(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 4 400 653 A1**

(12) EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
17.07.2024 Patentblatt 2024/29

(21) Anmeldenummer: **23151364.9**

(22) Anmeldetag: **12.01.2023**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
E02D 3/054 *(2006.01)* ***E02D 3/074*** *(2006.01)*

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
E02D 3/054; E02D 3/074

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(71) Anmelder: **Keller Holding GmbH**
63067 Offenbach/Main (DE)

(72) Erfinder:
- **KOPF, Fritz**
  1140 Wien (AT)
- **KUMMERER, Clemens**
  9500 Villach (AT)

(74) Vertreter: **Neumann Müller Oberwalleney Patentanwälte PartG mbB**
Overstolzenstraße 2a
50677 Köln (DE)

(54) TIEFENRÜTTLERANORDNUNG UND VERFAHREN ZUM BODENVERDICHTEN MITTELS EINER TIEFENRÜTTLERANORDNUNG

(57) Die Erfindung betrifft eine Tiefenrüttleranordnung (1) zur Bodenverdichtung umfassend: mehrere Tiefenrüttler (2), die jeweils eine in einem Rüttlergehäuse (4) von einem Drehantrieb (5) drehend antreibbare Unwucht (3) sowie zumindest einen Bewegungssensor (6, 12, 13, 14, 19) aufweisen, der ausgestaltet ist, um ein die Bewegung des jeweiligen Tiefenrüttlers (2) repräsentierendes Bewegungssignal (P) zu erfassen, und eine Steuerungselektronik (21), an welche die Bewegungssignale (P) der Tiefenrüttler (2) weitergegeben werden, wobei die Drehantriebe (5) der Tiefenrüttler (2) von der Steuerungselektronik (21) derart ansteuerbar sind, dass die Bewegungen der Tiefenrüttler (2) zusammenwirkend aufeinander abgestimmt sind.

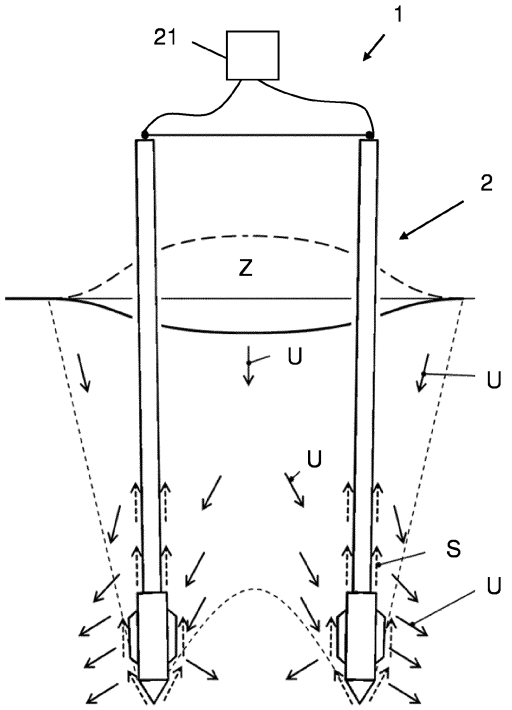


Fig. 2

EP 4 400 653 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur Baugrundverbesserung beziehungsweise zum Verdichten eines Bodens sowie ein entsprechendes Verfahren zur Durchführung einer Bodenverdichtung.

[0002] Zur Tiefenverdichtung locker gelagerter Böden werden Tiefenrüttler verwendet, welche durch eine rotierende Unwucht dynamisch angeregt werden und mit dem umgebenden, zu verdichtenden Boden ein dynamisches Interaktionssystem bilden. Anhand von Messungen am Rüttler können die dynamische Anregung, insbesondere Unwucht und deren Lage, sowie die Rüttlerbewegung bestimmt und daraus die dynamischen Eigenschaften des umgebenden Bodens ermittelt werden. Tiefenrüttler können in verschiedenen Verfahren zur Baugrundverbesserung eingesetzt werden, die beispielsweise in dem Prospekt "Die Tiefenrüttelverfahren" (Prospekt 10-02D) der Anmelderin beschrieben sind.

[0003] Das Verdichten des Bodens erfolgt in der Regel dadurch, dass der dynamisch angeregte Rüttler an einem Verdichtungspunkt gegebenenfalls unter Hilfe von Wasserspülung in den Boden bis zur gewünschten Verdichtungstiefe eindringt und dann entweder in Stufen gezogen und jeweils bis zu einem Abbruchkriterium gehalten wird oder Stopfbewegungen in einem aufwärtsbewegten Pilgerschrittverfahren durchführt. Flächige Verdichtung erfolgt durch die Bearbeitung vieler Verdichtungspunkte in einem Raster.

[0004] Bei der dynamischen Verdichtung regt das Verdichtungsgerät den Boden dynamisch an und versetzt ihn in Schwingungen, wodurch die die Bodenkörner mobilisiert werden und sich in eine dichtere Lagerung begeben. Dieser Verdichtungsprozess erfordert entsprechende Zeit, in der die Schwingung aufrechterhalten werden muss. Dies findet, bei der Verdichtung mittels Tiefenrüttler, in den Abbruchkriterien Berücksichtigung, welche die Beendigung jedes einzelnen Verdichtungsschrittes in einer Tiefenstufe definieren und den nächsten Verdichtungsschritt einleiten (stufenweises Ziehen). Die Reichweite des Verdichtungsgerätes richtet sich nach der Art der Anregung (Amplitude, Frequenz) und seiner Geometrie sowie nach den Bodeneigenschaften.

[0005] Aus der DE 10 2016 125 155 A1 ist eine Verdichtungsanlage mit mehreren an einem Träger angebrachten separaten Vibratorstangen bekannt. Die Vibratorstangen können in einem Raster von zwei bis zehn Stück angeordnet werden. Die Betriebsdaten der Verdichtungsanlage und der Vibratoren, wie Drehzahl, Temperatur und Druck, werden mittels integrierter Sensoren permanent erfasst.

[0006] Aus der EP 3 517 687 B1 ist ein Verfahren zur Verdichtungserfassung und -steuerung beim Verdichten eines Bodens mittels eines Tiefenrüttlers bekannt, der eine in einem Rüttlergehäuse drehend antreibbare Unwucht und mehrere Sensoren aufweist. Das Verfahren umfasst: Einbringen des Tiefenrüttlers in den Boden bis zu einer gewünschten Endtiefe; Verdichten des Bodens mittels des Tiefenrüttlers in Verdichtungsschritten, wobei während des Verdichtens zu einer jeweils gemessenen Tiefe der Vorlaufwinkel der Unwucht sowie die Schwingungsamplitude des Tiefenrüttlers ermittelt werden; Erfassen eines Bodensteifigkeitsverlaufs aus Bodensteifigkeitswerten, die über der Zeit auf Basis des Vorlaufwinkels und der Schwingungsamplitude ermittelt werden; Ermitteln von ersten und zweiten Bodensteifigkeitswerten, bei denen eine zweite Steigerungsrate größer ist als eine erste Steigerungsrate des Bodensteifigkeitswerts; Berechnen eines Übergangs-Bodensteifigkeitswerts, der zwischen dem ersten und zweiten Bodensteifigkeitswert liegt; und Speichern des jeweils erfassten Übergangs-Bodensteifigkeitswerts zur zugehörigen Tiefe. Auf Basis von über der Tiefe erfassten Übergangs-Bodensteifigkeitswerte kann ein Bodensteifigkeitsprofil erstellt werden.

[0007] Bei großen Verdichtungsgeräten kann es dazu kommen, dass die Antriebsmotoren erhitzen und die zur Verdichtung erforderliche Schwingung nicht ausreichend lange aufrechterhalten können. Die Abbruchkriterien für die Verdichtung sind demnach unter Umständen nicht mehr bodenmechanisch motiviert, sondern richten sich nach den Möglichkeiten des Rüttlers.

[0008] Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Anordnung zur Bodenverdichtung beziehungsweise zur Verbesserung eines Baugrundes vorzuschlagen, die eine besonders hohe Verdichtungsleistung ermöglicht. Die Aufgabe besteht ferner darin, ein entsprechendes Verfahren zur effizienten Bodenverdichtung vorzugschlagen.

[0009] Zur Lösung wird eine Tiefenrüttleranordnung zur Bodenverdichtung vorgeschlagen, umfassend: mehrere Tiefenrüttler, die jeweils eine in einem Rüttlergehäuse von einem Drehantrieb drehend antreibbare Unwucht sowie zumindest einen Sensor aufweisen, der ausgestaltet ist, um ein die Bewegung des jeweiligen Tiefenrüttlers repräsentierendes Bewegungssignals zu erfassen, eine Steuerungselektronik, an welche die Bewegungssignale der Tiefenrüttler weitergegeben werden, wobei die Drehantriebe der Tiefenrüttler von der Steuerungselektronik derart ansteuerbar sind, dass die Bewegungen der Tiefenrüttler zusammenwirkend aufeinander abgestimmt sind.

[0010] Ein Vorteil der Anordnung ist, dass das koordinierte, dynamisch synchronisierte Zusammenwirken mehrerer Tiefenrüttler ein besonders effizientes Verdichten ermöglicht, das heißt, die Anordnung mit aufeinander abgestimmter Steuerung der Tiefenrüttler ist effektiver als die Summe der Einzelkomponenten. Auf diese Weise kann mit einer Mehrzahl von kleineren Tiefenrüttlern die Wirkung eines Großgerätes erzeugt werden, ohne dessen Nachteile und Einschränkungen in Kauf nehmen zu müssen. Die Anzahl der Tiefenrüttler ist prinzipiell frei wählbar und kann an die baugrundtechnischen Anforderungen angepasst werden. Beispielsweise kann die Anordnung zwei, drei, vier oder mehr Tiefenrüttler umfassen, die vorzugsweise symmetrisch angeordnet sind. Die Tiefenrüttler können auf einem oder mehreren Trägergeräten angeordnet sein. Der Abstand der Rüttler in der Gruppe ist ein wichtiger Parameter, welcher auf den zu ver-

dichtenden Boden so abzustimmen ist, dass einerseits eine ausreichende Mobilisierung des umschlossenen Bereiches und anderseits eine möglichst große Reichweite erzielt werden soll. Ein weiterer Vorteil der Anordnung ist, dass die instrumentierten Tiefenrüttler zur Durchführung von geomechanischen Versuchen zwecks Qualitätskontrolle genutzt werden können.

[0011] Alle Tiefenrüttler sind elektronisch mit einer zentralen Steuerungselektronik verbunden. Zur Regelung von Prozessparametern, wie der Frequenz, Unwucht, Wasserzugabe, Spitzendruck, etc. zwecks Optimierung des Verdichtungserfolges kann ein Regelkriterium zur Anwendung kommen, welches auf dem Nachlaufwinkel der Bodenreaktionskraft basiert und sowohl für den einzelnen Rüttler als auch für die synchronisierte Anwendung mehrerer Tiefenrüttler geeignet ist.

[0012] Eine synchronisierte Bewegung umfasst im Rahmen der vorliegenden Offenbarung insbesondere, dass die Positionen bzw. Bewegungen der Rüttler untereinander gleichbleiben bzw. sich regelmäßig wiederholen. Das kann für gleichsinnig, wie gegensinnig drehende Rüttler gelten. Die Winkelgeschwindigkeiten der Rüttler sind dabei vorzugsweise gleich. Alle Rüttler weisen in Bezug auf eine Bezugsrichtung vorzugsweise immer denselben Phasenwinkel auf, der in Drehrichtung insbesondere positiv gezählt wird.

[0013] Ein Tiefenrüttler kann nach einer Ausführungsform eine Vorrichtung zur dynamischen Anregung, einen Antrieb zur Erzeugung der Anregung, optional Flügel zur Reduktion der Verdrehung während der Verdichtung, optionale Wasseraustrittsöffnungen an der Spitze und gegebenenfalls am Rüttlerstrang, eine dynamische Entkoppelung zum Rüttlerstrang sowie eine Aufhängung am Trägergerät aufweisen. Der Anregungsantrieb kann einen Motor, eine rotierende Welle, eine oder mehrere Unwuchten, die gegebenenfalls mit Umschlaggewicht ausgestattet sein können, umfassen.

[0014] Nach einer Ausführungsform können die Tiefenrüttler jeweils mit Flügeln ausgestattet sein. Mit den Flügeln lässt sich das Bewegungsverhalten eines einzelnen Rüttlers sowie dessen Reichweite beeinflussen. Stehen die Flügel sämtlicher Rüttler einer Gruppe parallel zueinander, so ist zwar die Synchronisation der Rüttlerbewegungen einfacher zu bewerkstelligen, das Verdichtungsergebnis ist jedoch richtungsabhängig, was meist unerwünscht ist. Ein gleichmäßigeres Verdichtungsergebnis wird erreicht, wenn die Flügel weggelassen werden.

[0015] Nach einer möglichen Ausführungsform können Verdrehsicherungsmittel vorgesehen sein, mit denen die Rüttler der Gruppe an ihrer Aufhängung am Verdrehen gehindert werden. Die Verwendung von Flügeln als Bremse der Rotation um die Vertikalachse ist somit nicht erforderlich, beziehungsweise deren Abmessungen kann reduziert werden.

[0016] Die mögliche Sensorik kann je nach Anwendungsfall und Bedarf ausgewählt werden. Um die Bewegung mehrerer Rüttler zu synchronisieren, ist an jedem Rüttler zumindest ein Bewegungssensor vorgesehen, der ein die Bewegung des Rüttlers repräsentierendes Bewegungssignal erfasst. Wenn die Anregung synchronisiert werden soll, sind die Positionen der Unwuchten der Tiefenrüttler mittels Positionssensoren zu erfassen. Nach einer möglichen Ausführungsform können an jedem der Tiefenrüttler mehrere Sensoren angebracht sein, die das Bewegungsverhalten beziehungsweise die Beschleunigung und/oder die Lage der Unwucht sensieren. Es können mehrere Beschleunigungssensoren in verschiedenen Ebenen am Tiefenrüttler angebracht sein. Aus bidirektionalen Beschleunigungsmessungen in zwei Ebenen eines Rüttlers kann das horizontale Bewegungsverhalten an beliebigen Stellen des Rüttlers, beispielsweise an der Spitze oder der Lage der Unwuchtanregung ermittelt werden. Durch zweifache Integration dieser Horizontalbeschleunigungen können die zugehörigen Schwingwege ermittelt werden, welche halbiert zur Schwingweg-Amplitude A führen. Die Rüttlerbewegung hinkt der verursachenden dynamischen Anregung durch die drehend angetriebene Unwucht hinterher. Durch die Bestimmung der Lage der Unwucht und deren Vergleich mit der Rüttlerbewegung kann der Vorlaufwinkel φ ermittelt werden. Soweit im Rahmen der vorliegenden Offenbarung nur die Synchronisation der Rüttlerbewegung beschrieben wird, versteht es sich, dass die Gesetzmäßigkeiten ebenso auf die Synchronisation der Anregung anwendbar sind.

[0017] Wird die Verdrehung der Tiefenrüttler um die Vertikalachse nicht mechanisch unterbunden, ist eine Messung der Verdrehung erforderlich, um diese bei der Synchronisation kompensieren zu können. Ferner kann optional die Motorleistung und/oder die Temperatur des Antriebsmotors mittels entsprechender Leistungs- beziehungsweise Temperatursensoren erfasst werden. Nach einer Ausführungsform können auch die Drücke und/oder Durchflussmengen für Spitzenwasser, Unterwasser und/oder Oberwasser mittels entsprechender Druck- und/oder Durchflusssensoren erfasst werden. Eine dynamische Reaktion des Bodens kann optional mittels Sensoren auf der Oberfläche und/oder in der Tiefe gemessen werden, wobei die tiefen Sensoren unter dem Grundwasser auch die Porenwasserdrücke ermitteln können. Aus dem bekannten Gewicht des Rüttlers und einer gemessenen Kranlast kann bei Bedarf eine vertikale Belastung des Bodens durch den Rüttler bestimmt werden. Wenn Tiefenrüttler mit Flügeln verwendet werden, kann optional durch eine Messung der Rüttlerverdrehung die Orientierung der Flügel bestimmt werden, welche einen Einfluss auf die Rüttlerbewegung hat.

[0018] Vorzugsweise haben die Tiefenrüttler für die Synchronisation Leistungsreserven. Die Steuerungselektronik kann ausgestaltet sein, um abhängig von den Bewegungssignalen der Tiefenrüttler den Drehantrieb eines der Tiefenrüttler primär zu steuern, und den Drehantrieb zumindest eines anderen der Tiefenrüttler sekundär zu steuern, derart, dass die Drehbewegung des sekundär gesteuerten Drehantriebs auf die Drehbewegung des primär gesteuerten Drehantriebs zusammenwirkend abgestimmt ist. Dabei ist die Steuerungselektronik vorzugsweise ausgestaltet, um die Dreh-

bewegung des sekundär gesteuerten Drehantriebs synchron zur Drehbewegung des primär gesteuerten Drehantriebs zu steuern, insbesondere mit gleicher Bewegungsgeschwindigkeit.

[0019] Der primäre Tiefenrüttler kann auch als "Master" bezeichnet werden, während der beziehungsweise die anderen Tiefenrüttler im abhängigen Modus betrieben werden, was auch als "Slave"-Betrieb bezeichnet werden kann. Ein beliebiger Tiefenrüttler der Gruppe kann als "Master" ausgewählt und ausreichend unter seiner Leistungsgrenze betrieben werden. Die übrigen Tiefenrüttler der Anordnung können im "Slave"-Betrieb geregelt werden, deren Bewegungen (beziehungsweise Anregung) der Bewegung (beziehungsweise Anregung) der des "Master" folgt. Die einzelnen Tiefenrüttler können eine autarke Energieversorgung aufweisen. Bei heterogenen Bodenverhältnissen oder unterschiedlicher Rüttler-Charakteristik kann ein Algorithmus jenen Rüttler, dessen Leistungsreserven erschöpft sind, zum "Master" ernennen, nach dem sich die übrigen Rüttler, welche noch Leistungsreserven besitzen, zu richten haben beziehungsweise diesem regelungstechnisch nachlaufen. Wird gleitend von einer Betriebsweise zu einer anderen gewechselt, so kann der "Master"-Rüttler unbeirrt weiterlaufen, während sich die anderen kontrolliert phasenmäßig zurückfallen lassen, das heißt etwas langsamer drehen, bis die Phasenlage der neuen Betriebsweise erreicht ist und so gehalten werden kann.

[0020] Mit der Gruppe aus mindestens zwei synchronisierten Rüttlern ist es insgesamt möglich, Böden effektiv zu bearbeiten, welche für einen Einzelrüttler bereits problematisch sind, weil der von den Rüttlern umschlossene Bereich mobilisiert werden kann. Dies ist deshalb möglich, weil die Anordnung aus flexibel korrelierbaren Einzelkomponenten gebildet ist, die zusammenwirken und beispielsweise auch einen Großrüttler simulieren können, der wahlweise auch seine Form und/oder sein Volumen dynamisch verändern kann. Je nach geotechnischem und betrieblichem Bedarf gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Synchronisation, welche unterschiedlichen Betriebsweisen zugeordnet werden können.

[0021] Nach einer ersten Betriebsweise kann die Steuerungselektronik die Drehbewegungen mehrerer der Tiefenrüttler mit der gleichen Drehrichtung, der gleichen Phasenlage und der gleichen Winkelgeschwindigkeit regeln. Diese Betriebsweise ähnelt der eines Großrüttlers. In dieser Betriebsweise sind die Rüttlerbewegungen (bzw. Anregungen) so synchronisiert, dass es zu einer gemeinsamen Parallelverschiebung der gesamten Gruppe kommt. Eine Selbstsynchronisation in dieser Betriebsweise ist zwar nicht ausgeschlossen, wird aber wegen deren Unverlässlichkeit und der entsprechenden Phasenverschiebungen nicht angestrebt. Bodenmechanisch wird eine große Reichweite erzielt, der von den Rüttlern umschlossene Bereich wird in Ermangelung von Schubverzerrungen nicht maximal beansprucht. Die Erschütterungswirkung auf die Umgebung ist beträchtlich. Dies ist zwar für die meisten Baustellen der Tiefenverdichtung belanglos, die Energie, welche für die Erschütterung der Umgebung aufgewendet wird (geometrische Dämpfung), ist jedoch für die Bodenverdichtung verloren.

[0022] Nach einer zweiten Betriebsweise kann die Steuerungselektronik die Drehbewegungen von mindestens zwei der Tiefenrüttler mit der gleichen Drehrichtung, der gleichen Winkelgeschwindigkeit und um 180° gegeneinander versetzten Phasenlagen regeln. Diese Betriebsweise kann auch als" Oszillation und Kompression" bezeichnet werden. Dabei werden die in gleicher Drehrichtung laufenden Unwuchten der Tiefenrüttler dermaßen synchronisiert, dass die Horizontalkräfte auf den Boden einander egalisieren und global ein dynamisches Torsionsmoment um die Vertikalachse entsteht. Bei Betrieb wird das sich um die Vertikalachse dynamisch abwechselnd im und gegen den Uhrzeigersinn drehende (oszillierende) Muster auch zyklisch abwechselnd kleiner und größer (Kompression und Expansion). Außerhalb des umgebenden Bereiches werden durch das Oszillieren Schubverzerrungen erzeugt, die der Verdichtung dienen.

[0023] Nach einer dritten Betriebsweise kann die Steuerungselektronik ausgestaltet sein, um die Drehbewegungen von mindestens zwei der Tiefenrüttler ausgehend von einer gleichen Phasenlage in einer durch die Längsachsen der Tiefenrüttler aufgespannten Bezugsebene mit entgegengesetzten Drehrichtungen und der gleichen Winkelgeschwindigkeit zu steuern. Diese Betriebsweise kann auch als "Richtschwinger mit Oszillation" bezeichnet werden.

[0024] Nach einer vierten Betriebsweise kann die Steuerungselektronik ausgestaltet sein, um die Drehbewegungen von mindestens zwei der Tiefenrüttler ausgehend von einer gleichen Phasenlage senkrecht zu einer durch die Längsachsen der Tiefenrüttler aufgespannten Bezugsebene mit entgegengesetzten Drehrichtungen und der gleichen Winkelgeschwindigkeit zu steuern. Diese Betriebsweise kann auch als "Richtschwinger mit Kompression" bezeichnet werden. Bei Verwendung einer Anordnung mit vier Tiefenrüttlern, deren Achsen ein Rechteck einschließend angeordnet werden können, können die Unwuchten der Tiefenrüttler diagonalweise in unterschiedlicher Drehrichtung betrieben werden. Dabei können die Tiefenrüttler so synchronisiert werden, dass sie in der Betriebsweise "Richtschwinger" arbeiten, wobei die globale Schwingrichtung, in die alle Rüttler phasengleich wirken, frei eingestellt werden kann. Quer dazu egalisieren einander die Kräfte auf den Boden, sodass nur lokale Schubverzerrungen stattfinden. Um eine gleichmäßige Reichweite der Verdichtung um die Gruppe zu erreichen, kann die globale Schwingrichtung stufenlos rotiert werden, wobei bei jedem Verdichtungsschritt zumindest eine halbe Umdrehung (oder ein ganzzahliges Vielfaches davon) bewerkstelligt werden sollte. Die Erschütterung der Umgebung und die damit für die Verdichtung verlorene Energie sind relativ hoch, ähnlich wie beim "Großrüttler". Bei rotierender Schwingrichtung ist die Erschütterung der Umgebung pulsierend wahrnehmbar.

[0025] In einer Ausführungsform können vier beispielsweise quadratisch oder rechteckig angeordnete Tiefenrüttler verwendet werden, ohne darauf beschränkt zu sein. Es versteht sich jedoch, dass für sämtliche Aufstellungen unter-

schiedliche Rüttleranzahlen anwendbar sind. Bei einer Ausführungsform mit mehr als zwei, insbesondere mit vier Tiefenrüttlern können neben allen vorstehend genannten Betriebsweisen "Großrüttler", "Oszillation mit Kompression" und "Richtschwinger", alternativ oder ergänzend abgewandelte und weitere Betriebsweisen realisiert werden. Bei einigen Betriebsweisen können sich die auf den Boden wirkenden Kräfte weitgehend egalisieren. Durch die fehlende globale Wirkung auf den Boden kann die Erschütterung der Umgebung minimiert werden, und die eingebrachte Energie steht primär der lokalen Verdichtung und Mobilisierung zur Verfügung.

[0026] Insbesondere ist ein weiterer Betriebsmodus für vier Tiefenrüttler dadurch gekennzeichnet, dass alle Rüttler in der gleichen Drehrichtung derart synchronisiert werden, dass sich die Rüttler der einen Diagonale zueinander bewegen, während sich die Rüttler der anderen Diagonale auseinander bewegen. Dies kann wechselweise zyklisch durch die dynamische Anregung geschehen. Lokal wird der Bodenbereich zwischen den Rüttlern dadurch dynamischen Schubverzerrungen unterworfen, weswegen diese Betriebsweise auch als "Schubverzerrung" bezeichnet werden kann. Dabei führen die Schubverzerrungen in hoch effektiver Weise zur Mobilisierung und Verdichtung des Bodens.

[0027] Ein weiterer Betriebsmodus für eine Anordnung mit vier Rüttlern ist dadurch gekennzeichnet, dass die Unwuchten der Tiefenrüttler diagonalweise in unterschiedlicher Drehrichtung angetrieben werden. Die lokale Einwirkung auf den Boden erfolgt durch eine Kombination von dynamischen Schubverzerrungen, welche mit der Kompressions- und Expansionsbewegung abgewechselt werden. Diese Betriebsweise kann auch als "Schubverzerrung mit Kompression" bezeichnet werden.

[0028] Ein Tiefenrüttler kann auf einem Trägergerät, beispielsweise einem Seilbagger, angeordnet sein und entweder frei hängend oder geführt (Mäkler) in den zu verdichtenden Boden einvibriert werden. Bei Erreichen der Endteufe können die Frequenz und/oder die Exzentrizität der dynamischen Anregung umgestellt werden, um den Boden in Abhängigkeit von dessen Eigenschaften von unten nach oben schrittweise ziehend oder im Pilgerschritt stopfend, mit Materialzugabe von oben oder an der Spitze (Schleusenrüttler) mit Wasserzugabe an der Spitze (Unterwasser) und gegebenenfalls am Rüttlerstrang (Oberwasser), zu verdichten. Das Verdichten kann im Raster, beispielsweise dreieckig oder quadratisch, erfolgen und auf die Kombination Untergrundeigenschaften - Verdichtungsgerät - Verdichtungsanforderung abgestimmt und optimiert werden. Erforderlichenfalls kann nach dem Abarbeiten des ersten Rasters noch in einem zusätzlichen Raster, insbesondere ein Sekundärraster in den Zwischenpunkten, zu verdichten sein.

[0029] Nach einer Verfahrensführung kann die Unwucht derart drehend angetrieben werden, dass eine Frequenz der Drehbewegung über einen Messzeitraum verändert wird, wobei die Schwingungsamplitude (A) des Tiefenrüttlers während des Messzeitraums ermittelt wird. Dabei wird der Frequenzbereich insbesondere so gewählt, dass zumindest über einen Teilbereich des Frequenzbereichs das Rüttlergehäuse und der umgebende Boden miteinander gekoppelt in Schwingung versetzt werden. Die Unwucht kann aus einem Stillstand drehend angetrieben werden, sodass die Frequenz der Drehbewegung von Null beginnend über den Messzeitraum gesteigert wird. Dabei kann die Frequenz über den Frequenzbereich insbesondere progressiv gesteigert werden. Diese Verfahrensführung kann im Rahmen der Bodenverbesserung in verschiedenen Tiefenlagen durchgeführt werden. Hierfür wird der eigentliche Bearbeitungsprozess gestoppt und anschließend die Unwucht in der beschriebenen Weise angetrieben. Dieses Verfahren kann auch als "Horchstopp" bezeichnet werden.

[0030] Das Ermitteln der Schwingungsamplitude während einer Veränderung der Frequenz der Drehbewegung der Unwucht führt vorteilhaft zu besonders genauen und verlässlichen Ergebnissen, da der Tiefenrüttler dabei vergleichbar mit einer Messsonde verwendet wird, indem ein Frequenzgang durchfahren wird. Die Bedingungen für eine Messung sind dabei besser als bei einem Verdichtungsbetrieb des Tiefenrüttlers. Die Schwingungsamplitude ist ein wesentlicher Parameter für eine Bewertung der Verdichtung des Bodens. Der Tiefenrüttler wird dabei insbesondere nicht ausschließlich für den beschriebenen Messvorgang in den Boden eingebracht. Vorteilhaft ist das erfindungsgemäße Verfahren während einer Verdichtung des Bodens mittels des Tiefenrüttlers anwendbar, beziehungsweise im Wechsel mit dem Verdichtungsvorgang durchführbar.

[0031] Nach einer weiteren Verfahrensführung kann ein Bodensteifigkeitswert (k) auf Basis zumindest der Schwingungsamplitude (A) und optional auch unter Berücksichtigung des Vorlaufwinkels (φ) berechnet werden. Der Vorlaufwinkel (φ) bezeichnet den Phasenwinkel, um welchen die Unwuchtmasse gegenüber der Messrichtung der Sensoren bei der Rüttelbewegung versetzt ist. In Ergänzung kann das die Bodensteifigkeit des Bodens repräsentierende Bodensteifigkeitssignal (k) auch unter Berücksichtigung der Masse (M) des Tiefenrüttlers berechnet werden. Alternativ oder in Ergänzung kann das Ermitteln des die Bodensteifigkeit des Bodens repräsentierenden Bodensteifigkeitssignals (k) unter Berücksichtigung eines die am Tiefenrüttler mitschwingende Bodenmasse repräsentierenden Bodenmassenkennwerts (ΔM) durchgeführt werden, insbesondere der modalen mitschwingenden Bodenmasse. Dieser die mitschwingende Bodenmasse repräsentierende Bodenmassenkennwert (ΔM) kann beispielsweise auf Basis der Unwucht ($m \cdot e$), der Schwingungsamplitude (A) und der Masse (M) des Tiefenrüttlers berechnet werden, wobei die Berechnung insbesondere zumindest näherungsweise gemäß der Formel:

$$\Delta M = \frac{m \cdot e}{A} - M$$

erfolgen kann.

[0032] Nach einer bevorzugten Verfahrensführung kann das Ermitteln des die Bodensteifigkeit des Bodens repräsentierenden Bodensteifigkeitssignals (k) auch unter Berücksichtigung der gemessenen Amplitude (A) und einer Vergleichsamplitude ($A\infty$) erfolgen. Als Vergleichsamplitude kann insbesondere die Amplitude des Rüttlers bei einer bestimmten Erregerfrequenz (ω) bei freier Schwingung verwendet werden. Um die Vergrößerungsfunktion (V) zu berechnen, kann die gemessene Schwingweg-Amplitude (A) auf die theoretische Amplitude ($A\infty$) bei theoretisch unendlich hoher Erregerfrequenz bezogen werden, das heißt

$$V = \frac{A}{A_\infty} = \frac{A \cdot (M + \Delta M)}{m \cdot e}$$

wobei M die modale Rüttlermasse, ΔM die modale mitschwingende Bodenmasse und m · e die Unwucht im Rüttler (Unwuchtmasse mal Exzentrizität) ist. Bei freier Schwingung beträgt der Vergrößerungsfaktor eins.

[0033] Nach einer möglichen Verfahrensführung kann die Ermittlung des die Bodensteifigkeit des Bodens repräsentierenden Bodensteifigkeitssignals (k) zumindest näherungsweise nach der Formel:

$$k = m \cdot e \cdot \omega^2 \cdot \left(\frac{1}{A_\infty} - \frac{1}{A} \cdot \frac{\text{sign}\,(\varphi - 90°)}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} \right)$$

berechnet werden, wobei

- A die Schwingungsamplitude des Tiefenrüttlers während des Verdichtens,
- $A\infty$ die Schwingungsamplitude des Tiefenrüttlers bei freier Schwingung, beziehungsweise bei gegen unendlich laufender Erregerfrequenz,
- F die Zentrifugalkraft,
- m die Unwuchtmasse,
- e die Exzentrizität der rotierenden Unwucht m zur Drehachse,
- ω die Winkelgeschwindigkeit der rotierenden Unwucht, und
- φ der Phasenvorlauf der rotierenden Unwucht m zur Masse M des Tiefenrüttlers,

sind. Mit dieser Formel wird auch der dynamische Anteil der schwingungsrelevanten Größen berücksichtigt. Es versteht sich jedoch, dass grundsätzlich auch andere Berechnungsmethoden für die Berechnung eines die Steifigkeit des Bodens repräsentierenden Steifigkeitssignals möglich sind. Beispielsweise kann eine Berechnung auch gemäß der nachstehenden Formel erfolgen:

$$k \approx \frac{m \cdot e \cdot \omega^2}{A}$$

[0034] Nach einer möglichen Verfahrensführung kann mit der Tiefenrüttleranordnung auch ein Crosshole-Test durchgeführt werden. Hierfür wird die Verdichtungstätigkeit kurzfristig unterbrochen. Ein beliebiger der Tiefenrüttler wird aktiv betrieben, und zumindest eine Teilzahl der anderen Tiefenrüttler wird passiv betrieben, wobei die passiv betriebenen Tiefenrüttler mittels ihrer Sensorik die Signale des aktiven Tiefenrüttlers erfassen, welche sie durch den dazwischenliegenden Boden erreichen.

[0035] Bevorzugte Ausführungsbeispiele werden nachstehend anhand der Zeichnungsfiguren erläutert. Hierin zeigt:

Figur 1 einen beispielhaften Tiefenrüttler, der für eine erfindungsgemäße Anordnung verwendbar ist;

Figur 2 eine erfindungsgemäße Tiefenrüttleranordnung zur Bodenverdichtung in einer ersten Ausführungsform mit zwei Tiefenrüttlern in Schnittdarstellung;

Figur 3A die Tiefenrüttleranordnung gemäß Figur 2 während des Betriebs in einer ersten Betriebsweise;

Figur 3B die Tiefenrüttleranordnung in der Betriebsweise gemäß Figur 3A nach einer Viertel Periode beziehungsweise 90° Verdrehung;

Figur 4A die Tiefenrüttleranordnung gemäß Figur 2 während des Betriebs in einer zweiten Betriebsweise;

Figur 4B die Tiefenrüttleranordnung in der Betriebsweise gemäß Figur 4A nach einer Viertel Periode beziehungsweise 90° Verdrehung;

Figur 5A die Tiefenrüttleranordnung gemäß Figur 2 während des Betriebs in einer dritten Betriebsweise;

Figur 5B die Tiefenrüttleranordnung in der Betriebsweise gemäß Figur 5A nach einer Viertel Periode beziehungsweise 90° Verdrehung;

Figur 6A die Tiefenrüttleranordnung gemäß Figur 2 während des Betriebs in einer vierten Betriebsweise;

Figur 6B die Tiefenrüttleranordnung in der Betriebsweise gemäß Figur 6A nach einer Viertel Periode;

Figur 7A eine erfindungsgemäße Tiefenrüttleranordnung zur Bodenverdichtung in einer zweiten Ausführungsform mit vier Tiefenrüttlern schematisch in Draufsicht in einer ersten Betriebsweise;

Figur 7B die Tiefenrüttleranordnung aus Figur 7A schematisch im Längsschnitt beziehungsweise Seitenansicht;

Figur 8A zum Vergleich einen einzigen Tiefenrüttler zur Bodenverdichtung schematisch in Draufsicht;

Figur 8B den Tiefenrüttler aus Figur 8A schematisch im Längsschnitt beziehungsweise Seitenansicht;

Figur 9A die Tiefenrüttleranordnung gemäß Figur 7A in einer ersten Betriebsweise;

Figur 9B die Tiefenrüttleranordnung aus Figur 9A nach einer Viertel Periode;

Figur 10A die Tiefenrüttleranordnung gemäß Figur 7A in einer zweiten Betriebsweise;

Figur 10B die Tiefenrüttleranordnung aus Figur 10A nach einer Viertel Periode;

Figur 11A die Tiefenrüttleranordnung gemäß Figur 7A in einer dritten Betriebsweise;

Figur 11B die Tiefenrüttleranordnung aus Figur 11A nach einer Viertel Periode;

Figur 12A die Tiefenrüttleranordnung gemäß Figur 7A in einer vierten Betriebsweise;

Figur 12B die Tiefenrüttleranordnung aus Figur 12A nach einer Viertel Periode;

Figur 13A die Tiefenrüttleranordnung gemäß Figur 7A in einer fünften Betriebsweise;

Figur 13B die Tiefenrüttleranordnung aus Figur 13A nach einer Viertel Periode;

Figur 14A die Tiefenrüttleranordnung gemäß Figur 7A in einer sechsten Betriebsweise;

Figur 14B die Tiefenrüttleranordnung aus Figur 14A nach einer Viertel Periode;

Figur 15 einen Tiefenrüttler der Tiefenrüttleranordnung gemäß Figur 2 während des Betriebs in einer weiteren Betriebsweise;

Figur 16 die Tiefenrüttleranordnung gemäß Figur 2 während des Betriebs in einer weiteren Betriebsweise;

Figur 17A schematisch einen Schnitt durch den Rüttler in der Erregerebene im Nullversuch, frei in der Luft hängend;

Figur 17B schematisch einen Schnitt durch den Rüttler in der Erregerebene bei der Verdichtung im Boden; und

Figur 18 schematisch den geometrischen Zusammenhang von Kraft und Auslenkung zur Bestimmung der Größe und Lage der Bodenreaktionskraft.

[0036] Die Figuren 1 und 2 werden nachstehend gemeinsam beschrieben. Ein Tiefenrüttler 2 dient zum Verdichten von Boden mittels einer Unwucht. Als Unwucht wird ein rotierender Körper 3 verstanden, dessen Masse nicht rotationssymmetrisch verteilt ist. Die Massenträgheitsachse des Massekörpers 3 ist gegenüber der Rotationsachse B versetzt, so dass die Unwucht beim Rotieren Schwingungen erzeugt, mit denen das Erdreich und mögliches Zugabematerial Z verdichtet wird. Das Verfahren der Rütteldruckverdichtung beruht auf dem Effekt, dass durch die Vibration des Tiefenrüttlers 2 die Reibung zwischen den Bodenkörnern kurzzeitig aufgehoben wird und vorhandene Porenräume infolge der Schwerkraft nahezu bis zur dichtesten Lagerung zufallen. Je nach Bodenbeschaffenheit und Verdichtungsaufwand tritt dabei eine Volumenverminderung ein.

[0037] Ein für die erfindungsgemäße geeigneter Tiefenrüttler 2 umfasst als wesentliche Bestandteile den rotierend antreibbaren Massekörper 3, der in einem Rüttlergehäuse 4 um die Drehachse B drehend antreibbar ist. Der Massekörper 3 kann von einem Drehantrieb 5, beispielsweise einem Elektromotor, über eine Antriebswelle 16 angetrieben werden. Ein die Lage der Unwucht 3 repräsentierendes Lagesignal kann mittels eines entsprechenden Sensors 6 erfasst werden.

[0038] Der Tiefenrüttler 2 kann über eine elastische Kupplung 7 an einem Gestänge 8 aufgehängt werden. Das Versenken und/oder das Verdichten kann optional durch eine oder mehrere Wasserspülungen 9, 10 über in dem Gestänge 8 integrierte Leitungen 11 erleichtert werden. Der Wasserdurchfluss und/oder der Wasserdruck können gegebenenfalls mittels entsprechender Sensoren 12 gemessen und danach gesteuert werden.

[0039] Es können erste Beschleunigungsaufnehmer 13 in einer ersten Ebene E13 des Tiefenrüttlers 2 vorgesehen, insbesondere oberhalb der Unwucht 3, und zweite Beschleunigungsaufnehmer 14 in einer zweiten Ebene E14, insbesondere unterhalb der Unwucht 3. Die Beschleunigungsaufnehmer 13, 14 dienen zur Messung der Beschleunigung des Tiefenrüttlers 2 während des Rüttelvorgangs. Aus bidirektionalen Beschleunigungsmessungen in zwei Ebenen E13, E14 des Rüttlers 2 kann das horizontale Bewegungsverhalten an beliebigen Stellen des Rüttlers, beispielsweise an der Spitze 15 oder in der Lage der Anregung durch die Unwucht 3 ermittelt werden. Dabei gilt insbesondere, dass der Schwingweg an der Rüttlerspitze 15 der doppelten Schwingweg-Amplitude entspricht.

[0040] Es können ferner Kraftsensoren 19 zum Erfassen der Aufhängekraft des Rüttlers 2 beziehungsweise zur Bestimmung des Spitzendruckes des Rüttlers vorgesehen sein. Außerdem kann zumindest ein Sensor (nicht dargestellt) zur Messung der Eindringtiefe T des Tiefenrüttlers 2 vorgesehen sein. Optional kann der Tiefenrüttler 2 auch Flügel aufweisen.

[0041] Figur 2 zeigt eine erfindungsgemäße Anordnung mit zwei Tiefenrüttlern 2, die jeweils eine in einem Rüttlergehäuse 4 von einem Drehantrieb 5 drehend antreibbare Unwucht 3 sowie mindestens einen Bewegungssensor aufweisen, der ausgestaltet ist, um ein die Bewegung des jeweiligen Tiefenrüttlers repräsentierendes Bewegungssignal zu erfassen. Es ist ferner eine Steuerungselektronik 21 vorgesehen, an welche die Bewegungssignale der Tiefenrüttler 2 weitergegeben werden. Die Steuerungselektronik 21 steuert die Drehantriebe 5 der Tiefenrüttler 2 derart an, dass deren Bewegungen zusammenwirkend aufeinander abgestimmt sind. Optional kann einer oder beide der Tiefenrüttler auch jede weitere Ausgestaltung aufweisen, die im Zusammenhang mit Figur 1 beschrieben sind.

[0042] Beispielsweises können mehrere Beschleunigungssensoren 13, 14 in verschiedenen Ebenen E13, E14 am Tiefenrüttler angebracht sein. Aus bidirektionalen Beschleunigungsmessungen in zwei Ebenen eines Rüttlers kann das horizontale Bewegungsverhalten an beliebigen Stellen des Rüttlers, beispielsweise an der Spitze oder der Lage der Unwuchtanregung ermittelt werden.

[0043] Die beiden Tiefenrüttler 2 werden vorzugsweise so betrieben, dass sie für die Synchronisation Leistungsreserven haben. Die Tiefenrüttler 2 können von der Steuerungselektronik 21 beispielsweise so gesteuert werden, dass - abhängig von den Bewegungssignalen beider Tiefenrüttler - der Drehantrieb 5 einer der beiden Tiefenrüttler 2 primär gesteuert wird, während der Drehantrieb 3 es anderen der Tiefenrüttlers 2 sekundär gesteuert wird. Dabei wird die Drehbewegung des sekundär gesteuerten Drehantriebs 5 auf die Drehbewegung des primär gesteuerten Drehantriebs zusammenwirkend abgestimmt, insbesondere synchron, was eine gleiche Bewegungsgeschwindigkeit und/oder Auslenkung der beiden Tiefenrüttler miteinschließt. Durch die synchronisierte Bewegung der beiden Tiefenrüttler 2 wird das Material verdichtet, wobei die Materialbewegung U mit durchgezogenen Pfeilen dargestellt ist. Die Materialbewegung bildet einen Setzungstrichter. Ein durch das Verdichten entstehender Raum kann durch Zugabematerial Z aufgefüllt werden. Mit gestrichelten Pfeilen ist die Bewegung einer optionalen Wasserspülung S dargestellt.

[0044] Der primäre Tiefenrüttler 2 kann auch als "Master" bezeichnet werden, während der andere Tiefenrüttler im abhängigen Modus betrieben wird, was auch als "Slave"-Betrieb bezeichnet werden kann. Dabei folgt die Bewegung des im "Slave"-Betrieb geregelten Tiefenrüttlers 2 der Bewegung des als "Master" betriebenen Rüttlers. Die Steuerungselektronik 21 kann mittels eines Algorithmus denjenigen Rüttler, dessen Leistungsreserven erschöpft sind, zum "Master" machen und entsprechend steuern, dem dann der andere Rüttler, welcher noch Leistungsreserven hat, regelungstech-

nisch nachläuft.

[0045] Die Steuerungselektronik 21 ist ausgestaltet, um die Anordnung 1 von Tiefenrüttlern 2 in verschiedenen Betriebsmodi zu regeln.

[0046] Eine erste Betriebsweise ist in den Figuren 3A und 3B gezeigt, wobei die Figur 3B die Rüttler gegenüber der Position aus Figur 3A nach einer viertel Periode, das heißt mit um 90° verdrehten Rüttlern zeigt. Kennzeichnendes Merkmal dieser Betriebsweise ist, dass beide Tiefenrüttler 2 mit der gleichen Drehrichtung R1, der gleichen Phasenlage P1 und der gleichen Winkelgeschwindigkeit betrieben beziehungsweise geregelt werden. Diese Betriebsweise ähnelt damit der eines Großrüttlers, welcher einen einzigen Rüttler mit größerer Leistung aufweist, und kann auch entsprechend als Betriebsweise "Großrüttler" bezeichnet werden. In der gezeigten Betriebsweise sind die Rüttlerbewegungen (bzw. Anregungen) so synchronisiert, dass es zu einer gemeinsamen Parallelverschiebung der gesamten Gruppe kommt. Die beiden Rüttler schwingen dabei immer in dieselbe Richtung. Mit gestrichelter Linie ist die Form F1 der verschobenen beziehungsweise verzerrten Gruppenanordnung gezeigt. Die gepunktete Linie zeigt die entgegengesetzte Form F2 der verschobenen beziehungsweise verzerrten Gruppenanordnung. Der gestrichelte Pfeil G repräsentiert die gesamte kreisförmige Translationsverschiebung der Anordnung 1.

[0047] Eine zweite Betriebsweise ist in den Figuren 4A und 4B gezeigt, wobei die Figur 4B die Tiefenrüttler 2 gegenüber der Position aus Figur 4A nach einer viertel Periode, das heißt mit um 90° verdrehten Rüttlern zeigt. Kennzeichnendes Merkmal dieser Betriebsweise ist, dass die beiden Tiefenrüttler 2 mit der gleichen Drehrichtung R1, der gleichen Winkelgeschwindigkeit, jedoch mit um 180° gegeneinander versetzten Phasenlagen P1, P2 angetrieben beziehungsweise geregelt werden. Diese Betriebsweise kann auch als "Kompression und Oszillation" bezeichnet werden. Dabei werden die in gleicher Drehrichtung laufenden Unwuchten 3 der Tiefenrüttler 2 derart synchronisiert, dass die Horizontalkräfte auf den Boden einander weitgehend egalisieren und insgesamt ein dynamisches Torsionsmoment um die Vertikalachse A entsteht. Bei Betrieb wird das sich um die Vertikalachse dynamisch abwechselnd im und gegen den Uhrzeigersinn drehende (oszillierende) Muster auch zyklisch abwechselnd kleiner und größer (Kompression und Expansion). Dies ist durch den gestrichelten Pfeil G dargestellt. Außerhalb des umgebenden Bereiches werden durch das Oszillieren Schubverzerrungen erzeugt, die der Verdichtung dienen. Auch hier sind mit gestrichelter Linie die Form F1 der verschobenen beziehungsweise verzerrten Gruppenanordnung, und mit gepunkteter Linie die entgegengesetzte Form F2 der verschobenen beziehungsweise verzerrten Gruppenanordnung gezeigt. Die globale Wirkung ist oszillierend; die lokale Wirkung komprimierend.

[0048] Eine dritte Betriebsweise ist in den Figuren 5A und 5B gezeigt, wobei die Figur 5B die Tiefenrüttler 2 gegenüber der Position aus Figur 5A nach einer viertel Periode, das heißt mit um 90° verdrehten Rüttlern zeigt. Kennzeichnendes Merkmal dieser Betriebsweise ist, dass die Drehbewegungen der beiden Tiefenrüttler 2 ausgehend von einer gleichen Phasenlage P1 in einer durch die Längsachsen B der Tiefenrüttler 2 aufgespannten Bezugsebene EB mit entgegengesetzten Drehrichtungen R1, R2 und der gleichen Winkelgeschwindigkeit gesteuert werden. Diese Betriebsweise kann auch als "Richtschwinger mit Oszillation" bezeichnet werden. Es ergibt sich insgesamt die globale Wirkung eines Richtschwingers in der Ebene EB mit Torsionsmoment um die Vertikalachse A, wie sie mit gestrichelten Pfeilen G1, G2 dargestellt ist.

[0049] Eine vierte Betriebsweise ist in den Figuren 6A und 6B gezeigt, wobei die Figur 6B die Tiefenrüttler 2 gegenüber der Position aus Figur 6A nach einer viertel Periode, das heißt mit um 90° verdrehten Rüttlern zeigt. Kennzeichnendes Merkmal dieser Betriebsweise ist, dass die Drehbewegungen der beiden Tiefenrüttler 2 ausgehend von einer untereinander gleichen Phasenlage P1 senkrecht zu einer durch die Längsachsen B der Tiefenrüttler 2 aufgespannten Bezugsebene EB mit entgegengesetzten Drehrichtungen R1, R2 und der gleichen Winkelgeschwindigkeit zu steuern. Die gestrichelte Linie zeigt die Form F1 der verschobenen beziehungsweise verzerrten Gruppenanordnung, während die gepunktete Linie die entgegengesetzte Form F2 der verschobenen beziehungsweise verzerrten Gruppenanordnung zeigt. Es ergibt sich insgesamt die globale Wirkweise eines Richtschwingers, mit lokal komprimierender Wirkung. Die globale Wirkung als Richtschwinger, welche sich in der Ebene ES ergibt, ist mit gestricheltem Pfeil G dargestellt.

[0050] In den Figuren 7A, 7B zu 8A, 8B ist der Vergleich zwischen einem großem Einzelrüttler 102 und einer Anordnung 1 von Tiefenrüttlern 2 in Draufsicht bzw. Seitenansicht dargestellt.

[0051] Beim Einzelrüttler gemäß den Figuren 8A, 8B ist zu erkennen, dass die Bewegung des Spitzenwassers S im Ringspalt zum verdichteten Boden entgegengesetzt zum Materialtransport im Setzungstrichter U in Richtung Rüttlerspitze 15 erfolgt und diesen dadurch hemmt. Die Bewegungsrichtung des Spitzenwassers S ist mit gestrichelten Pfeilen dargestellt; die des Materials mit durchgezogenen Pfeilen. So wird ein kontinuierlicher Nachschub von Material zur Rüttlerspitze 15, dem Ort der Bodenverdichtung, verhindert.

[0052] In den Figuren 7A und 7B sind die Verhältnisse in der erfindungsgemäßen Rüttleranordnung 1 dargestellt. Durch das gemeinsame Bearbeiten des umschlossenen Bereiches wird das dortige Material mobilisiert und kann seitlich kontinuierlich zur Rüttlerspitze 15 nachfließen, um dort für ausreichenden Nachschub zur Verfügung zu stehen. Wird die Gruppe im Zusammenwirken gesehen, so findet in dem zwischen den Rüttlern liegenden Bereich 23 ein nach unten fließender Materialtransport statt, was durch die Pfeile mit durchgezogener Linie gezeigt ist.

[0053] In den Figuren 9 bis 14 ist eine erfindungsgemäße Rüttleranordnung 1 in einer zweiten Ausführungsform mit

vier Tiefenrüttlern 2 gezeigt. Aufbau und Funktionsweise dieser Ausführungsform entspricht weitestgehend denjenigen gemäß den Figuren 2 bis 7, so dass hinsichtlich der Gemeinsamkeiten auf die obige Beschreibung Bezug genommen wird. Dabei sind gleiche beziehungsweise einander entsprechende Einzelheiten mit denselben Bezugszeichen versehen, wie in den Figuren 2 bis 7.

[0054] Auch bei den in den Figuren 9 bis 14 gezeigten Anordnungen 1 gilt, dass diese in unterschiedlichen Betriebsmodi betrieben, beziehungsweise geregelt werden können.

[0055] Der in den Figuren 9A und 9B für vier Rüttler gezeigte Betriebsmodus entspricht dem in den Figuren 3A und 3B gezeigten Betriebsmodus für zwei Rüttler. In Figur 9B sind die Rüttler gegenüber der Position aus Figur 9A nach einer viertel Periode, das heißt mit um 90° verdreht dargestellt. Die vier Tiefenrüttler 2 werden mit der gleichen Drehrichtung R1, der gleichen Phasenlage P1 und der gleichen Winkelgeschwindigkeit betrieben beziehungsweise geregelt. In dieser Betriebsweise sind die Rüttlerbewegungen (bzw. Anregungen) so synchronisiert, dass es zu einer gemeinsamen Parallelverschiebung der gesamten Gruppe von Rüttlern kommt ("Großrüttler"). Die sich ergebende globale kreisförmige Translationsverschiebung ist mit Pfeilen G dargestellt.

[0056] In den Figuren 10A und 10B ist ein weiterer Betriebsmodus für eine Anordnung 1 mit vier Tiefenrüttlern 2 gezeigt. In Figur 10B sind die Rüttler gegenüber der Position aus Figur 10A nach einer viertel Periode, das heißt mit um 90° verdreht dargestellt. Kennzeichnendes Merkmal dieser Betriebsweise ist, dass alle Rüttler in der gleichen Drehrichtung R1 derart synchronisiert werden, dass sich die Rüttler einer Diagonale D1 zueinander bewegen, während sich die Rüttler der anderen Diagonale D2 auseinander bewegen. Dies geschieht wechselweise zyklisch durch die dynamische Anregung. Lo"al wird der Bodenbereich zwischen den Rüttlern dadurch dynamischen Schubverzerrungen unterworfen, wie die gestrichelten beziehungswiese gepunkteten Linien erkennen lassen. Diese Betriebsweise kann insofern auch als "Schubverzerrung" bezeichnet werden. Dabei führen die Schubverzerrungen hoch effektiv zur Mobilisierung und Verdichtung. Global egalisieren einander die Horizontalkräfte der Rüttler auf den Boden, weshalb eine geringere Reichweite, verglichen mit der Betriebsweise "Großrüttler" gemäß den Figuren 9A und 9B gegeben ist. Die Erschütterung der Umgebung wird minimiert, die eingesetzte Energie steht der konzentrierten lokalen Bodenverdichtung und -mobilisierung zur Verfügung. Bei Böden, bei denen das Eigenverdichtungspotential schwer mobilisierbar ist (leichte Verkittung, lange Liegezeit, oder scheinbare Kohäsion), ist die Betriebsweise "Schubverzerrung" daher besonders gut geeignet. Auch für die Penetration, bei der eine weitreichende Verdichtung noch nicht erwünscht ist, ist dieser Betriebsmodus gegebenenfalls geeignet.

[0057] In den Figuren 11A und 11B ist ein weiterer Betriebsmodus für eine Anordnung 1 mit vier Tiefenrüttlern 2 gezeigt. In Figur 11B sind die Rüttler gegenüber der Position aus Figur 11A nach einer viertel Periode, das heißt mit um 90° verdreht dargestellt. Kennzeichnendes Merkmal dieser Betriebsweise ist, dass alle Tiefenrüttler 2 in gleicher Drehrichtung R1 angetrieben werden, wobei die Unwuchten 3 der Tiefenrüttler von der Steuerungselektronik 21 so synchronisiert werden, dass die Horizontalkräfte auf den Boden einander weitgehend egalisieren und global ein dynamisches Torsionsmoment um die Vertikalachse entsteht, was anhand der gestrichelten Pfeile G erkennbar ist. Die verformten Formen F1, F2, welche als gestrichelte und gepunktete Linien dargestellt sind, stellen immer Quadrate dar. Hieran ist erkennbar, dass im umschlossenen Bereich keine Schubverzerrungen wirksam werden, sondern dass sich um die Vertikalachse dynamisch abwechselnd im und gegen den Uhrzeigersinn drehende (oszillierende) Quadrat wird auch zyklisch abwechselnd kleiner und größer (Kompression und Expansion). Insofern kann diese Betriebsweise auch als "Oszillation mit Kompression" bezeichnet werden. Außerhalb des umschlossenen Bereiches werden durch das Oszillieren Schubverzerrungen erzeugt, die der Verdichtung dienen. Die Erschütterung der Umgebung ist nicht mehr so gering wie in der Betriebsweise "Schubverzerrung" (Figuren 10A, 10B), jedoch deutlich unter jener im Betrieb als Großrüttler" (Figuren 9A, 9B).

[0058] Sämtliche Betriebsformen mit in einheitlicher Drehrichtung laufenden Unwuchten (Figuren 9 bis 11) lassen sich ohne Unterbrechung des Betriebes gleitend ineinander überführen, sodass während des Betriebes zwischen den Betriebsweisen "Großrüttler", "Schubverzerrung" und "Oszillation mit Kompression" wahlweise umgeschaltet werden kann. Gleiches gilt auch bei diagonalweise unterschiedlicher Drehrichtung (Figuren 12 bis 14). Sämtliche Betriebsformen können auch in entgegengesetzter Drehrichtung betrieben werden, sodass bei der Verwendung von Rüttlern mit Umschlaggewicht zwischen zwei unterschiedlichen Exzentrizitäten der Anregung gewählt werden kann.

[0059] In den Figuren 12A und 12B ist ein weiterer Betriebsmodus für eine Anordnung 1 mit vier Tiefenrüttlern 2 gezeigt. In Figur 12B sind die Rüttler gegenüber der Position aus Figur 12A nach einer viertel Periode, das heißt mit um 90° verdreht dargestellt. Kennzeichnendes Merkmal dieser Betriebsweise ist, dass die Unwuchten 3 der Tiefenrüttler 2 diagonalweise (D1, D2) in unterschiedlicher Drehrichtung R1, R2 betrieben werden. Die Unwuchten 3 können mittels der Steuerungselektronik 21 dabei so synchronisiert werden, dass sie in der Betriebsweise "Richtschwinger" arbeiten, wobei die globale Schwingrichtung, in die alle Rüttler phasengleich wirken, frei eingestellt werden kann. Quer dazu egalisieren einander die Kräfte auf den Boden, sodass nur lokale Schubverzerrungen (Figur 12B) stattfinden. Um eine gleichmäßige Reichweite der Verdichtung um die Gruppe zu erreichen, kann die globale Schwingrichtung stufenlos rotiert werden, wobei bei jedem Verdichtungsschritt zumindest eine halbe Umdrehung (oder ein ganzzahliges Vielfaches davon) bewerkstelligt werden sollte. Die vorliegende Betriebsweise kann auch als "Richtschwinger mit Kompression"

bezeichnet werden. Die globale Schwingungsbewegung ist als gestrichelter Pfeil G dargestellt.

[0060] In den Figuren 13A und 13B ist ein weiterer Betriebsmodus für eine Anordnung 1 mit vier Tiefenrüttlern 2 gezeigt. In Figur 13B sind die Rüttler gegenüber der Position aus Figur 13A nach einer viertel Periode, das heißt mit um 90° verdreht dargestellt. Kennzeichnendes Merkmal dieser Betriebsweise ist, dass die Unwuchten 3 der Tiefenrüttler 2 diagonalweise (D1, D2) in unterschiedlicher Drehrichtung R1, R2 derart betrieben werden, dass sich die Kräfte auf den Boden lokal egalisieren, und dabei lokale Schubverzerrungen hervorrufen, und nur ein residuales globales Torsionsmoment (dynamisches Oszillationsmoment um die Vertikalachse) verbleibt. Die Schubverformungen werden in dieser Betriebsweise großflächig maximiert, da sie sowohl die lokalen Schubverzerrungen als auch die globale Oszillationsbewegung hervorgerufen werden. Für Böden, die mittels dynamischer Schubverformungen optimal zu verdichten bzw. zu mobilisieren sind, ist die Betriebsweise "Oszillation mit Schubverzerrung" ideal anwendbar. Die globale Torsionsbewegung ist durch gestrichelte Pfeile G dargestellt.

[0061] In den Figuren 14A und 14B ist ein weiterer Betriebsmodus für eine Anordnung 1 mit vier Tiefenrüttlern 2 gezeigt. In Figur 14B sind die Rüttler gegenüber der Position aus Figur 14A nach einer viertel Periode, das heißt mit um 90° verdreht dargestellt. Kennzeichnendes Merkmal dieser Betriebsweise ist, dass die Unwuchten 3 der Tiefenrüttler 2 diagonalweise (D1, D2) in unterschiedlicher Drehrichtung R1, R2 angetrieben werden. Die Kräfte auf den Boden egalisieren einander weitgehend oder komplett, sodass durch die fehlende globale Wirkung auf den Boden, die Erschütterung der Umgebung minimiert wird und die eingebrachte Energie primär der lokalen Verdichtung und Mobilisierung zur Verfügung steht. Diese geschieht durch eine Kombination von dynamischen Schubverzerrungen, welche mit der Kompressions- und Expansionsbewegung abgewechselt wird. Diese Betriebsweise kann auch als "Schubverzerrung mit Kompression" bezeichnet werden.

[0062] Sämtliche Betriebsformen mit diagonalweise in unterschiedlicher Drehrichtung laufenden Unwuchten (Figuren 12 bis 14) lassen sich ohne Unterbrechung des Betriebes gleitend ineinander überführen, sodass während des Betriebes zwischen den Betriebsweisen "Richtschwinger", "Oszillation mit Schubverzerrung" und "Schubverzerrung mit Kompression" wahlweise umgeschaltet werden kann. Sämtliche Betriebsformen können auch in entgegengesetzter Drehrichtung betrieben werden, sodass bei der Verwendung von Rüttlern mit Umschlaggewicht zwischen zwei unterschiedlichen Exzentrizitäten der Anregung gewählt werden kann, wobei die diagonalweise unterschiedliche Drehrichtung R1, R2 in der Konstruktion der Umschlagunwucht Berücksichtigung finden müsste, wenn das Mischen kleiner und großer Exzentrizitäten vermieden werden soll.

[0063] Mit dem synchronisierten Betrieb von Rüttlergruppen stehen somit zahlreiche Möglichkeiten zur Verfügung, um flexibel auf die Untergrundeigenschaften reagieren zu können und die Verdichtungsaufgabe unter den gegebenen Randbedingungen optimal zu erfüllen. Bei der Verwendung von Tiefenrüttlern 2 mit Umschlaggewicht, werden die Betriebsweisen mit einheitlicher Drehrichtung "Großrüttler", "Schubverzerrung" und "Oszillation mit Kompression" zu bevorzugen sein, will man nicht diagonalweise unterschiedliche Rüttler einsetzen oder große und kleine Exzentrizität mischen.

[0064] Die erfindungsgemäße Anordnung 1 erlaubt auch eine Nutzung der Sensorik für geotechnische Messungen.

[0065] Eine auch als "Horchstopp" bezeichenbare geotechnischen Messung ist schematisch in Figur 15 gezeigt. Während des Verdichtungsprozesses kommt es in der Kontaktzone zu einer teilweisen Entkoppelung des Tiefenrüttlers 2 und des Bodens, sodass die an den Rüttlern gemessenen Amplituden A unterschiedlich von jenen Schwingungsamplituden sind, die im verdichteten Boden (im Kontaktbereich) auftreten. Deshalb ist während des Eindringens beziehungsweise während der Verdichtung mit den oben angegebenen Formeln nur eine zustandsabhängige Bodenreaktion bestimmbar. Um diesbezüglich klare Verhältnisse zu schaffen ist es möglich, sowohl beim Eindringen in den Boden als auch beim anschließenden Verdichtungsprozess in definierten Tiefenstufen T den Vorgang zu unterbrechen (entweder mit voller vertikaler Spitzenbelastung oder vom Trägergerät gehalten) und die Unwucht 3 mit geringer Kreisfrequenz ω laufen zu lassen. Dabei reicht die dynamische Anregung vorerst nicht aus, eine Eindringung oder eine Verdichtung zu bewirken, der Tiefenrüttler 2 steckt im Boden fest und die die am Rüttler gemessenen Amplituden A stimmen mit den Schwingungsamplituden des Bodens im Kontaktbereich überein.

[0066] Die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit *k* kann vereinfachend mit der folgenden Näherungsformel berechnet werden:

$$k \approx (m \cdot e \cdot \omega^2)/A$$

[0067] Die Erregerkreisfrequenz ω kann in einem gleitenden Frequenzgang sukzessive erhöht werden, sodass die gemessenen, vorerst konstanten Bodensteifigkeitsverhältnisse sich in dem Augenblick deutlich zu verändern beginnen, in dem der Rüttler wieder beginnt, als Verdichtungsgerät wirksam zu werden.

[0068] Der Test kann im Falle von Umschlaggewichten mit großer oder kleiner Exzentrizität ($m \cdot e$) durchgeführt werden und mit einem Einzelrüttler erfolgen oder die Rüttleranordnung 1 als Einheit herangezogen werden. Im letzteren Fall muss die Synchronisation, bevorzugt in der Betriebsweise "Großrüttler", über die Position der Unwucht erfolgen,

da sich die vorerst minimalen Rüttlerbewegungen nicht zur Synchronisation eignen.

[0069] Eine weitere geotechnischen Messung ist schematisch in Figur 16 gezeigt, die auch als "Crosshole"-Test bezeichnet werden kann. Bei der Durchführung des "Crosshole"-Tests befinden sich mehrere der Tiefenrüttler 2 in der gleichen Tiefenstufe T im Boden. Die Verdichtungstätigkeit wird kurzfristig unterbrochen und ein beliebiger Rüttler zum "aktiven Rüttler" (Figur 16, linker Rüttler) bestimmt. Die restlichen Rüttler 2' (Figur 16, rechter Rüttler sowie ggf. weitere Rüttler außerhalb der Zeichenebene) verhalten sich passiv und registrieren mittels ihrer Sensorik die Signale vom aktiven Rüttler, welche sie durch den dazwischenliegenden Boden erreichen. Zur Steigerung der Messgenauigkeit kann der Versuch oftmals, mit Wechsel des "aktiven Rüttlers" reihum, durchgeführt werden.

[0070] Durch die fixierte bzw. bekannte Distanz A der Haltepunkte und die durch die Sensorik bekannte Neigung N der Tiefenrüttler 2, sind auch in der Tiefe T die Distanzen W der Rüttler untereinander bekannt.

[0071] Werden durch den aktiven Rüttler Signale (Erschütterungen) an den Boden abgegeben, so durchlaufen diese den Boden über die bekannten Distanzen W zu den passiven Rüttlern. Die Signale können homogen (rotierende Unwucht) oder impulsförmig (z.B. Umschlagen der Unwucht) sein. Über die Laufzeiten der verschiedenen Wellenarten und die bekannten Distanzen sind die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Wellenarten im Boden zwischen den Rüttlern bekannt. Für die Kompressionswelle (P-Welle) und die Scherwelle (S-Welle) können die Bodensteifigkeiten mit folgenden Formeln berechnet werden:

$$v_p = \sqrt{E_s/\rho} \quad v_s = \sqrt{G/\rho}$$

wobei v_p die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Kompressionswelle und v_s jene der Scherwelle, E_s der Steifemodul des Bodens, G dessen Schubmodul sowie ρ dessen Dichte sind.

[0072] Steifemodul E_s und Schubmodul G eignen sich zur Beschreibung der Bodensteifigkeit, welche im Zuge der Verdichtung signifikant ansteigt. Unterhalb des Grundwassers ist das Schubmodul aussagekräftiger, da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Kompressionswelle wesentlich vom Wassergehalt beeinflusst wird.

[0073] In den Figuren 17A und 17B ist ferner der geometrische Zusammenhang zur Regelung der Prozessparameter bei der Verdichtung dargestellt.

[0074] Die Regelung der Prozessparameter (Frequenz, Unwucht, Wasserzugabe, Spitzendruck, etc.) zwecks Optimierung des Verdichtungserfolges kann mit einem Regelkriterium erfolgen, welches auf dem Nachlaufwinkel der Bodenreaktionskraft basiert und sowohl für den einzelnen Rüttler als auch für die synchronisierte Anwendung mehrerer Tiefenrüttler geeignet ist.

[0075] Der Regelung liegt folgende Erwägung zugrunde: Schwingt der Tiefenrüttler 2 in der Luft ("Nullversuch"), wie in Figur 17A gezeigt, so wirkt nur die Zentrifugalkraft der Unwucht und keine äußeren Kräfte auf den Rüttler und die Bewegung entspricht der Rotation um den gemeinsamen Schwerpunkt (von Unwucht und Rüttler), weshalb die Auslenkung des Rüttlers genau in entgegengesetzter Richtung zur Position der Unwucht ist (Vorlaufwinkel der Erregerkraft φ = 180°). Die Größe der Auslenkung im Nullversuch (A_∞) lässt sich messen und wird für die weitere Auswertung benötigt. Bei der Verdichtung im Boden, wie in Figur 17B gezeigt, hat die gemessene Auslenkung eine andere Größe (A) und Richtung (φ) in Bezug auf die Zentrifugalkraft (F_e) der Unwucht. Der Grund dafür sind die auf den Boden übertragenen Kräfte, welche sich zu einer entgegengesetzt gerichteten resultierenden Bodenreaktionskraft (F_b) auf den Rüttler zusammenfassen lassen.

[0076] Die Größe und Richtung der resultierenden Bodenreaktionskraft (F_b) kann berechnet werden, wie nachstehend anhand Figur 18 beschrieben.

[0077] Figur 18 zeigt den geometrischen Zusammenhang der Vektoraddition für die Kräfte und die zugehörigen Auslenkungen für den Fall mit einem Freiheitsgrad. Dieser Fall tritt dann ein, wenn auf einen ausgewogenen Rüttler die Bodenreaktionskraft etwa in der Ebene der Anregung angreift, was in der Praxis in der Regel gegeben ist. Bestimmt wird jene Bodenreaktionskraft (Größe und Richtung), welche erforderlich ist, um die bei der Bodenverdichtung gemessene Auslenkung (Größe und Richtung) hervorzurufen. Aus diesem geometrischen Zusammenhang lässt sich die auf die Erregerkraft (F_e) bezogene Bodenreaktionskraft (F_b) mit folgender Formel ermitteln:

$$\frac{F_b}{F_e} = \sqrt{[sin(180° - \varphi)]^2 + \left[cos(180° - \varphi) - \frac{A}{A_\infty}\right]^2}$$

[0078] Der Nachlaufwinkel der Bodenreaktionskraft ($\varphi_{b,eff}$) auf den Rüttler ergibt sich zu:

$$\varphi_{b,eff} = 90° - atan\left[\frac{cos(180° - \varphi) - \frac{A}{A_\infty}}{sin(180° - \varphi)}\right]$$

[0079] Da die Kraft auf den Boden entgegengesetzt wirkt, ist der Vorlaufwinkel der Erregerkraft ($\varphi_{b,err}$) auf den Boden:

$$\varphi_{b,err} = 180° - \varphi_{b,eff}$$

[0080] Dieser Wert dient erfindungsgemäß zur Regelung der Prozessparameter (Frequenz, Unwucht, Wasserzugabe, Spitzendruck, etc.) und sollte bei Erreichen der Eigenfrequenz der Bodenreaktionskraft theoretisch den Wert 90° annehmen. Aufgrund bodenmechanischer Phänomene im Kontaktbereich Rüttler-Boden (fluidisierte Zone, vertikal nachströmendes Bodenmaterial, etc.) kann der Zielwert der Regelung für optimale Bodenverdichtung jedoch von dem theoretischen Wert von 90° abweichen. Ziel der Regelung ist es, unter Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Motorleistung, den verfügbaren Unwuchtexzentrizitäten sowie der geeigneten Frequenz und Wasserzugabe, die Bodenverdichtung bei Eigenfrequenz der Bodenreaktionskraft auszuführen, um damit Reichweite und Verdichtungserfolg zu optimieren.

[0081] Die erfindungsgemäße Methode der Bodenverdichtung in Eigenfrequenz der Bodenkontaktkraft ($\varphi_{b,err} \approx 90°$) wurde oben exemplarisch für einen Freiheitsgrad gezeigt, sie ist aber nicht auf einen Freiheitsgrad beschränkt, sondern entsprechend erweiterbar.

[0082] Gut abgestimmt ist ein Tiefenrüttler 2 insbesondere dann, wenn frei in der Luft hängend (Nullversuch) dynamisch angeregt, sein Ruhepol beim Gelenk zum Rüttlerstrang gelegen ist. Es werden dabei keine nennenswerten Vibrationen auf den Rüttlerstrang übertragen und umgekehrt auch keine nennenswerten dynamischen Kräfte vom Strang auf den Rüttler.

[0083] Als Verdichtungsgerät ausgewogen ist der Tiefenrüttler 2 insbesondere, wenn bei der Verdichtung die resultierende dynamische Bodenreaktionskraft in der Ebene der Anregung angreift und somit der Pol auch weiterhin beim Gelenk gelegen ist. Dann sind die Schwingungsformen des Rüttlers beim Nullversuch (frei in der Luft hängend) und bei der Verdichtung ident, lediglich Amplitude und Phasenwinkel sind unterschiedlich, da Verdichtungsarbeit im Boden geleistet wird.

Bezugszeichenliste

[0084]

1	Anordnung
2	Tiefenrüttler
3	Massekörper
4	Rüttlergehäuse
5	Drehantrieb
6	Sensor / Winkelgeber
7	Kupplung
8	Gestänge
9	Wasserspülung
10	Wasserspülung
11	Leitung
12	Sensor / Wasserdruckgeber, Wasserdurchflussmengenzähler
13	Sensor / Beschleunigungsaufnehmer
14	Sensor / Beschleunigungsaufnehmer
15	Spitze
16	Antriebswelle
17	Boden
19	Kraftsensor
21	Steuerungselektronik
22	Flügel
23	Zwischenbereich

A	Amplitude
A_∞	Amplitude bei unendlich hoher Erregerfrequenz
B	Drehachse
D	Diagonale
e	Exzenter der Unwucht
E	Ebene
F	Form
k	Bodensteifigkeitskennwert
k'	Bodensteifigkeitssteigerungsrate
m	Masse der Unwucht
M	modale Rüttlermasse
ΔM	modale mitschwingende Bodenmasse
P	Bewegungsrichtung
R	Drehrichtung
S	Wasser
t	Zeit
T	Tiefe
U	Materialbewegung
W	Signal
Z	Zugabematerial
β	Frequenzverhältnis
φ	Vorlaufwinkel
ω	Erregerfrequenz

Patentansprüche

1. Tiefenrüttleranordnung (1) zur Bodenverdichtung umfassend:

mehrere Tiefenüttler (2), die jeweils eine in einem Rüttlergehäuse (4) von einem Drehantrieb (5) drehend antreibbare Unwucht (3) sowie zumindest einen Bewegungssensor (6, 12, 13, 14, 19) aufweisen, der ausgestaltet ist, um ein die Bewegung des jeweiligen Tiefenrüttlers (2) repräsentierendes Bewegungssignal (P) zu erfassen, eine Steuerungselektronik (21), an welche die Bewegungssignale (P) der Tiefenrüttler (2) weitergegeben werden,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Drehantriebe (5) der Tiefenrüttler (2) von der Steuerungselektronik (21) derart ansteuerbar sind, dass die Bewegungen der Tiefenrüttler (2) zusammenwirkend aufeinander abgestimmt sind.

2. Tiefenrüttleranordnung nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Steuerungselektronik (21) ausgestaltet ist, um abhängig von den Drehsignalen der Tiefenrüttler (2) den Drehantrieb (5) eines der Tiefenrüttler (2) primär zu steuern, und den Drehantrieb (5) zumindest eines anderen der Tiefenrüttler (2) sekundär zu steuern, derart, dass die Drehbewegung des sekundär gesteuerten Drehantriebs (5) auf die Drehbewegung des primär gesteuerten Drehantriebs (5) zusammenwirkend abgestimmt ist.

3. Tiefenrüttleranordnung nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Steuerungselektronik (21) ausgestaltet ist, um abhängig von den Drehsignalen der Tiefenrüttler (2) den primär gesteuerten Tiefenrüttler (2) zu ändern, derart, dass ein Tiefenrüttler (2) mit geringeren Leistungsreserven als primärer Tiefenrüttler (2) und zumindest ein Tiefenrüttler (2) mit größeren Leistungsreserven als sekundärer Tiefenrüttler (2) betrieben wird.

4. Tiefenrüttleranordnung nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Steuerungselektronik (21) ausgestaltet ist, um die Drehbewegung des sekundär gesteuerten Drehantriebs (5) synchron zur Drehbewegung des primär gesteuerten Drehantriebs (5) zu steuern, insbesondere mit gleicher Bewegungsgeschwindigkeit.

5. Tiefenrüttleranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Steuerungselektronik (21) ausgestaltet ist, um die Drehbewegungen mehrerer der Tiefenrüttler (2) mit der gleichen Drehrichtung (R1), der gleichen Phasenlage (P1), und der gleichen Winkelgeschwindigkeit zu steuern.

6. Tiefenrüttleranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Steuerungselektronik (21) ausgestaltet ist, um die Drehbewegungen mehrerer der Tiefenrüttler (2) mit der gleichen Drehrichtung (R), der gleichen Winkelgeschwindigkeit und um 180° gegeneinander versetzten Phasenlagen (P) von wenigstens zwei der Tiefenrüttler (2) zu steuern.

7. Tiefenrüttleranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Steuerungselektronik (21) ausgestaltet ist, um die Drehbewegungen von mindestens zwei der Tiefenrüttler (2) ausgehend von einer gleichen Phasenlage (P) in einer durch die Längsachsen (B) der Tiefenrüttler (2) aufgespannten Bezugsebene (E) mit entgegengesetzten Drehrichtungen (R) und der gleichen Winkelgeschwindigkeit zu steuern.

8. Tiefenrüttleranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 7,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Steuerungselektronik (21) ausgestaltet ist, um die Drehbewegungen von mindestens zwei der Tiefenrüttler (2) ausgehend von einer gleichen Phasenlage (P) senkrecht zu einer durch die Längsachsen (B) der Tiefenrüttler (2) aufgespannten Bezugsebene (E) mit entgegengesetzten Drehrichtungen (R) und der gleichen Winkelgeschwindigkeit zu steuern.

9. Verfahren zur Bodenverdichtung mittels einer Rüttleranordnung (1) aus mehreren Tiefenrüttlern (2), die jeweils eine in einem Rüttlergehäuse (4) von einem Drehantrieb (5) drehend antreibbare Unwucht (3) sowie zumindest einen Sensor (6, 12, 13, 14, 19) aufweisen, wobei:

die Rüttleranordnung (1) in den Boden (17) bis zu einer gewünschten Endtiefe (Tm) der Tiefenrüttler (2) eingebracht wird;
der Boden (17) mittels der Rüttleranordnung (1) in Verdichtungsschritten verdichtet wird, wobei während des Verdichtens mittels der Sensoren (6, 12, 13, 14, 19) die Drehbewegungen der Tiefenrüttler (2) repräsentierende Bewegungssignale (P) erfasst und an eine Steuerungselektronik (21) weitergegeben werden,
wobei die Drehantriebe (5) der Tiefenrüttler (2) von der Steuerungselektronik (21) derart angesteuert werden, dass die Drehbewegungen der Tiefenrüttler (2) zusammenwirkend aufeinander abgestimmt werden.

10. Verfahren nach Anspruch 9,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Drehantrieb (5) eines der Tiefenrüttler (2) der Rüttleranordnung (1) abhängig von den Drehsignalen der Tiefenrüttler (2) primär gesteuert wird, und der Drehantrieb (5) zumindest eines anderen der Tiefenrüttler (2) sekundär gesteuert wird, wobei die Drehbewegung des sekundär gesteuerten Drehantriebs (5) auf die Drehbewegung des primär gesteuerten Drehantriebs (5) zusammenwirkend abgestimmt wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 oder 10,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Unwucht (3) derart drehend angetrieben wird, dass eine Frequenz der Drehbewegung über einen Messzeitraum verändert wird, wobei die Schwingungsamplitude (A) des Tiefenrüttlers (2) während des Messzeitraums ermittelt wird, wobei der Frequenzbereich insbesondere so gewählt wird, dass zumindest über einen Teilbereich des Frequenzbereichs das Rüttlergehäuse (4) und der umgebende Boden (17) miteinander gekoppelt in Schwingung versetzt werden.

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

dass der Vorlaufwinkel (φ) der Unwucht (3) und die Schwingungsamplitude (A) des Tiefenrüttlers (2) ermittelt werden; und
dass ein Bodensteifigkeitswert (k) zumindest auf Basis des Vorlaufwinkels (φ) und der Schwingungsamplitude

(A) ermittelt wird;

13. Verfahren nach Anspruch 12,
dadurch gekennzeichnet,

dass die Ermittlung des Bodensteifigkeitswerts (k) zumindest näherungsweise nach der Formel:

$$k = m \cdot e \cdot \omega^2 \cdot \left(\frac{1}{A_\infty} - \frac{1}{A} \cdot \frac{\text{sign}\,(\varphi - 90°)}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} \right)$$

oder:

$$k \approx \frac{m \cdot e \cdot \omega^2}{A}$$

erfolgt, wobei

- A die Schwingungsamplitude des Tiefenrüttlers,
- Ace eine Vergleichsamplitude des Tiefenrüttlers bei freier Schwingung,
- m eine Masse der Unwucht,
- e eine Exzentrizität der rotierenden Unwucht zu einer Drehachse,
- ω eine Kreisfrequenz der rotierenden Unwucht, und
- φ der Phasenvorlauf der rotierenden Unwucht zur Bewegung des Tiefenrüttlers,

sind.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 oder 10,
dadurch gekennzeichnet,

dass Verdichtungstätigkeit kurzfristig unterbrochen wird, und
einer der Tiefenrüttler (2) aktiv betrieben wird, und zumindest eine Teilzahl der anderen Tiefenrüttler (2) passiv betrieben wird, derart, dass sie mittels ihrer Sensorik die Signale des aktiven Tiefenrüttlers (2) erfassen, welche sie durch den dazwischenliegenden Boden erreichen.

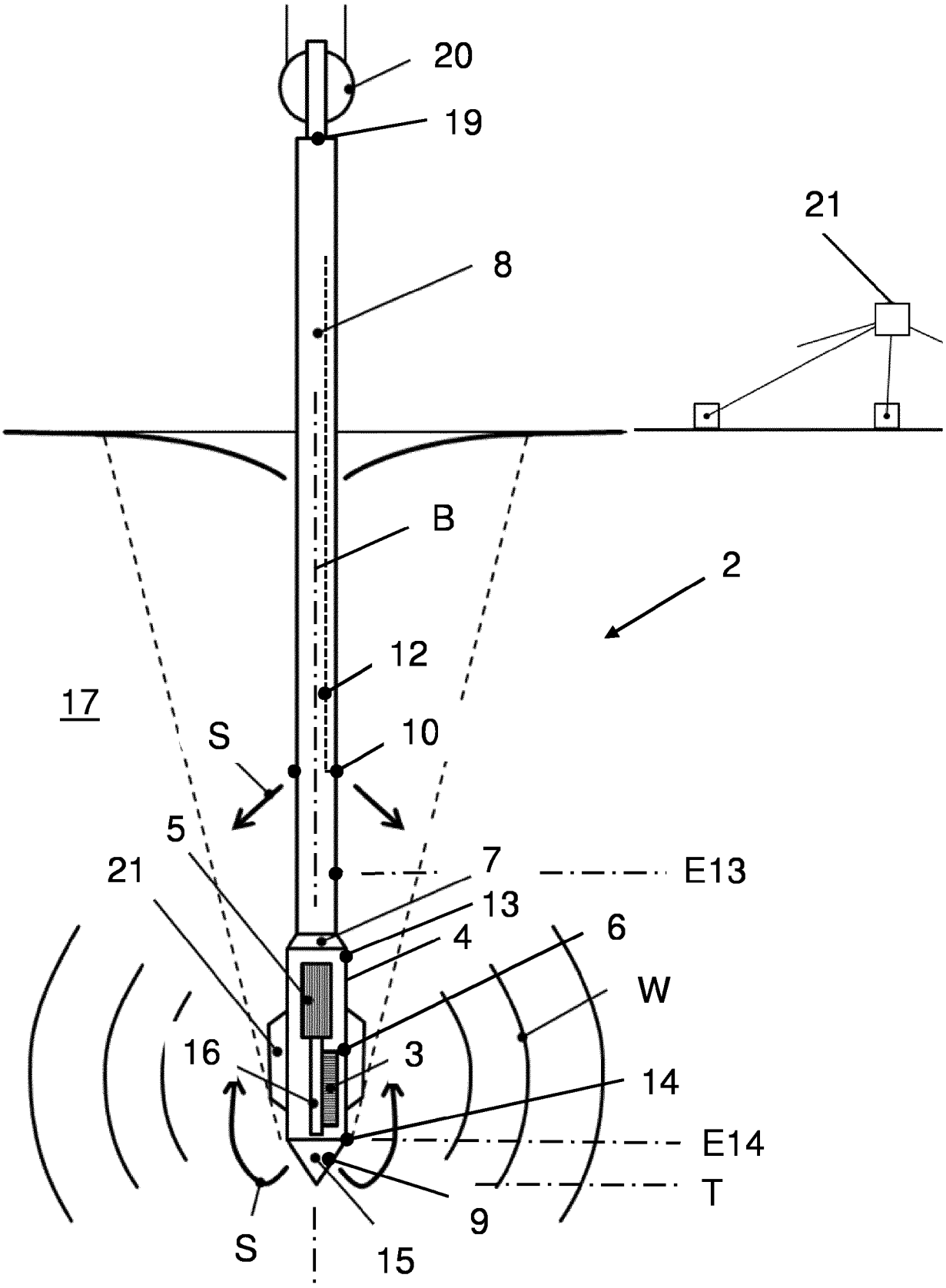


Fig. 1

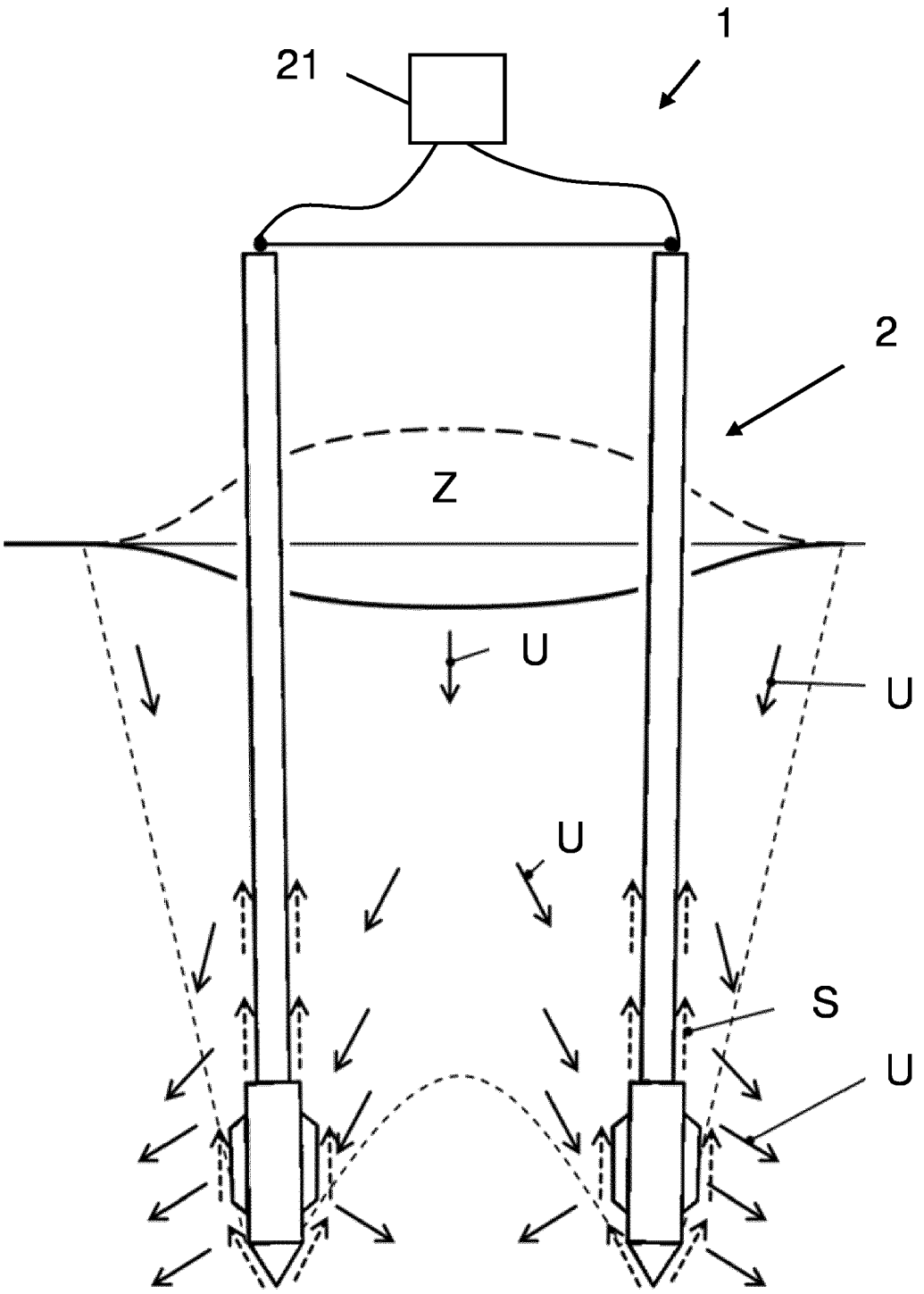


Fig. 2

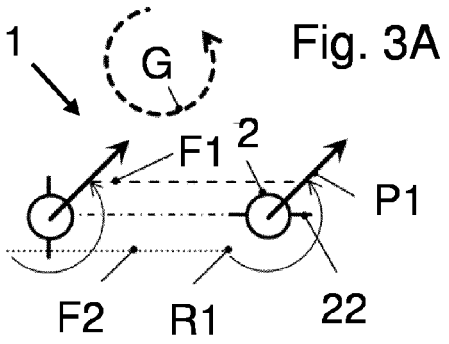


Fig. 3A

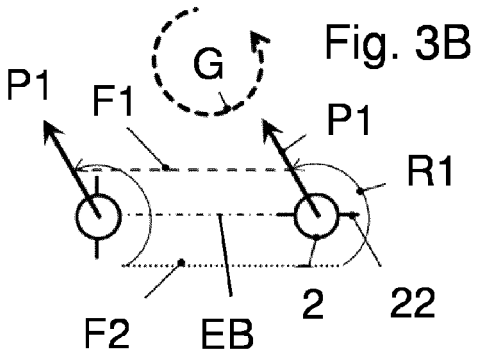
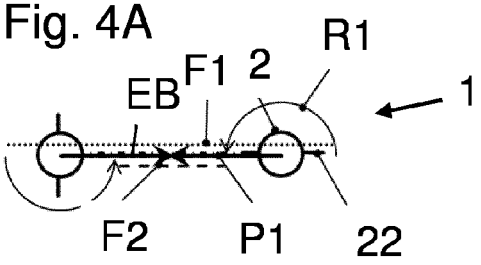


Fig. 3B

Fig. 4A



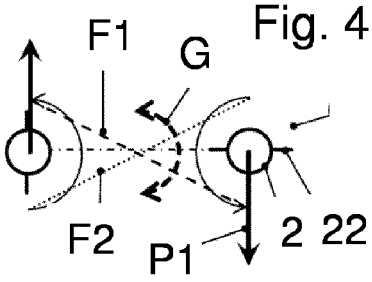


Fig. 4B

Fig. 5A

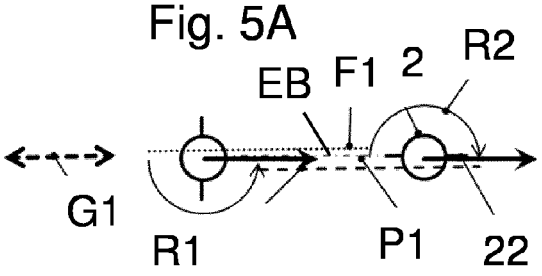
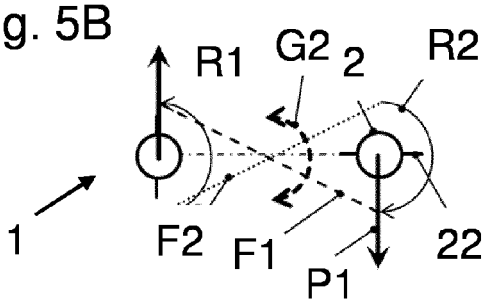


Fig. 5B



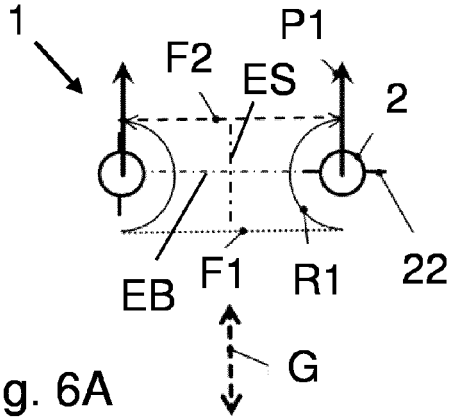


Fig. 6A

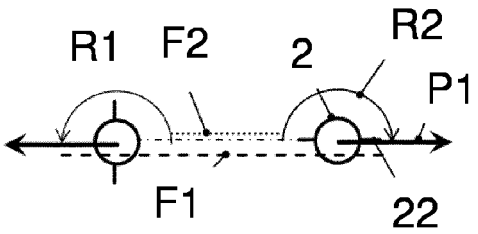


Fig. 6B

Fig. 8A

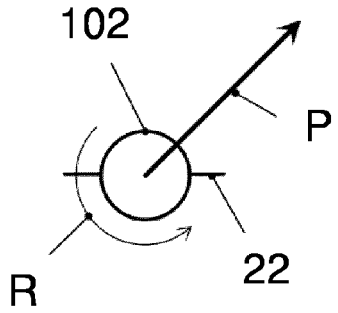
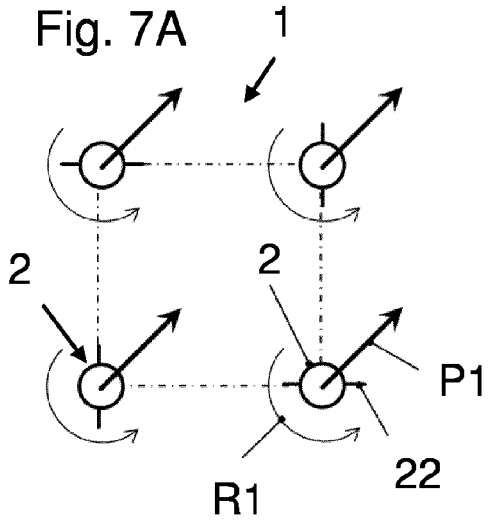


Fig. 7A



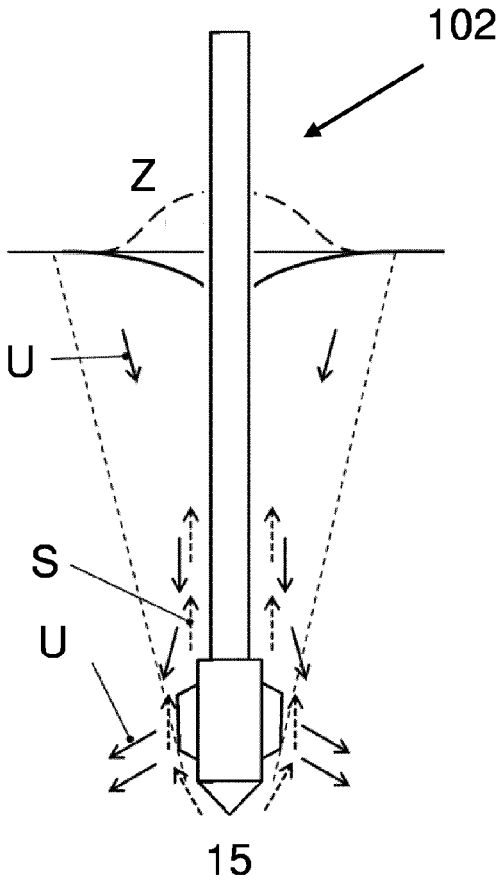


Fig. 8B

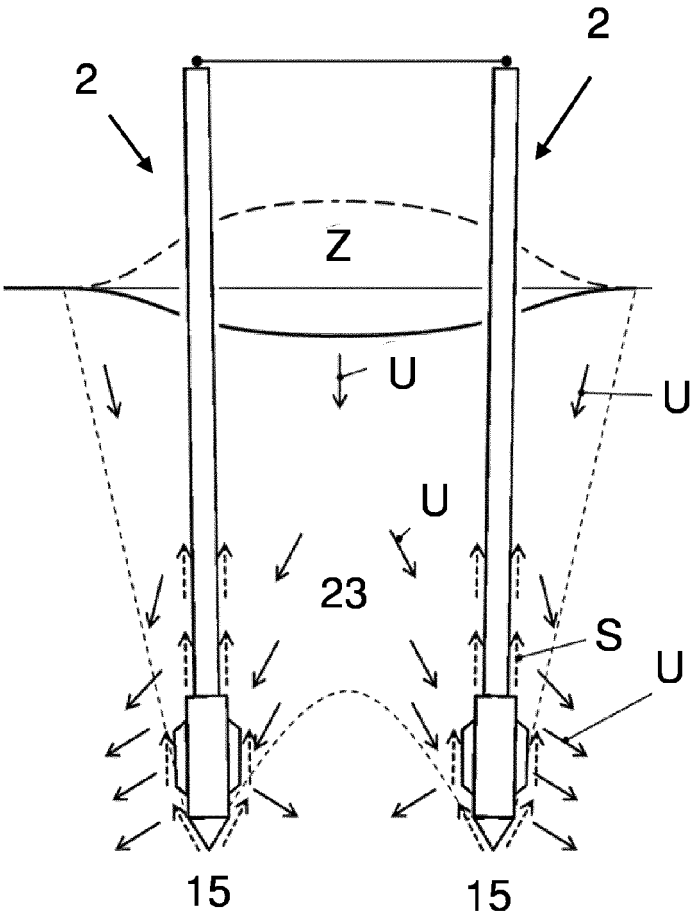


Fig. 7B

Fig. 9A

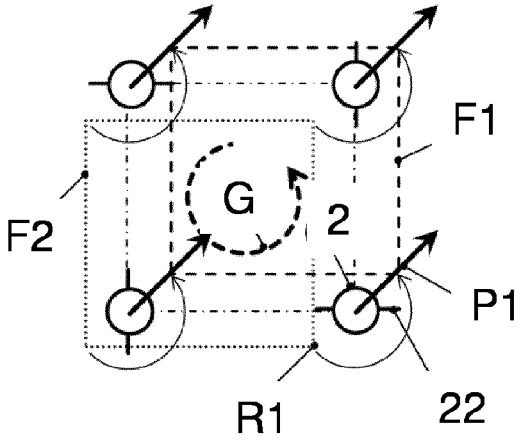


Fig. 9B

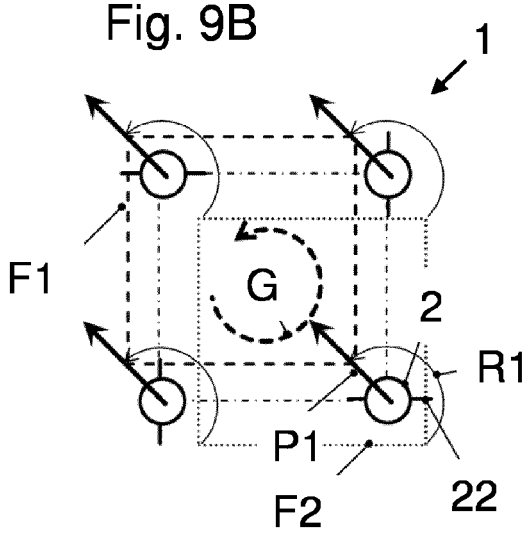


Fig. 10A

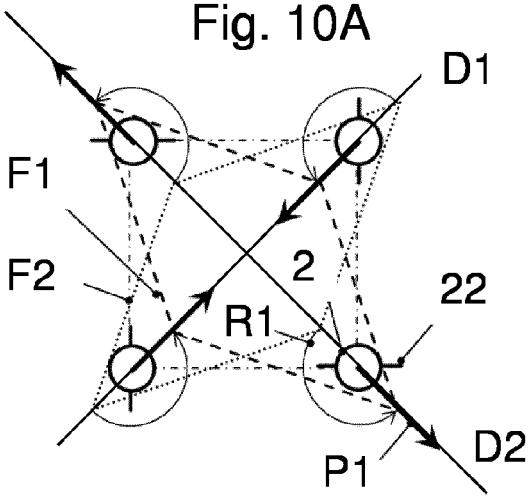


Fig. 10B

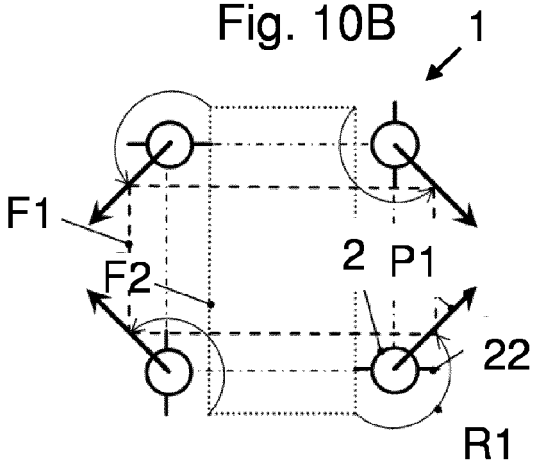


Fig. 11A

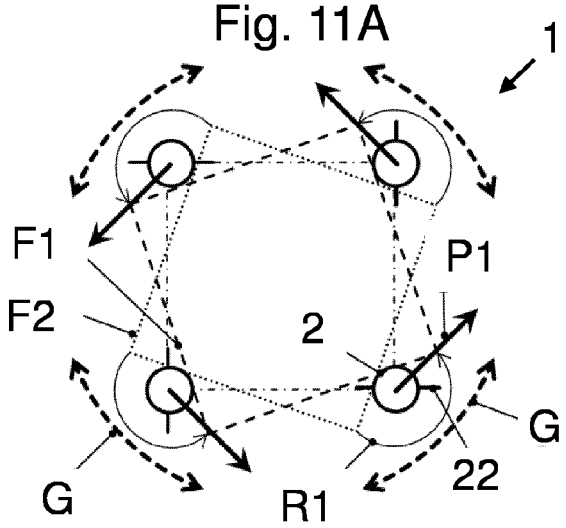


Fig. 11B

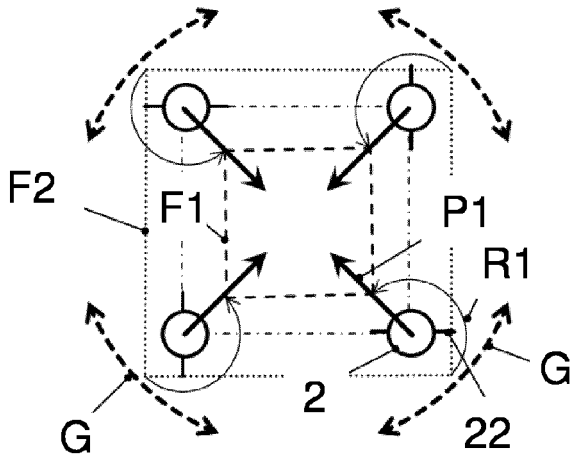


Fig. 12A

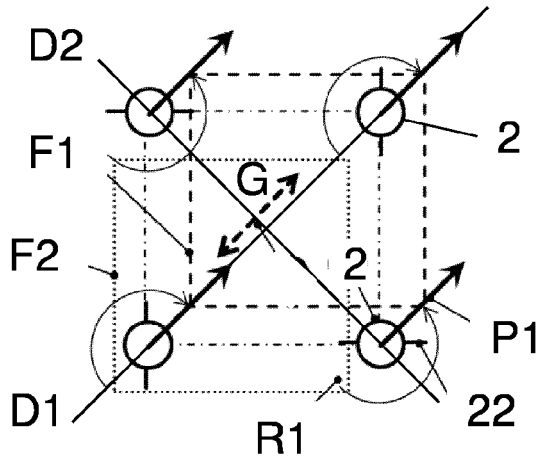


Fig. 12B

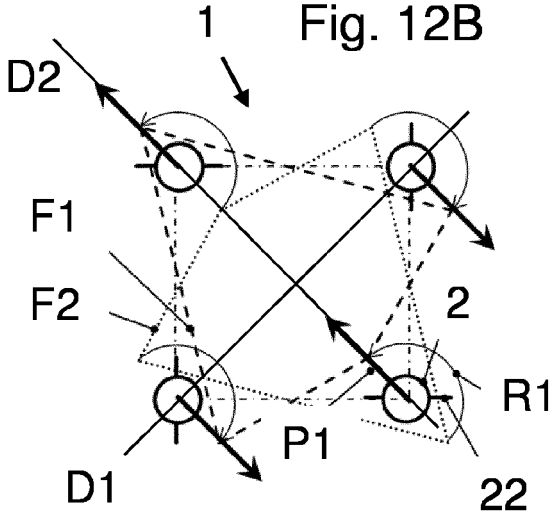


Fig. 13A

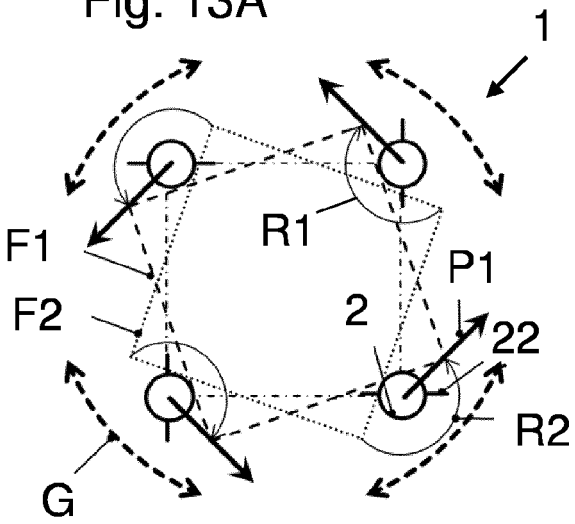


Fig. 13B

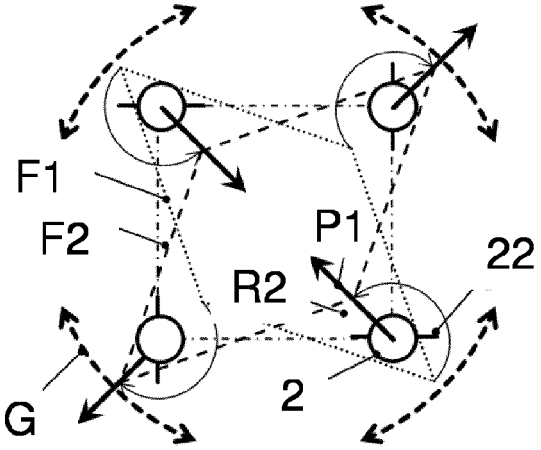
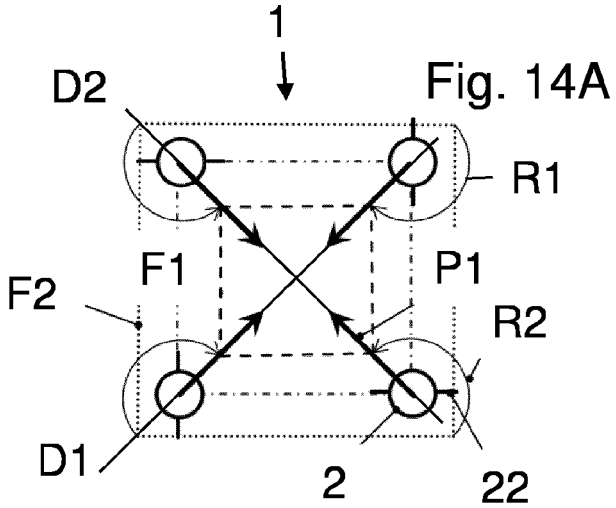


Fig. 14A



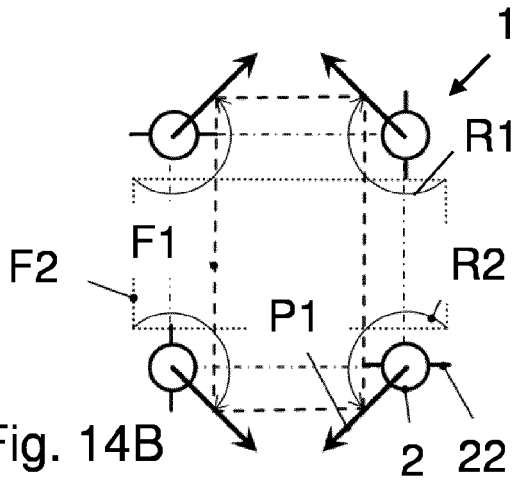


Fig. 14B

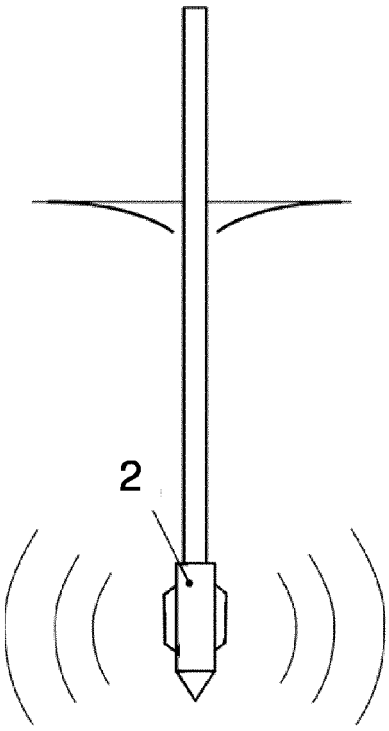


Fig. 15

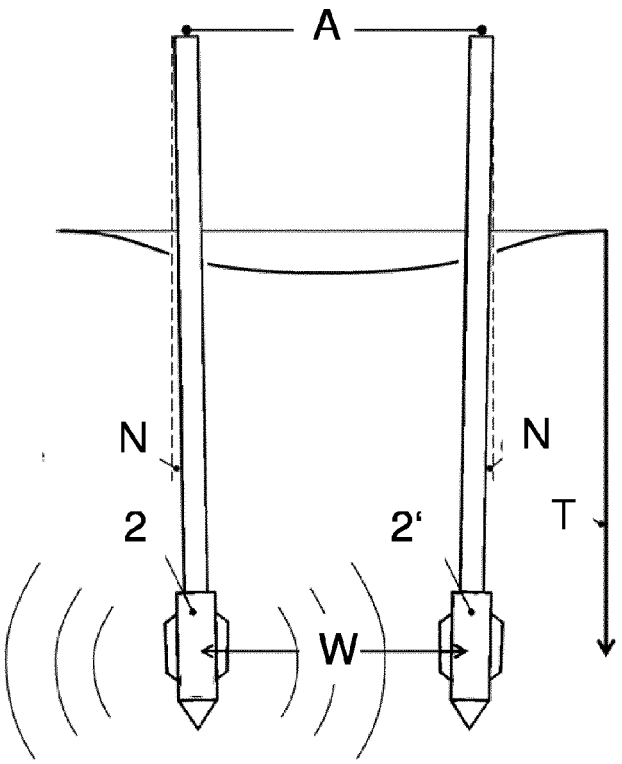


Fig. 16

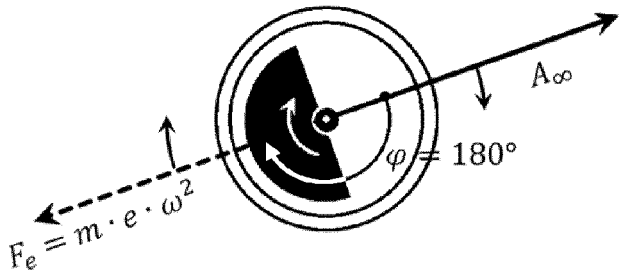


Fig. 17A

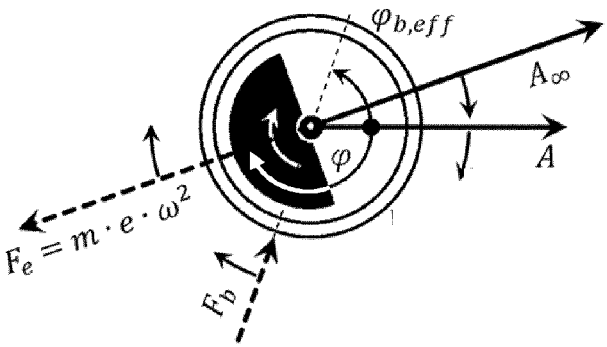


Fig. 17B

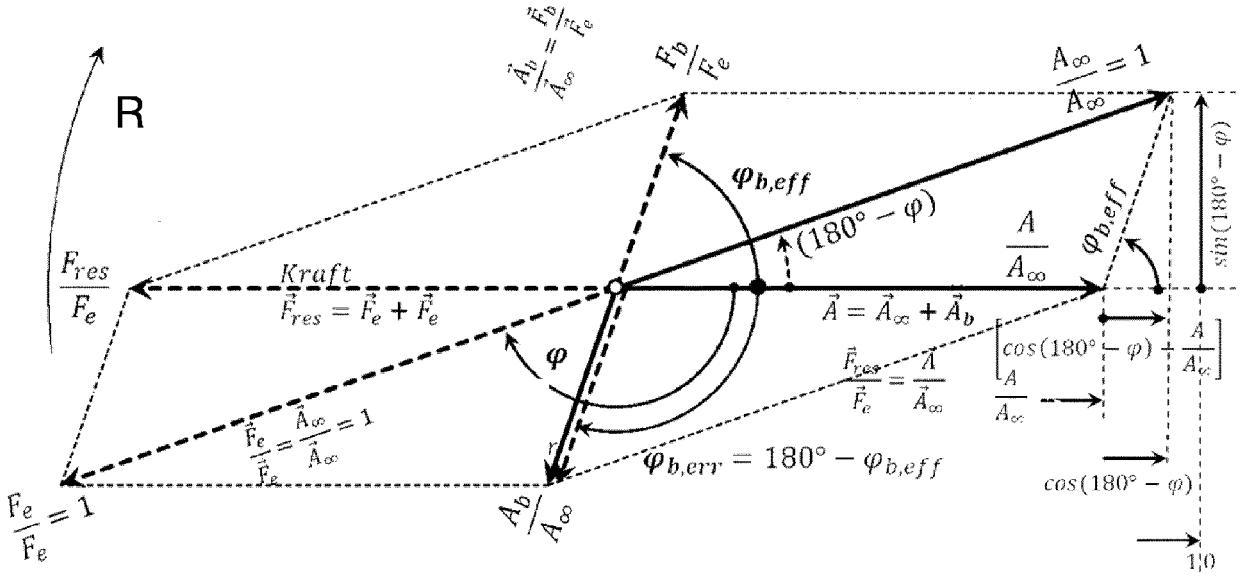


Fig. 18

Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 23 15 1364

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE

Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X,D	DE 10 2016 125155 A1 (BUG DIENSTLEISTUNGEN GMBH & CO KG [DE]) 21. Juni 2018 (2018-06-21)	1,9	INV. E02D3/054 E02D3/074
Y	* das ganze Dokument *	4-8, 11-13	
A		2,3,10, 14	

Y,D	EP 3 517 687 B1 (KELLER HOLDING GMBH [DE]) 5. August 2020 (2020-08-05) * Absätze [0021], [0037]; Anspruch 11; Abbildungen 1-4 *	12,13	

Y	EP 0 672 794 A1 (TERRAMIX KG SCHOTTERPRODUKTION [DE]) 20. September 1995 (1995-09-20)	4-8,11	
A	* Zusammenfassung * * Spalte 5, Zeilen 2-36; Ansprüche 12,13; Abbildung 1 *	1-3,9, 10,12-14	

A	US 2016/348329 A1 (TAKESHIMA SHIGERU [US] ET AL) 1. Dezember 2016 (2016-12-01) * das ganze Dokument *	1,9	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) E02D

Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt

Recherchenort	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer
München	22. Juni 2023	Koulo, Anicet

KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE

X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet
Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie
A : technologischer Hintergrund
O : nichtschriftliche Offenbarung
P : Zwischenliteratur

T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze
E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
D : in der Anmeldung angeführtes Dokument
L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument

& : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR. EP 23 15 1364

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

22-06-2023

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102016125155 A1	21-06-2018	KEINE	
EP 3517687 B1	05-08-2020	EP 3517687 A1	31-07-2019
		US 2019234035 A1	01-08-2019
EP 0672794 A1	20-09-1995	DE 4409008 A1	05-10-1995
		EP 0672794 A1	20-09-1995
US 2016348329 A1	01-12-2016	US 2016348329 A1	01-12-2016
		US 2017275841 A1	28-09-2017

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

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 102016125155 A1 **[0005]**
- EP 3517687 B1 **[0006]**