichtungsrichtung (1; 12; 14) nach einem der Ansprüche 7 bis 9, **gekennzeichnet durch** einen zweiten Sensor, mit dem der Zeitpunkt einer, vorzugsweise maximalen, Kraft der wenigstens einen schwingenden Masse in Bodenverdichtungsrichtung feststellbar ist, wobei der erste Sensor derart ausgebildet ist, dass er zusätzlich eine vorgegebenen, vorzugsweise eine maximale, Schwingungsamplitude der Bodenkontakteinheit in Bodenverdichtungsrichtung feststellen kann, und eine mit den beiden Sensoren und dem Antrieb verbundene Vergleichereinheit, welche die Antriebsfrequenz derart einstellt, dass zwischen den beiden maximalen Amplitudenwerten ein voreilender Phasenwinkel der anregenden Masseschwingung zwischen 90° und 180° , vorzugsweise zwischen 95° und 130° , vorhanden ist.
- 15 11. Bodenverdichtungsrichtung (1; 12; 14) nach einem der Ansprüche 7 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die wenigstens eine schwingende Masse eine veränderbare Unwucht hat und die Unwucht derart in ihrem Unwuchtmoment reduzierbar ist, dass die gemessenen Subharmonischen gerade noch in die Messempfindlichkeit des ersten Sensors fallen.
- 20

25 Claims

1. Method for determining a measure of the soil rigidity (k_B) or level of compaction of an area of soil (7) that has been or is to be compacted, in which a soil contact unit (5; 11; 17) of a soil compaction device (1; 12; 14), which unit acts on the area of soil (7), is moved over the latter, a soil compaction force (F_B) changing periodically over time with at least one frequency of action (f) acting on the soil contact unit (5; 11; 17) and vibrations of a vibratory system which contains the soil compaction device (1; 12; 14), the soil contact unit (5; 11; 17) and the area of soil (7) being determined, a vibration mode of the vibration of the vibratory system (f , $f/[2 \cdot n]$, $A(f)$, $A(f/[2 \cdot n])$) being picked up and, from the vibration mode, from machine parameters of the soil compaction device and from a position in time of the one soil compaction force (F_B), the measure of the soil rigidity (k_B) or the level of compaction being determined, **characterized in that** a plurality of sub-harmonics ($f/2$, $f/4$, $f/8$ and so on) of the frequency of action (f) are determined from the vibration mode (f , $f/[2 \cdot n]$, $A(f)$, $A(f/[2 \cdot n])$) of the vibratory system and, from all the sub-harmonics ($f/2$, $f/4$, $f/8$ and so on) of the frequency of action (f), the one having the lowest frequency ($f/[2 \cdot n]$) is determined as a measure of the soil rigidity (k_B), a soil rigidity that is achieved being higher, the lower the frequency of the lowest sub-harmonic frequency ($f/[2 \cdot n]$).
- 30
2. Method according to Claim 1, **characterized in that** the periodically changing soil compaction force (F_B) is a pure "sinusoidal" vibration of a single frequency (f) or, preferably, a superimposition of a plurality of "sinusoidal" vibrations.
- 35
3. Method according to Claim 1 or 2, **characterized in that** the frequency of action (f) of the periodically changing soil compaction force (F_B) is set to a resonant frequency (f_0) of the vibratory system or is preferably set to a frequency which exceeds the resonant frequency (f_0) by a predefined frequency value that is determined only by adjustment stabilities.
- 40
4. Method according to one of Claims 1 to 3, **characterized in that** the respectively lowest sub-harmonic ($f/[2 \cdot n]$) during a movement of the soil contact unit (5; 11; 17) over a respective area of soil (7) is stored associated with this area of soil (7), and is compared with a lowest measured sub-harmonic ($f/[2 \cdot n]$) during a new run over, and a new run over is set up if no lower sub-harmonic ($f/[2 \cdot n]$) is reached after a predefined number of runs, since no further soil compaction can be achieved with the set machine data.
- 45
5. Method according to one of Claims 1 to 4, **characterized in that** amplitude values of the vibrations of the sub-harmonics over a respective area of soil (7) are stored associated with this area of soil (7) and are compared with the amplitude values during a new run over, and a further run over is set up if an increased amplitude value of the lowest sub-harmonic is reached after a predefined number of runs, since no further soil compaction can be achieved
- 50
- 55

with the set machine data.

- 5 6. Method according to one of Claims 1 to 5, **characterized in that** the amplitude (A_0) of the soil compaction excitation force (F_B) immediately after the determination of the respectively lowest sub-harmonic ($f/[2 \cdot n]$) is set back to a value until a stable position of the soil compaction device is reached.
- 10 7. Soil compaction device (1; 12; 14) for compacting an area of soil (7) to a defined measure for the soil rigidity (k_B) or level compaction, having a soil contact unit (5; 11; 17) acting on the area of soil (7), having a drive for at least one vibrating mass (m_d) which exerts a periodically changing soil compaction force (F_B) on the soil contact unit (5; 11; 17), and having at least one sensor (21) for determining the vibration of a vibratory system which contains the soil compaction device (1; 12; 14) with the soil contact unit (5; 11; 17) and the area of soil (7), **characterized by an** evaluation unit (20) that is connected to the at least one sensor (21), with which, on the basis of excitation vibration or excitation vibrations acting on the soil contact unit (5; 11; 17) with a frequency (f) or frequencies of action, a vibration mode can be picked up and stored and, from the vibration mode, from machine parameters of the soil compaction device (1; 12; 14) and from a position in time of the soil compaction force (F_B), the measure of the soil rigidity (k_B) or the level of compaction can be determined by the evaluation unit (20), wherein, for this purpose, a plurality of sub-harmonics ($f/2$, $f/4$, $f/8$ and so on) of the frequency of action (f) of the at least one vibrating mass (m_d) can be determined by the evaluation unit (20) and, from these sub-harmonics ($f/2$, $f/4$, $f/8$ and so on), the one having the lowest frequency ($f/[2 \cdot n]$) can be determined as a measure of the soil rigidity (k_B) or the level of compaction, and the soil rigidity (k_B) that is achieved is higher, the lower the frequency of the lowest sub-harmonic frequency ($f/[2 \cdot n]$).
- 15 8. Soil compaction device (1; 12; 14) according to Claim 7, **characterized in that** by using the evaluation unit (20), maximum amplitude values ($A(f)$, $A(f/[2 \cdot n])$) of the sub-harmonics ($f/[2 \cdot n]$) from the vibration mode and the frequency of action (f) are placed in a mutual relationship with one another for the purpose of more accurate determination of the measure of the soil rigidity (k_B) or the level of compaction.
- 20 9. Soil compaction device (1; 12; 14) according to Claim 7 or 8, **characterized in that** the at least one sensor is connected to the drive, and the frequency of the at least one vibrating mass can be adjusted by the drive in such a way that a maximum vibration amplitude can be achieved, which indicates a resonance of a vibrating system.
- 25 10. Soil compaction device (1; 12; 14) according to one of Claims 7 to 9, **characterized by** a second sensor, with which the time of a preferably maximum force of the at least one vibrating mass in the soil compaction device can be recorded, the first sensor being formed in such a way that it can additionally record a predefined, preferably a maximum, vibration amplitude of the soil contact unit in the soil compaction direction, and by a comparator unit that is connected to the two sensors and the drive and adjusts the drive frequency in such a way that, between the two maximum amplitude values, there is a leading phase angle of the excitation mass vibration of between 90° and 180° , preferably between 95° and 130° .
- 30 11. Soil compaction device (1; 12; 14) according to one of Claims 7 to 10, **characterized in that** the at least one vibrating mass has a variable imbalance and the imbalance moment of the imbalance can be reduced in such a way that the measured sub-harmonics still fall just within the measurement sensitivity of the first sensor.

45 Revendications

- 50 1. Procédé pour déterminer une mesure de la rigidité du sol (k_B) ou du degré de compactage d'une zone de sol (7) compactée ou à compacter, avec lequel une unité de contact de sol (5 ; 11 ; 17) d'un équipement de compactage du sol (1 ; 12 ; 14) agissant sur la zone de sol (7) est déplacée au-dessus de celle-ci, une force de compactage du sol (F_B) qui varie périodiquement dans le temps avec au moins une fréquence d'action (f) agissant sur l'unité de contact de sol (5 ; 11 ; 17) et les oscillations d'un système oscillant, lequel contient l'équipement de compactage du sol (1 ; 12 ; 14), l'unité de contact de sol (5 ; 11 ; 17) et la zone de sol (7), étant déterminées, une forme d'oscillation de l'oscillation du système oscillant (f , $f/[2 \cdot n]$, $A(f)$, $A(f/[2 \cdot n])$) étant enregistrée et la mesure de la rigidité du sol (k_B) ou du degré de compactage étant déterminée à partir de la forme d'oscillation, à partir de paramètres mécaniques de l'équipement de compactage du sol et à partir d'une situation dans le temps de la force de compactage du sol (F_B), **caractérisé en ce que** plusieurs sous-harmoniques ($f/2$, $f/4$, $f/8$, etc.) sont déterminées pour la fréquence d'action (f) à partir de la forme d'oscillation (f , $f/[2 \cdot n]$, $A(f)$, $A(f/[2 \cdot n])$) du système oscillant et parmi toutes les sous-harmoniques ($f/2$, $f/4$, $f/8$, etc.) pour la fréquence d'action (f), celle ayant la fréquence la plus basse ($f/[2 \cdot n]$) est
- 55

EP 1 516 961 B1

déterminée comme mesure de la rigidité du sol (k_B), une rigidité du sol atteinte étant d'autant plus élevée que la fréquence de la fréquence sous-harmonique la plus basse ($f/[2.n]$) est basse.

- 5 2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la force de compactage du sol (F_B) qui varie périodiquement dans le temps est une oscillation « sinusoïdale » pure à une fréquence (f) unique ou de préférence une superposition de plusieurs oscillations « sinusoïdales ».
- 10 3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** la fréquence d'action (f) de la force de compactage du sol (F_B) qui varie dans le temps est réglée à une fréquence de résonance (f_0) du système oscillant ou de préférence à une fréquence qui dépasse la fréquence de résonance (f_0) d'une valeur de fréquence prédéfinie, uniquement déterminée par les stabilités du réglage.
- 15 4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** la sous-harmonique respectivement la plus basse ($f/[2.n]$) lors d'un déplacement de l'unité de contact de sol (5 ; 11 ; 17) au-dessus d'une zone de sol (7) correspondante est mise en mémoire en étant associée à cette zone de sol (7) et comparée avec une sous-harmonique mesurée la plus basse ($f/[2.n]$) lors d'un nouveau passage et un passage supplémentaire est suspendu si aucune sous-harmonique plus basse ($f/[2.n]$) n'est atteinte après un nombre prédéfini de passages, car il est impossible de parvenir à un compactage supplémentaire du sol avec les données mécaniques réglées.
- 20 5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, **caractérisé en ce que** les valeurs de l'amplitude des oscillations des sous-harmoniques au-dessus d'une zone de sol (7) correspondante sont mises en mémoire en étant associées à cette zone de sol (7) et comparées avec les valeurs de l'amplitude lors d'un nouveau passage et un passage supplémentaire est suspendu si une valeur accrue de l'amplitude de la sous-harmonique la plus basse est atteinte après un nombre prédéfini de passages, car il est impossible de parvenir à un compactage supplémentaire du sol avec les données mécaniques réglées.
- 25 6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** l'amplitude (A_0) de la force de compactage du sol (F_B) excitatrice, immédiatement après la détermination de la sous-harmonique respectivement la plus basse ($f/[2.n]$), est ramenée à une valeur jusqu'à ce qu'une position stable de l'équipement de compactage du sol soit atteinte.
- 30 7. Équipement de compactage du sol (1 ; 12 ; 14) pour compacter une zone de sol (7) à une mesure prédéfinie de la rigidité du sol (k_B) ou du degré de compactage, comprenant une unité de contact de sol (5 ; 11 ; 17) agissant sur la zone de sol (7), comprenant un mécanisme d'entraînement pour au moins une masse oscillante (m_d) qui exerce sur l'unité de contact de sol (5 ; 11 ; 17) une force de compactage du sol (F_B) qui varie périodiquement, et comprenant au moins un capteur (21) pour déterminer une oscillation d'un système oscillant, lequel contient l'équipement de compactage du sol (1 ; 12 ; 14) avec l'unité de contact de sol (5 ; 11 ; 17) et la zone de sol (7), **caractérisé par** une unité d'interprétation (20) reliée avec l'au moins un capteur (21) avec laquelle peut être enregistrée et mise en mémoire une forme d'oscillation à partir d'une oscillation excitatrice ou d'oscillations excitatrices agissant sur l'unité de contact de sol (5 ; 11 ; 17) avec une ou plusieurs fréquences d'action (f) et la mesure de la rigidité du sol (k_B) ou du degré de compactage pouvant être déterminée avec l'unité d'interprétation (20) à partir de la forme d'oscillation, à partir de paramètres mécaniques de l'équipement de compactage du sol (1 ; 12 ; 14) et à partir d'une situation dans le temps de la force de compactage du sol (F_B), plusieurs sous-harmoniques ($f/2$, $f/4$, $f/8$, etc.) pouvant être déterminées à cet effet avec l'unité d'interprétation (20) pour la fréquence d'action (f) de l'au moins une masse oscillante (m_d) et parmi ces sous-harmoniques ($f/2$, $f/4$, $f/8$, etc.), celle ayant la fréquence la plus basse ($f/[2.n]$) pouvant être déterminée comme mesure de la rigidité du sol (k_B) ou du degré de compactage, et la rigidité du sol (k_B) atteinte étant d'autant plus élevée que la fréquence de la fréquence sous-harmonique la plus basse ($f/[2.n]$) est basse.
- 35 40 45 50 55 8. Équipement de compactage du sol (1 ; 12 ; 14) selon la revendication 7, **caractérisé en ce qu'**avec l'unité d'interprétation (20), les valeurs d'amplitude maximales ($A(f)$, $A(f/[2.n])$) des sous-harmoniques ($f/[2.n]$) issues de la forme d'oscillation ainsi que de la fréquence d'action (f) sont mises dans une relation mutuelle pour la détermination plus précise de la mesure de la rigidité du sol (k_B) ou du degré de compactage.
9. Équipement de compactage du sol (1 ; 12 ; 14) selon la revendication 7 ou 8, **caractérisé en ce que** l'au moins un capteur est relié avec le mécanisme d'entraînement et la fréquence de l'au moins une masse oscillante peut être réglée par le mécanisme d'entraînement de telle sorte qu'il est possible d'atteindre une amplitude d'oscillation maximale, ce qui indique une résonance d'un système oscillant.

EP 1 516 961 B1

10. Équipement de compactage du sol (1 ; 12 ; 14) selon l'une des revendications 7 à 9, **caractérisé par** un deuxième capteur avec lequel peut être déterminé le moment d'une force, de préférence maximale, de l'au moins une masse oscillante dans le sens du compactage du sol, le premier capteur étant configuré de telle sorte qu'il peut en plus déterminer une amplitude d'oscillation prédéfinie, de préférence maximale, de l'unité de contact de sol dans le sens du compactage du sol, et une unité de comparaison reliée avec les deux capteurs et le mécanisme d'entraînement, laquelle règle la fréquence d'entraînement de telle sorte qu'il existe entre les deux valeurs maximales de l'amplitude un angle d'avance de phase de l'oscillation de masse excitatrice entre 90° et 180° , de préférence entre 95° et 130° .

11. Équipement de compactage du sol (1 ; 12 ; 14) selon l'une des revendications 7 à 10, **caractérisé en ce que** l'au moins une masse oscillante présente un balourd modifiable et le moment de balourd du balourd peut être réduit de telle sorte que les sous-harmoniques mesurées se situent tout juste encore dans la sensibilité de mesure du premier capteur.

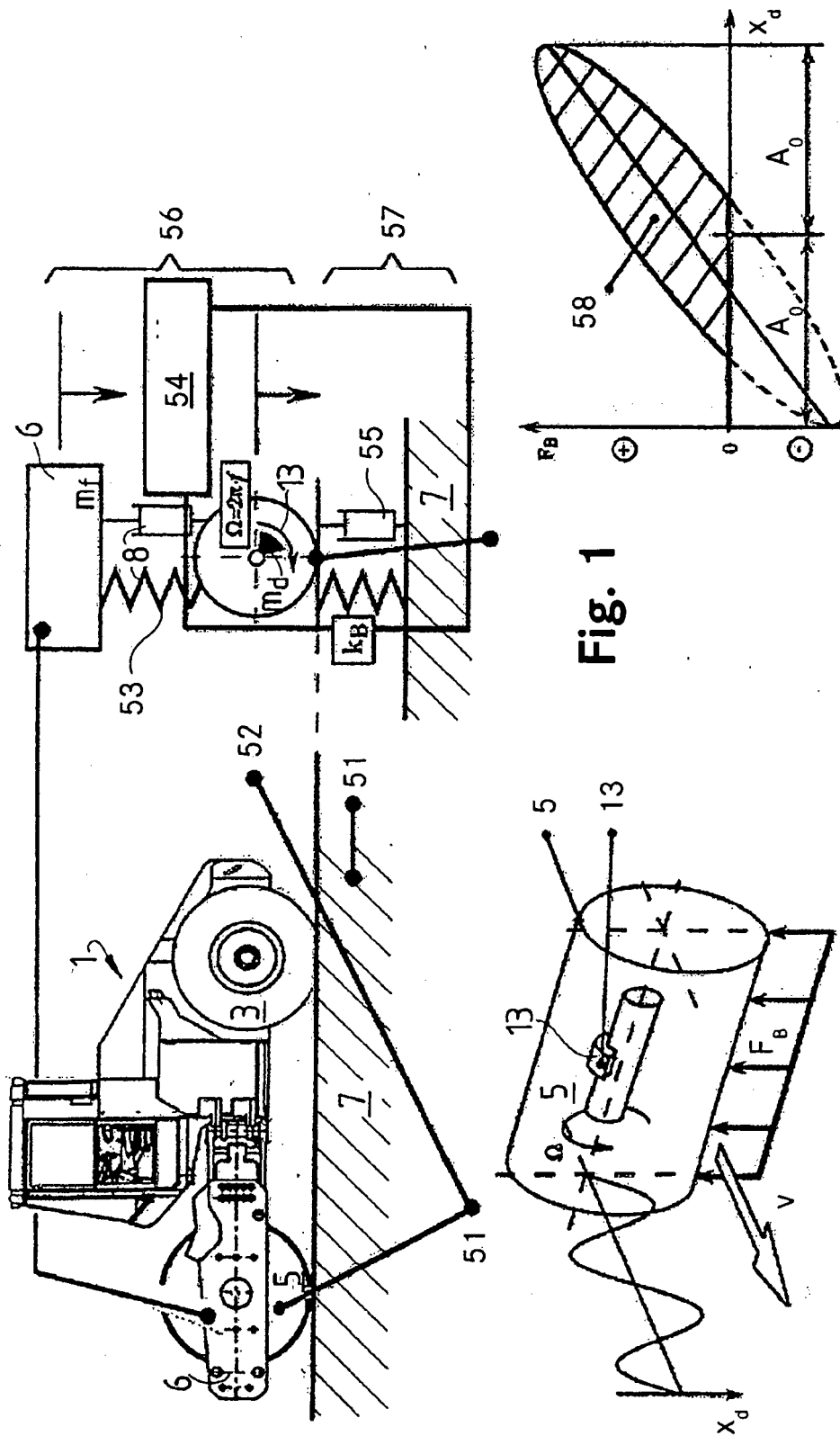
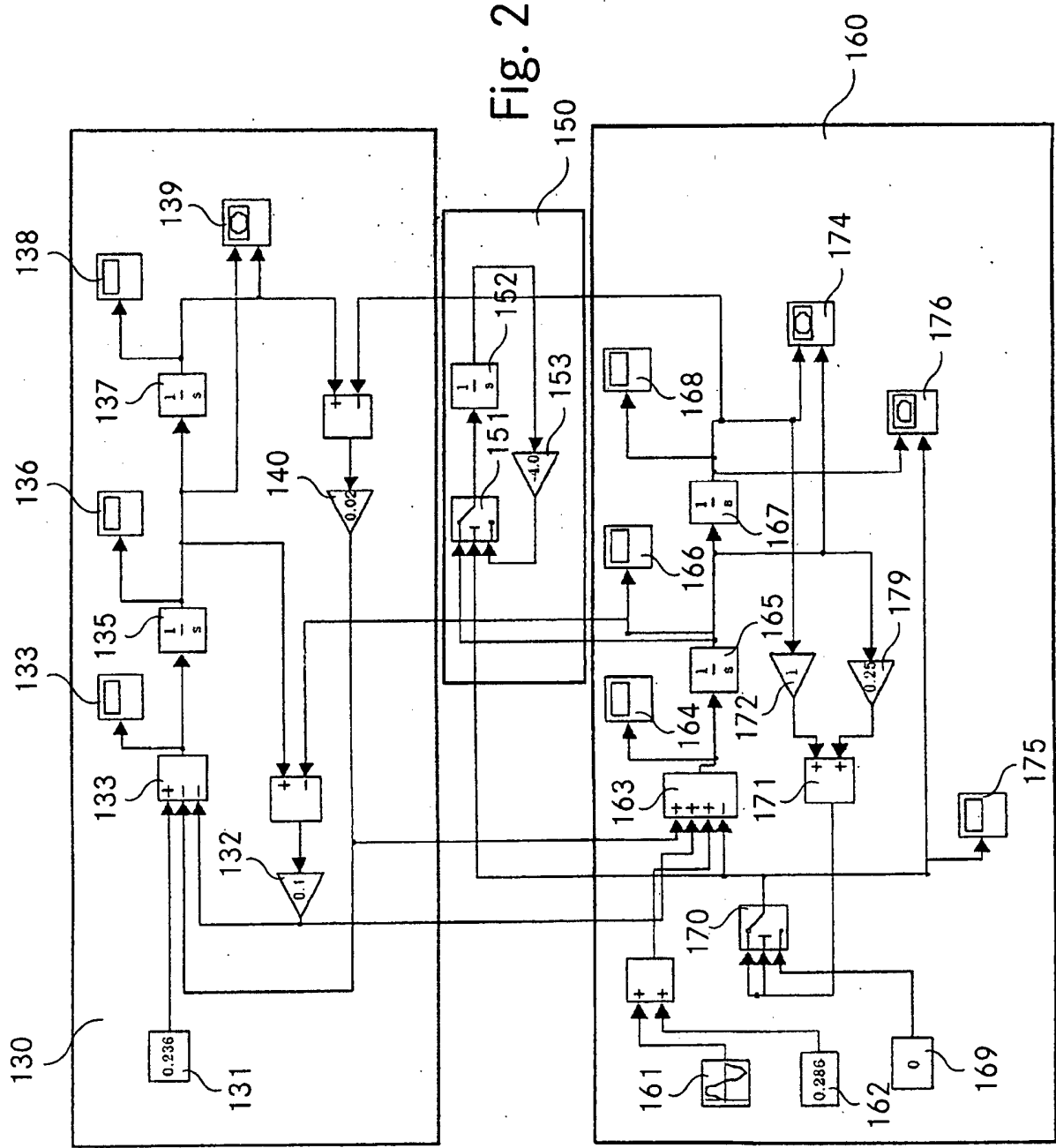


Fig. 1



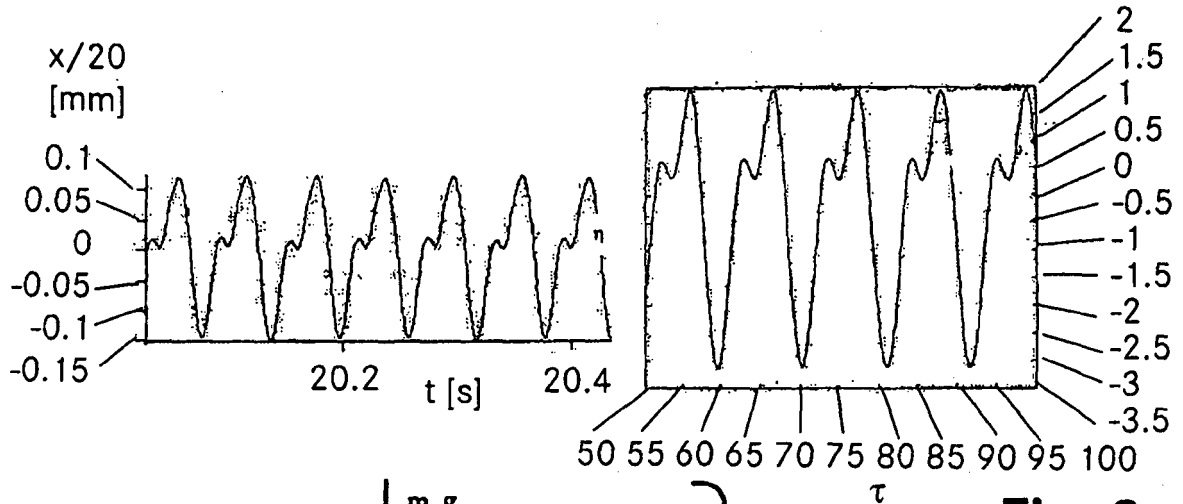


Fig. 3

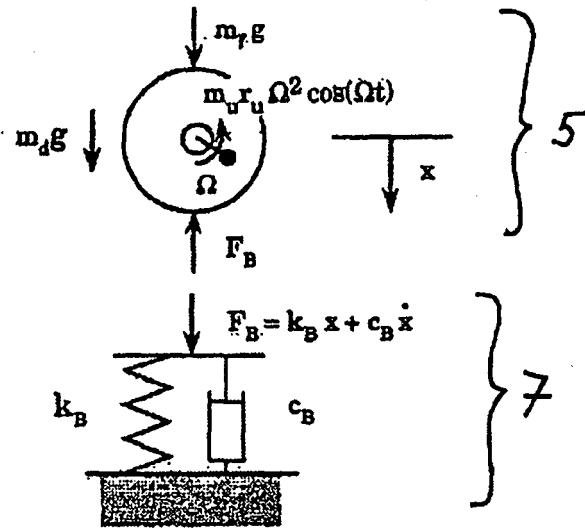
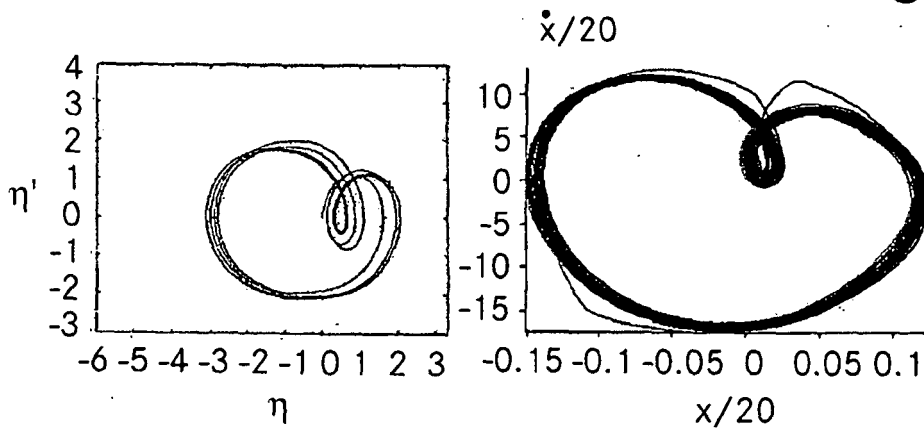


Fig. 4

Fig. 5



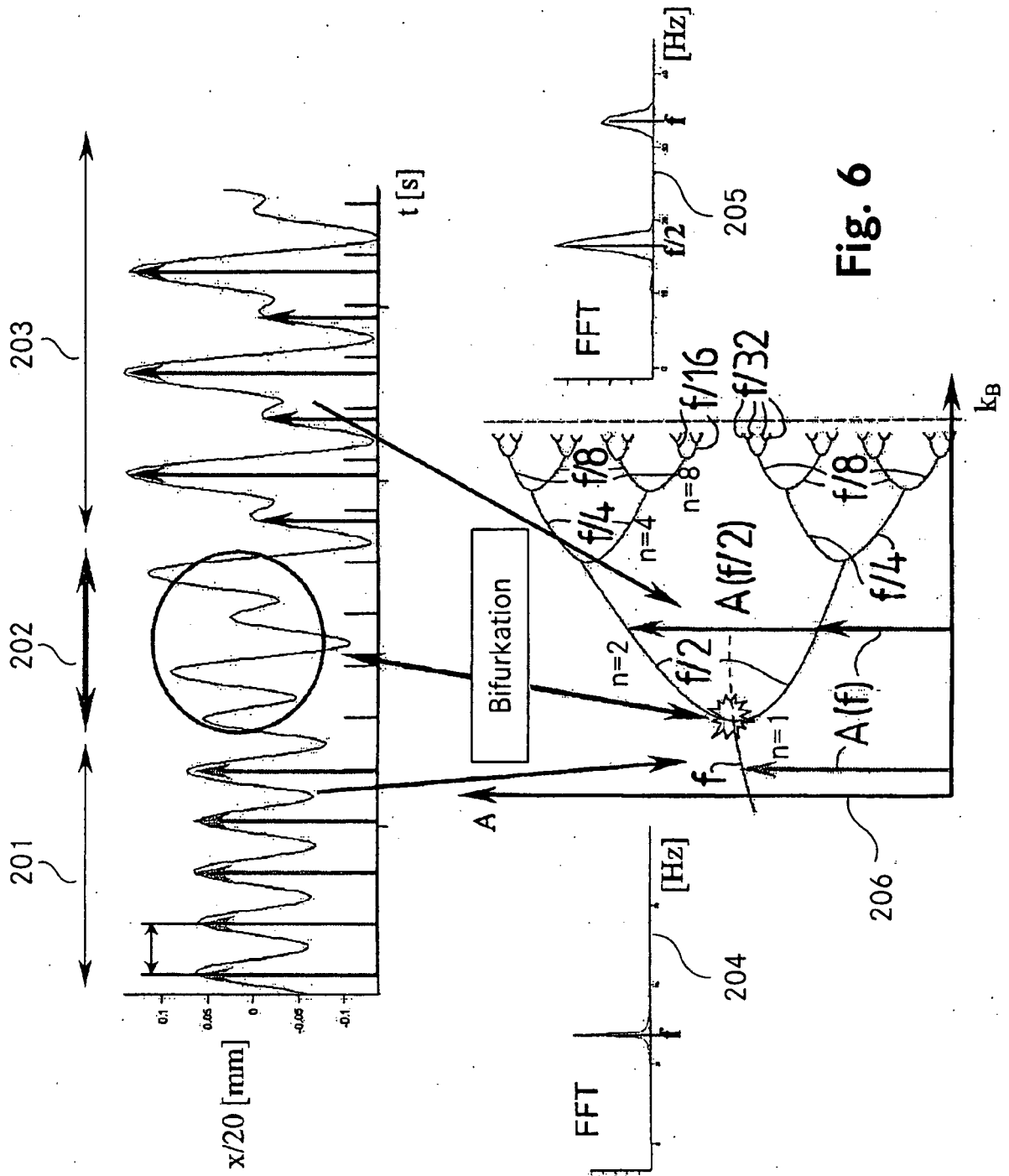


Fig. 6

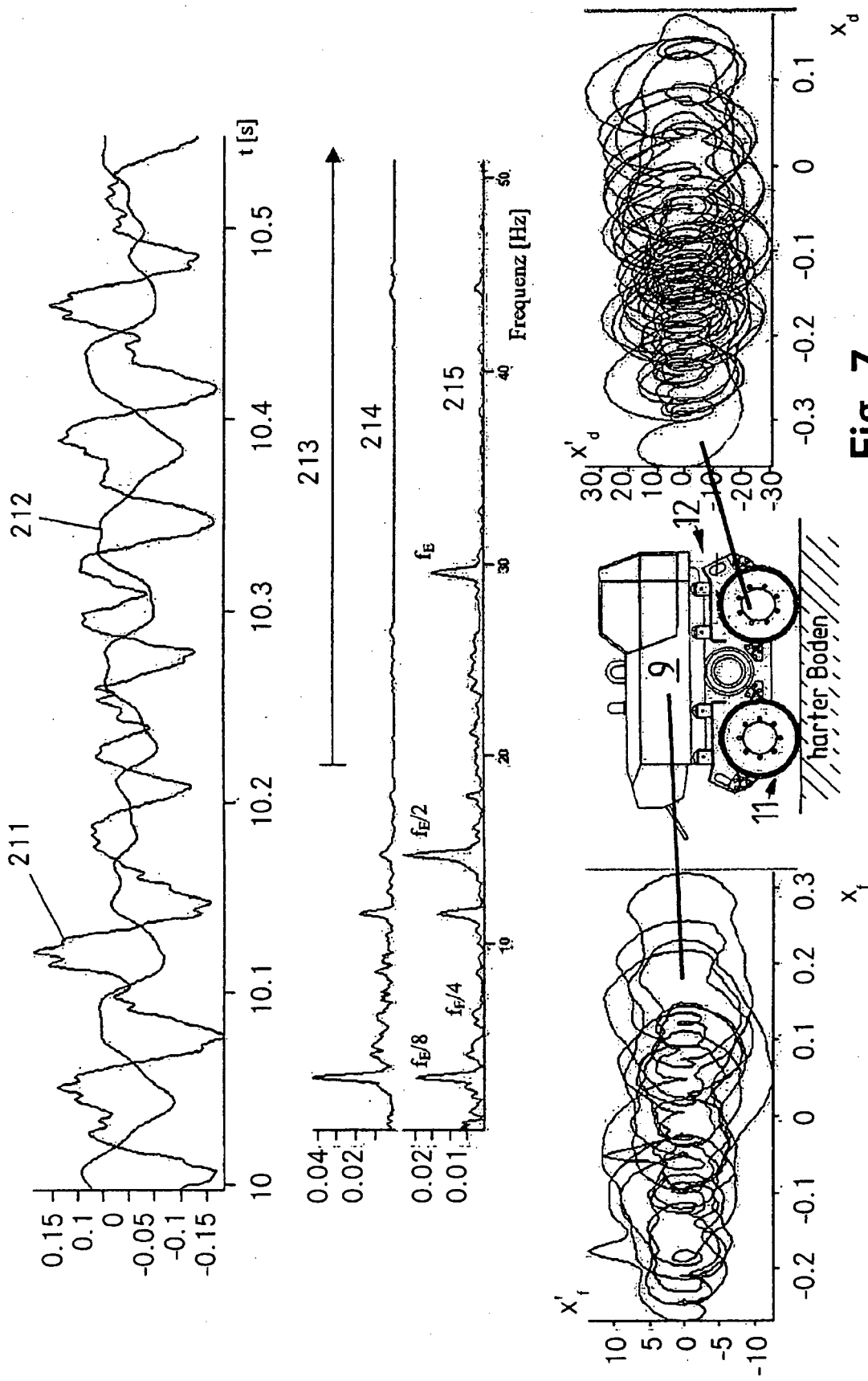


Fig. 7

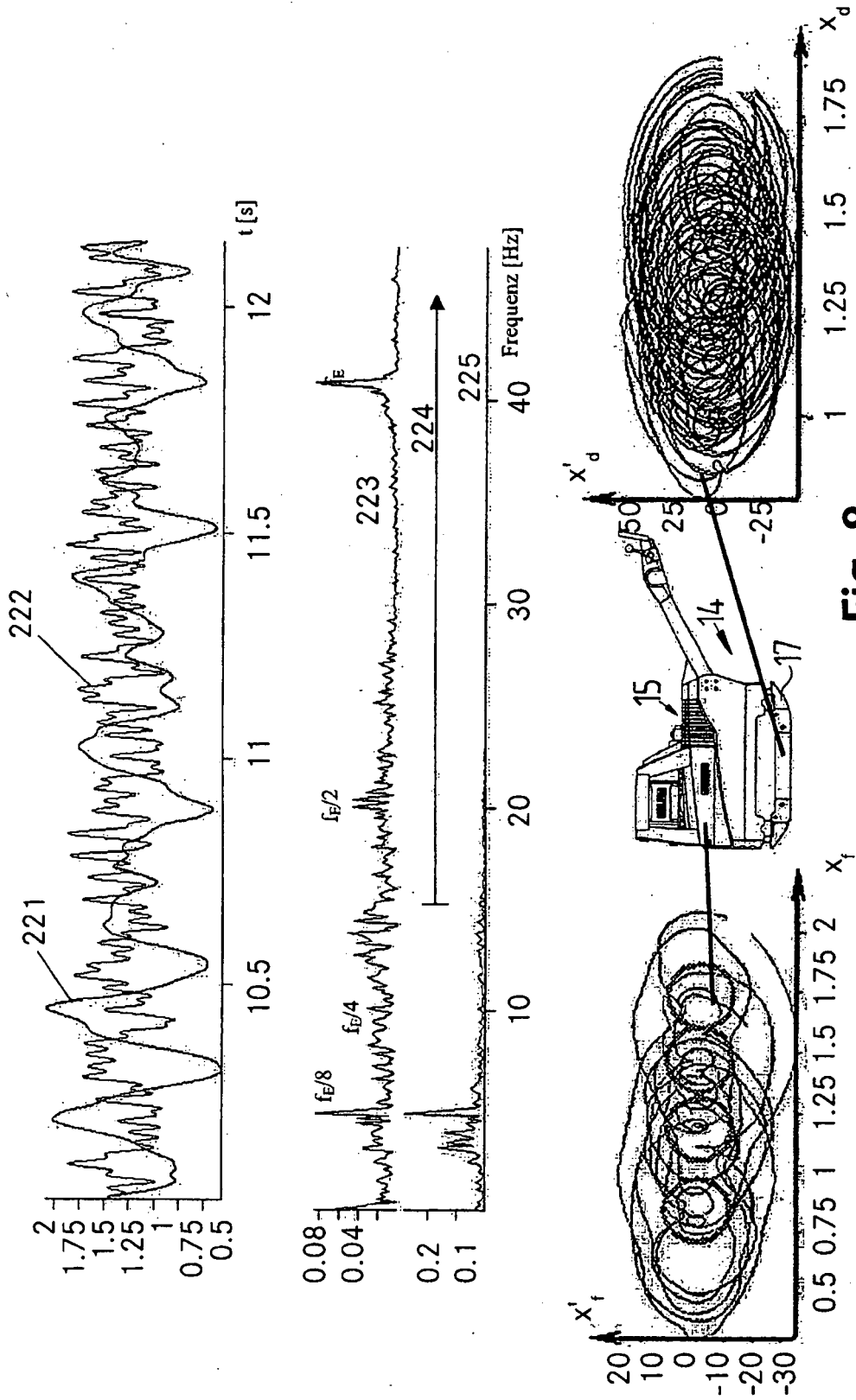
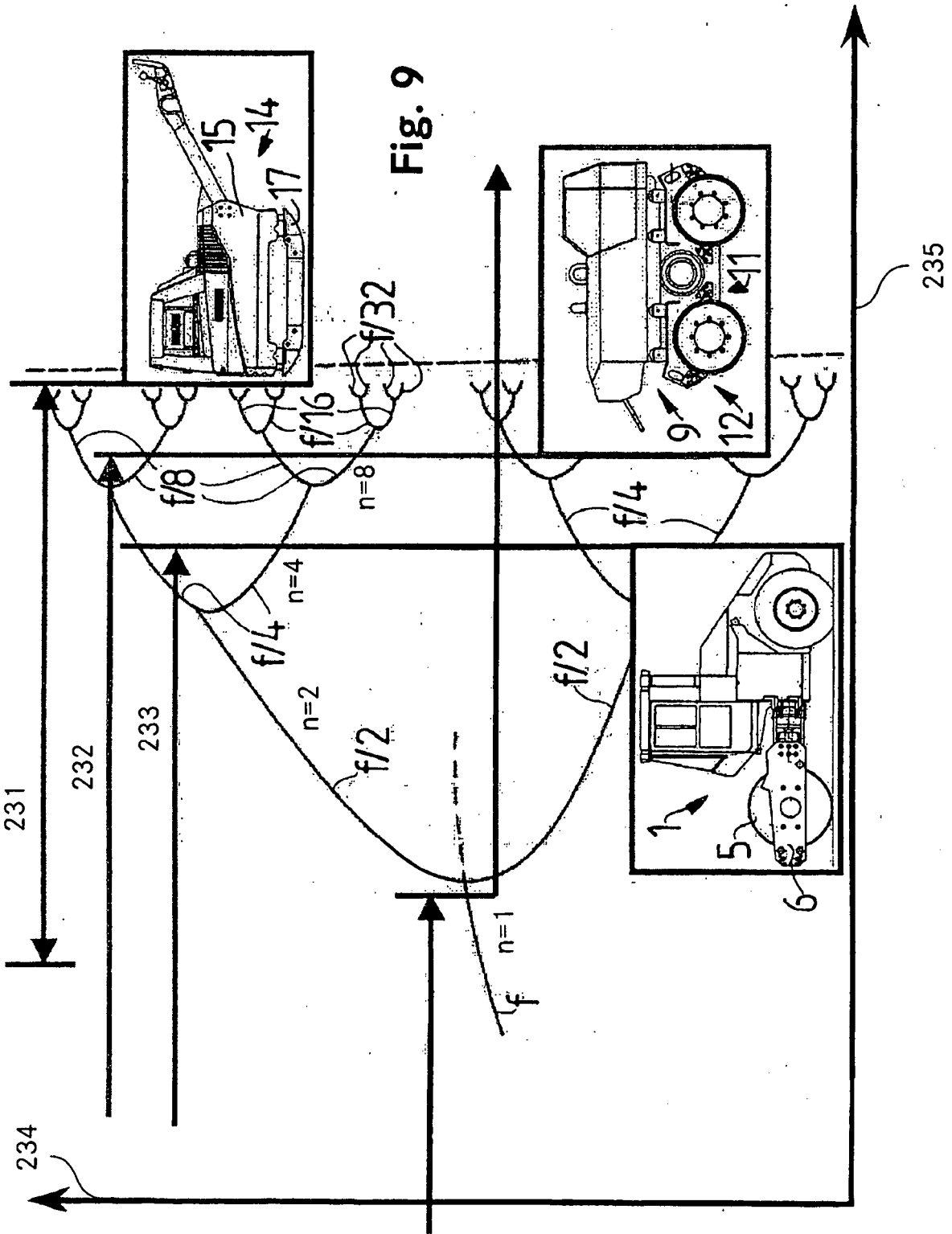


Fig. 8



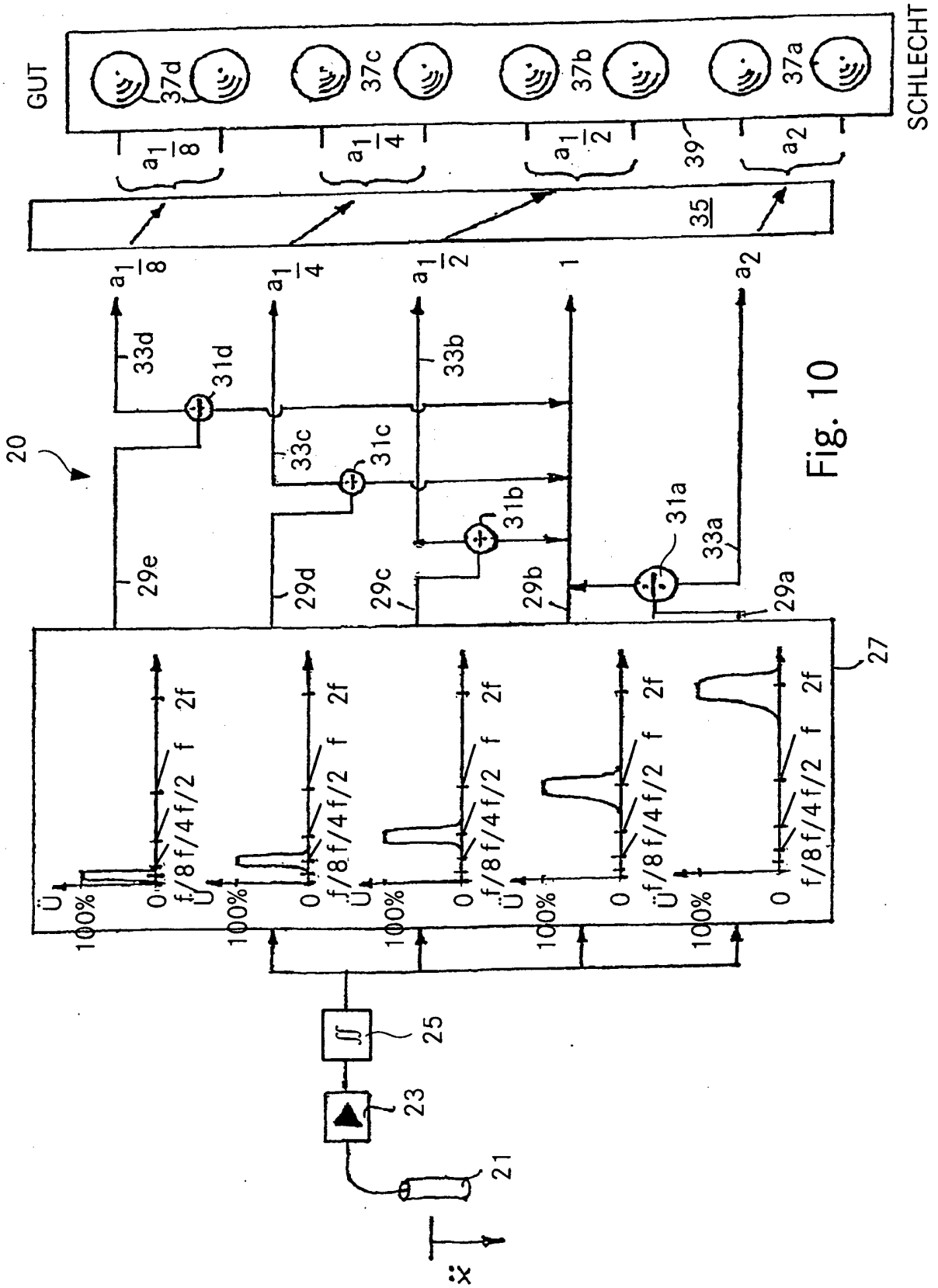


Fig. 10

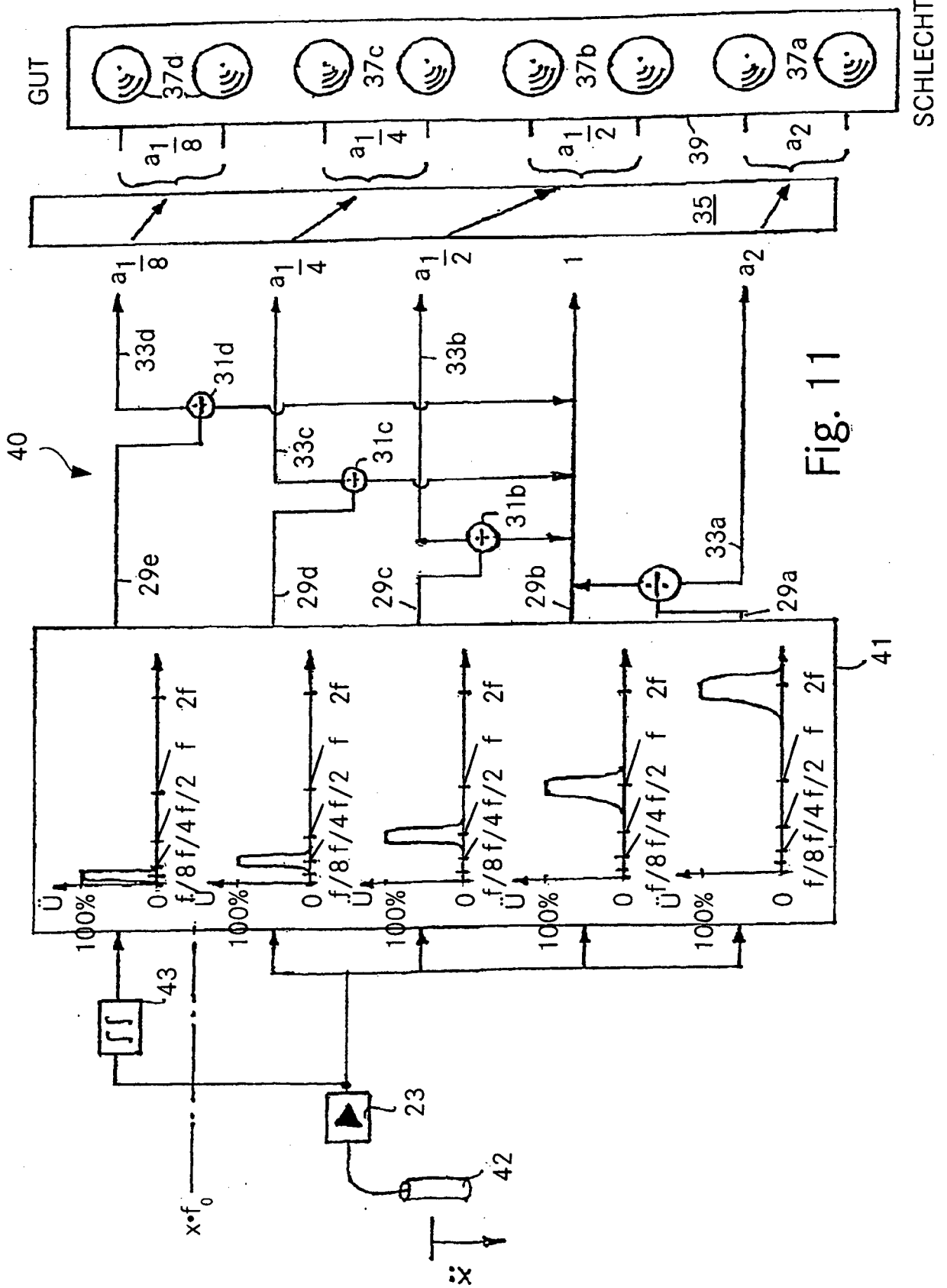


Fig. 11

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 10019806 A [0003]
- DE 10028949 A [0004]
- WO 9817865 A [0005]
- US 4546425 A [0007]
- US 5695298 A [0008] [0010]
- US 5727900 A [0010]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **MOON, FRANCIS C.** Chaotic and Fractal Dynamics, An Introduction for Applied Scientists and Engineers. Mc Graw Hill sowie, 1992 [0041]
- **THOMPSON, J.M.T. ; STEWART, H.B.** Nonlinear Dynamics and Chaos. John Wiley & Sons, Ltd, 2002 [0041]