(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
18. November 2010 (18.11.2010)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2010/130269 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01V 1/52 (2006.01) *G01V 1/40* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2009/003334

(22) Internationales Anmeldedatum:
11. Mai 2009 (11.05.2009)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US)*: **HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM -GFZ** [DE/DE]; Telegrafenberg, 14473 Potsdam (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: **GIESE, Rüdiger** [DE/DE]; Neue Rathenower Strasse 2, 14715 Milower Land (DE). **JAKSCH, Katrin** [DE/DE]; Berliner Strasse 1, 14959 Trebbin (DE). **JURCZYK, Andreas** [DE/DE]; Am Sandberg 2, 14806 Belzig (DE). **MIKULLA, Stefan** [DE/DE]; Edisonallee 19, 14473 Potsdam (DE). **MEYER, Stefan** [DE/DE]; Friedrich-Ebert-Strasse 74, 14469 Potsdam (DE). **WELL, Markus** [DE/DE]; Merkurstrasse 8, 14482 Potsdam (DE). **KRÜGER, Kay** [DE/DE]; Fliederweg 13, 14469 Potsdam (DE).

(74) Anwalt: **HERTZ, OLIVER, PATENTANWALT V. BEZOLD & PARTNER**; Akademiestrasse 7, 80799 München (DE).

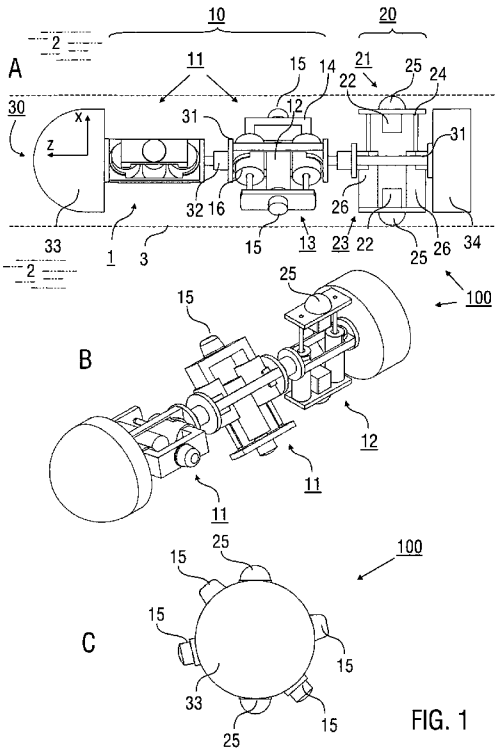
(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) **Title**: METHOD AND DEVICE FOR THE SEISMIC EVALUATION OF A GEOLOGICAL FORMATION

(54) **Bezeichnung** : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR SEISMISCHEN ERKUNDUNG EINER GEOLOGISCHEN FORMATION



(57) **Abstract**: The invention relates to a method for seismic evaluation, in particular of the vicinity of a bore (1) in a geological formation (2). Said method comprises the following steps: provision of a source system (10) comprising at least two seismic sources (11) in the bore (1); generation of seismic waves that propagate in the geological formation (2) with predefined emission characteristics formed by the two or more seismic sources (11); and recording of the seismic waves using a recording system (20). The invention also discloses a seismic system (100) for seismic evaluation of the vicinity of a bore in a geological formation, comprising a source system (10) with at least two seismic sources (11), said source system having predefined emission characteristics and being positionable in the bore (1), and comprising a recording system (20) that can record seismic waves in the vicinity of the bore (1).

(57) **Zusammenfassung**: Ein Verfahren zur seismischen Erkundung, insbesondere einer Umgebung eines Bohrlochs (1) in einer geologischen Formation (2), umfasst die Schritte Bereitstellung einer Quelleneinrichtung (10), die mindestens zwei seismische Quellen (11) umfasst, im Bohrloch (1), Erzeugung von seismischen Wellen, die sich mit einer vorbestimmten, durch die mindestens zwei seismischen Quellen (11) gebildeten Abstrahlcharakteristik in der geologischen Formation (2) ausbreiten, und Registrierung der seismischen Wellen mit einer Registriereinrichtung (20). Es wird auch eine Seismikeinrichtung (100)

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2010/130269 A2

LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

zur seismischen Erkundung einer Umgebung eines Bohrlochs in einer geologischen Formation mit einer Quelleneinrichtung (10) mit mindestens zwei seismischen Quellen (11), die eine vorbestimmte Abstrahlcharakteristik aufweist und in dem Bohrloch (1) positionierbar ist, und einer Registriereinrichtung (20) beschrieben, mit der seismische Wellen in der Umgebung des Bohrlochs (1) registrierbar sind.

Verfahren und Vorrichtung zur seismischen Erkundung einer geologischen Formation

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur seismischen Erkundung, insbesondere einer Umgebung eines Bohrlochs in einer geologischen Formation, und eine Seismikeinrichtung, die zur Durchführung eines derartigen Verfahrens konfiguriert ist. Anwendungen der Erfindung sind in der unterirdischen oder unterseeischen Bohrlochseismik gegeben.

Die genaue Kenntnis der geologischen Verhältnisse in der Umgebung von Erkundungs- oder Produktionsbohrungen sind entscheidend für den wirtschaftlichen Erfolg und die Sicherheit von Geotechnik. Trotz vieler Fortschritte im Bereich der Bohrlochgeophysik gibt es noch erhebliche Beschränkungen hinsichtlich der Möglichkeiten einer Prognose des Bohrprozesses. Dies hat z. B. zur Folge, dass kostenaufwändige Mehrfachbohrungen durchgeführt werden müssen, Bohrgerät und große Mengen an Bohrflüssigkeit verloren gehen. Neben der Sicherheit sind die Kosten für viele neuartige und vielversprechende Nutzungen des geologischen Untergrundes das entscheidende Kriterium für den wirtschaftlichen Erfolg. Ganz besonders trifft das für die Tiefengeothermie zu. Die hohen Erschließungskosten sind bis heute das wesentliche Hindernis einer breiten Nutzung geothermischer Energie aus großen Tiefen.

Derzeit wird für die seismische Erkundung in tiefen Bohrungen in geologischen Formationen das SWD-Verfahren („Seismic While Drilling") oder das VSP-Verfahren („Vertical Seismic Profiling") genutzt, z. B. um ein vertikales seismisches Profil zu erfassen. Dabei wird eine seismische Quelle im Bohrloch verwendet, während die Registrierung der seismischen Wellen an

der Erdoberfläche erfolgt. Ein Vorteil der Verfahren ist die fortschreitende Erkundung während des Abteufens der Bohrung. Zudem kann z. B. das SWD-Verfahren durch die Nutzung des Bohrmeißels als seismische Quelle während der Bohrung angewendet werden. Des Weiteren kann mit den herkömmlichen Verfahren nur ein Frequenzband bis ca. 200 Hertz verwendet werden. Damit ergibt sich als entscheidender Nachteil ein begrenztes räumliches Auflösungsvermögen, das sich mit zunehmender Bohrteufe wegen der längeren Laufwege der seismischen Wellen noch deutlich verschlechtert. So können spezielle Zielhorizonte wie z. B. Thermalwasserschichten für die geothermische Nutzung meist nicht mehr aufgelöst werden.

Anstelle des Bohrmeißels können seismische Bohrlochquellen genutzt werden, um geophysikalische Eigenschaften der geologischen Schichten zu bestimmen, die sich in der Umgebung eines Bohrlochs befinden. Eine Bohrlochquelle wird in das Bohrloch eingeführt und generiert elastische Wellen, die in die Umgebung der Einwirkungsstelle der Quelle in das Bohrlochumfeld abgestrahlt werden. Die Wellen werden von Empfängern wie z.B. Geophonen oder Hydrophonen an verschiedenen Orten registriert, nachdem sie die Untergrundschichten durchlaufen haben und von Schichtgrenzen reflektiert oder von Materialinhomogenitäten gestreut wurden. Nach der Auswertung und Bearbeitung der Wellenregistrierungen können der Ort und die Ausdehnung reflektierender Schichtgrenzen und Materialparameter der Schichten bestimmt werden.

Es sind verschiedene messtechnische Anordnungen in der Bohrlochseismik bekannt. Bei der sog. Crosshole-Seismik sind die Quelle und die Empfänger in unterschiedlichen Bohrlöchern angeordnet. Eine andere Anordnung sieht vor, dass eine Bohrlochquelle an mehreren Stellen im Bohrloch wirkt und die Empfänger an der Erdoberfläche positioniert sind (RVSP, „reverse

vertical seismic profiling"). Weiterhin können die Empfänger auch im gleichen Bohrloch wie die Quelle angeordnet sein („long spacing sonic"). Mit diesem Verfahren wird vorwiegend das unmittelbare Bohrlochumfeld erkundet.

Des Weiteren sind verschiedene Typen von Bohrlochquellen bekannt (siehe z. B. H. C. Hardee in "Geophysical Prospecting" Bd. 31, 1983, S. 57-71), die sich in Bezug auf die zeitliche Anregungsfunktion, wie z. B. Impuls- oder Schlagquellen und Vibrationsquellen, oder in Bezug auf die generierten Wellentypen unterscheiden. Grundsätzlich werden durch eine seismische Quelle vom Ort der Einwirkung in ein elastisches Medium immer gleichzeitig seismische Longitudinalwellen (P-Wellen) und seismische Transversalwellen (S-Wellen) abgestrahlt. Obwohl für die Auswertung der seismischen Messungen beide Wellentypen von Interesse sind, kann die zeitliche Überlagerung der Wellentypen bei der Anregung und Registrierung der in der geologischen Formation reflektierten oder gebrochenen Wellen jedoch zu Fehlern führen.

Aus US 4 103 756 ist eine seismische Bohrlochquelle bekannt, die P- und S-Wellen erzeugt. In US 4 207 961 ist ein Anregungsverfahren beschrieben, das bevorzugt S-Wellen erzeugt. US 4 569 412 offenbart die Konstruktion für eine seismische Bohrlochimpulsquelle mit einem kontrollierbaren Anregungsspektrum. Eine kontrollierbare Implosionsquelle, die als seismische Impulsquelle für die Erkundung eingesetzt werden kann, ist aus US 4 805 726 bekannt. US 4 874 061 offenbart einen Umlaufgenerator, der als Vibrationsquelle wirkt und bevorzugt elliptisch polarisierte S-Wellen generiert. Des Weiteren wurden seismische Vibrationsquellen mit magnetostriktiver oder piezoelektrischer Anregung beschrieben (z.B. US 5 115 880, piezoelektrische seismische Vibrationsquelle mit einer hydraulischen Verstärkung, WO 2006/051298).

Mit den herkömmlichen Impuls- und Vibrationsquellen für die Bohrlochseismik können bevorzugt bestimmte Wellentypen angeregt werden, wobei der Grad der Bevorzugung von den konkreten Ankopplungsbedingungen und der unmittelbaren geologischen Umgebung abhängt. Es ist jedoch keine Quelle bekannt, mit der einstellbar eine Variation der bevorzugten Anregung einzelner Wellentypen vorgenommen werden kann. Ein weiterer Nachteil der herkömmlichen Quellen besteht darin, dass die Energieabstrahlung von elastischen Wellen hinsichtlich der Richtungswirkung nicht beeinflusst werden kann. Damit besteht beim Messprozess keine Einflussmöglichkeit auf die bevorzugte Auswahl besonders interessanter Raumbereiche.

Die Aufgabe der Erfindung ist es, ein verbessertes Verfahren zur seismischen Erkundung bereitzustellen, mit dem Nachteile und Beschränkungen der herkömmlichen Techniken überwunden werden können und das sich insbesondere durch eine erhöhte Flexibilität in Bezug auf die Auswahl eines bestimmten Untersuchungsbereiches in der geologischen Formation und/oder die Auswahl bestimmter Wellentypen auszeichnet. Des Weiteren ist es die Aufgabe der Erfindung, eine verbesserte Seismikeinrichtung bereitzustellen, mit der Nachteile herkömmlicher Techniken überwunden werden und die sich durch einen erweiterten Anwendungsbereich auszeichnet.

Diese Aufgaben werden durch ein Verfahren zur seismischen Erkundungen und eine Seismikeinrichtung mit den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen und Anwendungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Gemäß einem ersten Gesichtspunkt der Erfindung wird die genannte Aufgabe durch die allgemeine technische Lehre gelöst,

ein Verfahren zur seismischen Erkundung, insbesondere zur Untersuchung einer geologischen Formation, in der ein Bohrloch gebildet ist, bereitzustellen, bei dem mit einer im Bohrloch angeordneten Quelleneinrichtung, die mindestens zwei seismische Quellen umfasst, seismische Wellen mit einer vorbestimmten Abstrahlcharakteristik erzeugt und nach einem Lauf durch die geologische Formation mit einer Registriereinrichtung registriert werden. Die Registriereinrichtung erfasst die seismische Antwort der geologischen Formation, indem die seismischen Wellen nach mindestens einer Reflexion, Brechung und/oder Streuung in der geologischen Formation gemessen werden.

Gemäß einem zweiten Gesichtspunkt der Erfindung wird die genannte Aufgabe durch die allgemeine technische Lehre gelöst, eine Seismikeinrichtung bereitzustellen, die zur seismischen Erkundung einer geologischen Formation in einer Umgebung eines Bohrlochs ausgebildet ist und eine Quelleneinrichtung und eine Registriereinrichtung umfasst. Die Quelleneinrichtung ist zum Betrieb in dem Bohrloch eingerichtet und weist mindestens zwei seismische Quellen auf. Die seismischen Quellen sind konfiguriert, in der geologischen Formation seismische Wellen mit einer vorbestimmten Abstrahlcharakteristik zu erzeugen. Die Registriereinrichtung ist konfiguriert, die seismischen Wellen in der geologischen Formation zu detektieren.

Der Begriff "Abstrahlcharakteristik" bezeichnet insbesondere einen abgegrenzten geometrischen Bereich, in dem seismische Schwingungen erzeugt werden. Außerhalb dieses Bereiches werden keine oder derart schwache seismische Schwingungen erzeugt, dass keine Beiträge zu den ausgewerteten Signalen der Registriereinrichtung geliefert werden. Die Abstrahlcharakteristik wird auf einen gewünschten Untersuchungsbereich gerichtet, der allgemein einen abgrenzbaren Teilbereich, wie z.

B. eine bestimmte Schicht, einen Hohlraum und/oder einen Substanzeinschluss in der geologischen Formation umfasst. Die Abstrahlcharakteristik der Quelleneinrichtung wird durch die Überlagerung der von den seismischen Quellen erzeugten Schwingungen geformt. Mit dem Begriff "Abstrahlcharakteristik" können alternativ oder zusätzlich Schwingungseigenschaften (wie z. B. Frequenz, Phase, Amplitude oder P- oder S-Schwingungstyp) der in der geologischen Formation erzeugten seismischen Wellen bezeichnet werden.

Die Bereitstellung der Quelleneinrichtung mit mindestens zwei seismischen Quellen hat des Weiteren den Vorteil, dass trotz des beschränkten Platzangebots im Bohrloch genügend seismische Energie in das Medium eingekoppelt werden kann. In Abhängigkeit von den konkreten Anwendungsbedingungen können mehr als zwei seismische Quellen, z. B. drei, vier, fünf, acht, zehn oder mehr seismische Quellen vorgesehen sein. Jede seismische Quelle stellt ein eigenständiges Modul dar, welches zur Schwingungserzeugung eingerichtet ist. Die seismische Quelle enthält als Schwingungsantrieb mindestens einen Aktuator und des Weiteren mechanische Komponenten zur Halterung und Ausrichtung des mindestens einen Aktuators.

Vorteilhafterweise wird eine seismische Erkundung des geologischen Umfeldes einer Bohrung mit erhöhter Ortsauflösung, z. B. bis in den dm-Bereich und in großen Tiefen, z. B. tiefer als 3000 m ermöglicht. Im Unterschied zu herkömmlichen geophysikalischen Bohrloch-Messverfahren kann erstmals ein differenziertes dreidimensionales Abbild einer größeren Bohrlochumgebung, z. B. bis zu 100 m erzeugt werden kann. Dies ermöglicht, den Bohrfortschritt den tatsächlichen geologischen Gegebenheiten anzupassen.

Die Seismikeinrichtung hat gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung eine langgestreckte Form mit einer Längsachse und einer radialen Dimension derart, dass die Seismikeinrichtung in das Bohrloch passt und in dessen Längsrichtung verschiebbar ist. Im eingesetzten Zustand verläuft die Längsachse der Seismikeinrichtung in Längsrichtung des Bohrlochs. Die seismischen Quellen sind bevorzugt entlang der Längsachse seriell nebeneinander angeordnet, wobei die Wirkrichtung der Quellen vorzugsweise von der Längsachse abweicht und z. B. senkrecht zur Längsachse in radiale Richtung weist.

Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung werden die mindestens zwei seismischen Quellen jeweils mit einer mechanischen Vorspannung relativ zur Wand des Bohrlochs fixiert. Besonders bevorzugt ist jede seismische Quelle mit einer Anpressvorrichtung ausgestattet. Vorteilhafterweise kann die Vorspannung somit für jede seismische Quelle spezifisch eingestellt werden, z. B. um Variationen im Bohrlochdurchmesser oder Unebenheiten in der Bohrlochwand auszugleichen. Die Anpressvorrichtung ist vorzugsweise mit mindestens einem in radialer Richtung verschiebbaren Fixierstempel ausgestattet, mit dem die seismische Quelle im Bohrloch fixiert wird. Vorteilhafterweise kann der Fixierstempel zusätzlich zur Übertragung der seismischen Wellen über die Bohrlochwand in die geologische Formation verwendet werden.

Das Erkundungsverfahren zeichnet sich gemäß einer bevorzugten Ausführungsform durch eine Einstellung der Abstrahlcharakteristik der Quelleneinrichtung aus. Hierzu sind die mindestens zwei seismischen Quellen unabhängig voneinander einstellbar, d. h. die Position und/oder Ausrichtung (Wirkrichtung) jeder der seismischen Quellen im Bohrloch ist spezifisch justierbar. Vorzugsweise sind die mindestens zwei seismischen Quellen unabhängig voneinander steuerbar oder regelbar, d. h.

Schwingungseigenschaften (Frequenz, Phase und/oder Amplitude) der mit den seismischen Quellen erzeugten seismischen Schwingungen sind spezifisch wählbar oder in Regelkreisen, z. B. in Abhängigkeit von Signalen von Bewegungssensoren in der Seismikeinrichtung einstellbar. Damit ergeben sich weitere Freiheitsgrade zur Einstellung der Abstrahlcharakteristik.

Gemäß einer ersten Variante umfasst die Einstellung eine Positionierung der seismischen Quellen in einer vorbestimmten Tiefe im Bohrloch und/oder mit einem vorbestimmten gegenseitigen Abstand entlang der Längsachse der Seismikeinrichtung. Vorzugsweise weisen die seismischen Quellen verstellbare Abstände auf. Vorteilhafterweise können somit in Längsrichtung des Bohrlochs, insbesondere in verschiedenen Tiefen seismische Schwingungen erzeugt und verschiedene Laufwege zu bestimmten Zielbereichen in der geologischen Formation vorgegeben werden. Alternativ oder zusätzlich umfasst die Einstellung die Ausrichtung jeder seismischen Quelle im Bohrloch, wobei die radiale Wirkrichtung durch eine Drehung der seismischen Quelle um die Längsachse in azimuthaler Richtung eingestellt wird.

Der Einstellungsschritt kann vor der Bereitstellung der Seismikeinrichtung (insbesondere Positionierung der Quelleneinrichtung) im Bohrloch, z. B. bei der Montage der Seismikeinrichtung mit den seismischen Quellen vorgesehen sein. Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist der Einstellungsschritt jedoch in einem Zustand vorgesehen, in dem sich die Seismikeinrichtung im Bohrloch befindet. Die Seismikeinrichtung ist in diesem Fall mit Stelleinrichtungen, z. B. Stellmotoren ausgestattet, mit denen die seismischen Quellen entlang der Längsachse der Seismikeinrichtung verschiebbar und/oder um die Längsachse der Seismikeinrichtung relativ zueinander verdrehbar sind.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung erfolgt die Einstellung der Abstrahlcharakteristik während der Erzeugung der seismischen Wellen. Gemäß einer ersten Variante werden die seismischen Quellen so angesteuert, dass sich die seismischen Wellen mit mindestens einer räumlichen Vorzugsrichtung überlagern. Gemäß einer zweiten Variante werden die mindestens zwei seismischen Quellen so angesteuert, dass die seismischen Wellen mit Vibrationssweeps erzeugt werden. Die Vibrationssweeps weisen vorzugsweise verschiedene Phasen und/oder Amplituden auf, während sie gleiche Frequenzgänge besitzen.

Des Weiteren ist es möglich, die Schwingungsanregung der einzelnen Quellen phasenversetzt vorzunehmen, so dass verschiedenen Wellentypen mit spezifischen Abstrahlcharakteristiken angeregt werden. Dies wird weiterhin durch die Möglichkeit der variablen Ausrichtung der Quellen in unterschiedliche Raumrichtungen unterstützt. Ein wichtiges Merkmal der Erfindung besteht somit darin, dass im Bohrloch seismische Wellen mit einer einstellbaren variablen Abstrahlcharakteristik erzeugt werden. Dies geschieht vorzugsweise mit Vibrationsquellen, die Schwingungen in einem breiten Frequenzband, z. B. von 0,1 kHz bis 20 kHz anregen.

Vorteilhafterweise ergibt eine abgestimmte Ansteuerung (Betätigung) der seismischen Quellen, dass sich durch Interferenzen räumliche Vorzugsrichtungen der Abstrahlung der seismischen Erkundungswellen bilden. Die Abstrahlcharakteristik kann so eingestellt werden, dass seismische Wellen, die einen vorbestimmten Untersuchungsbereich durchlaufen, mit der Registriereinrichtung erfasst werden. Das erkundende Wellenfeld kann auf jede gewünschte Raumrichtung fokussiert werden. Die Abstrahlcharakteristik kann insbesondere so eingestellt wer-

den, dass eine vorausschauende seismische Erkundung in Richtung des Bohrlochpfads erfolgt.

Vorteilhafterweise bestehen verschiedene Möglichkeiten, den Ort der Registrierung der seismischen Wellen auszuwählen. Gemäß einer ersten, bevorzugten Variante ist die Registriereinrichtung mit der Quelleneinrichtung im Bohrloch angeordnet. Die Registriereinrichtung hat in diesem Fall eine Größe und Form derart, dass sie in dem Bohrloch positionierbar und verschiebbar ist. Die aus dem Umfeld des Bohrlochs reflektierten seismischen Wellen werden vorzugsweise durch eine in die Seismikeinrichtung integrierte und mit der Quelleneinrichtung verbundene Registriereinrichtung registriert. Sie bilden eine serielle Anordnung, deren Größe und Form an die innere Form des Bohrlochs angepasst ist. Vorteilhafterweise können die Quelleneinrichtung und die Registriereinrichtung mit einer gegenseitigen Schwingungsentkopplung oder -unterdrückung verbunden werden, so dass die Registrierung durch den Betrieb der Quellen nicht gestört wird. Die vom umgebenden Medium zurückgeworfenen Wellen können in unmittelbarer Umgebung der Quellen im Bohrloch detektiert werden.

Die Integration von seismischen Quellen und der Registriereinrichtung in einem gemeinsamen Bohrloch-Messgerät ermöglicht eine Auflösung im dm-Bereich. Bei Anordnung der Seismikeinrichtung in Bohrkopfnähe kann diese Auflösung auch in großer Teufe erhalten werden. Dies ergibt sich unmittelbar aus den kürzeren Laufwegen der genutzten seismischen Wellen und insbesondere der Möglichkeit der Anregung und Registrierung breitbandiger Signale mit Frequenzen bis zu einigen 10 Kilohertz.

Gemäß einer zweiten Variante kann die Registriereinrichtung in mindestens einem weiteren Bohrloch angeordnet sein, das

mit einem Abstand, z. B. 10 m bis 1 km von dem Bohrloch, in dem die Quelleneinrichtung betrieben wird, in der geologischen Formation angeordnet ist. Gemäß einer dritten Variante kann die Registriereinrichtung an einer Oberfläche der geologischen Formation angeordnet sein.

Die Registriereinrichtung enthält mindestens ein Registriermodul, das mit einem Schwingungssensor, wie z. B. einem Geophon oder einem Hydrophon ausgestattet ist. Der Schwingungssensor ist vorzugsweise ein Dreikomponentengeophon piezoelektrischer Dreikomponentenaufnehmer, die eine räumlich aufgelöste Messung der Schwingungsrichtungen der seismischen Wellen und damit eine richtungsabhängige Auswertung der aufgezeichneten seismischen Wellen ermöglichen.

Wenn gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung die Registrierung der seismischen Wellen mit mehreren Registriermodulen der Registriereinrichtung erfolgt, können sich vorteilhafterweise zusätzliche Informationen für die Auswertung der registrierten Schwingungen ergeben. Die Registriermodule sind vorzugsweise im Bohrloch voneinander beabstandet und besonders bevorzugt zur Erzielung einer weiten Detektionsbasis an entgegengesetzten Enden der Seismikeinrichtung angeordnet. Alternativ oder zusätzlich kann, ggf. zur Kombination der o. g. Varianten mindestens eines der Registriermodule in mindestens einem weiteren Bohrloch oder an der Oberfläche der geologischen Formation angeordnet sein.

Erfindungsgemäß können die Erzeugung und die Registrierung der seismischen Wellen wiederholt werden, wobei mit jeder Wiederholung eine veränderte Abstrahlcharakteristik der Quelleneinrichtung eingestellt werden kann. Vorteilhafterweise können somit verschiedene Untersuchungsbereiche mit hoher Ortsauflösung und/oder unter verschiedenen Bedingungen, z. B.

mit dem zunehmenden Fortschritt der Bohrung abgebildet werden.

Aus Signalen der Registriereinrichtung werden Informationen, insbesondere Informationen über geometrische Eigenschaften (Bildinformationen) und/oder die Zusammensetzung der geologische Formation ermittelt. Vorzugsweise ist beim erfindungsgemäßen Verfahren eine Auswertung der registrierten seismischen Wellen mit einer Strukturerkundung der Umgebung des Bohrlochs vorgesehen. Die Strukturerkundung kann vorteilhafterweise auf mindestens einen Untersuchungsbereich beschränkt werden, der von der Abstrahlcharakteristik der Quelleneinrichtung abgedeckt sind.

Die seismischen Quellen der Seismikeinrichtung sind vorzugsweise als Module jeweils mit mindestens einem Aktuator aufgebaut, der den aktiven Schwingungsantrieb (Betätigungsglied) bildet. Der Aktuator ist vorzugsweise eine Vibrationsquelle. Diese hat den Vorteil, dass Schwingungseigenschaften der seismischen Wellen gezielt eingestellt werden können. Besonders bevorzugt ist der Aktuator schwimmend in der Seismikeinrichtung gelagert. Der Aktuator kann z. B. mit der Anpressvorrichtung fest verbunden sein. In diesem Fall ist die Anpressvorrichtung vorzugsweise schwimmend der Seismikeinrichtung angeordnet. Durch die schwimmende Lagerung kann der Aktuator vorteilhafterweise unabhängig von der Anordnung der Seismikeinrichtung zentrisch im Bohrloch positioniert werden. Des Weiteren wird eine Schwingungsentkopplung des Aktuators von der Seismikeinrichtung erreicht.

Beim integrierten Modulaufbau der Seismikeinrichtung mit der Quelleneinrichtung und der Registriereinrichtung sind diese vorzugsweise durch eine Halteeinrichtung verbunden. Die Halteeinrichtung wird durch eine Reihe von Haltekäfigen gebil-

det, die jeweils zur Aufnahme einer seismischen Quelle oder eines Registriermoduls eingerichtet sind. Besonders bevorzugt sind die Haltekäfige relativ zueinander drehbar angeordnet, wodurch die Einstellung der seismischen Quellen und des mindestens einen Registriermoduls vereinfacht wird.

Ein weiterer Vorteil der erfindungsgemäßen Seismikeinrichtung besteht darin, dass eine Anwendung unter verschiedensten Betriebsbedingungen möglich ist. Die Seismikeinrichtung kann in einem allein für die seismische Erkundung vorgetriebenen, leeren Bohrloch verwendet werden. In diesem Fall steht der gesamte lichte Durchmesser des Bohrlochs für die Seismikeinrichtung zur Verfügung. Alternativ kann die Seismikeinrichtung in einem Bohrloch verwendet werden, welches zur Förderung und/oder Injektion von Substanzen aus der und/oder in die geologische Formation vorgetrieben wurde. In diesem Fall kann ebenfalls für bestimmte Messzeiten der lichte Durchmesser des Bohrlochs für die Seismikeinrichtung bereitgestellt werden. Es ist jedoch auch möglich, die Seismikeinrichtung zu betreiben, während im Bohrloch ein Bohrlochgestänge angeordnet ist. Für diesen Fall ist die Quelleneinrichtung ggf. mit der Registriereinrichtung zur Verbindung mit dem Bohrlochgestänge konfiguriert. Bei der Integration der Seismikeinrichtung in das Bohrgestänge können vorteilhafterweise während der Bohrung wichtige Informationen zur Überwachung des Bohrprozesses gewonnen werden. Beispielsweise kann die Halteeinrichtung der Seismikeinrichtung mit einer Aufnahme für das Bohrlochgestänge ausgestattet sein, ohne das die Funktion der Quelleneinrichtung und ggf. der Registriereinrichtung beeinträchtigt wird. Bei allen Varianten ist die Ausrichtung des Bohrlochs unkritisch. So kann die Erfindung in einem horizontalen oder einem vertikalen Bohrloch oder einem Bohrloch mit einer Neigung zwischen 0° und 90° realisiert werden.

Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung werden im Folgenden unter Bezug auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben. Es zeigen:

Figur 1: eine erste Ausführungsform der erfindungsgemäßen Seismikeinrichtung in Seiten-, Perspektiv- und Draufsicht;

Figur 2: eine weitere Ausführungsform der erfindungsgemäßen Seismikeinrichtung;

Figur 3: eine weitere Ausführungsform der erfindungsgemäßen Seismikeinrichtung in einem Bohrloch; und

Figur 4: eine weitere Ausführungsform der erfindungsgemäßen Seismikeinrichtung in einem Bohrloch mit einem Bohrgestänge.

Die erfindungsgemäße Seismikeinrichtung wird im Folgenden unter beispielhaftem Bezug auf Ausführungsformen beschrieben, bei denen zwei oder vier seismische Quellen und ein oder zwei Registriermodule vorgesehen sind. Die Erfindung ist nicht auf diese Varianten beschränkt, sondern mit drei oder einer größeren Anzahl von seismischen Quellen und/oder Registriermodulen realisierbar.

Einzelheiten der Bohrlochseismik, insbesondere das Bohren des Bohrlochs, die Erzeugung einer seismischen Welle mit einem magnetostriktiven oder piezoelektrischen Aktuator und die Auswertung von seismischen Wellen, die in der geologischen Formation reflektiert, gestreut und/oder gebrochen wurden, werden nicht erläutert, soweit sie aus dem Stand der Technik als solche bekannt und bei der Realisierung der Erfindung anwendbar sind.

Eine erste Ausführungsform der erfindungsgemäßen Seismikeinrichtung 100 ist in Figur 1 in Seitenansicht (Figur 1A), Perspektivansicht (Figur 1B) und axialer Draufsicht (Figur 1C) illustriert. Die Seismikeinrichtung 100 umfasst eine Quelleneinrichtung 10 mit zwei seismischen Quellen 11 und eine Registriereinrichtung 20 mit einem Registriermodul 21. Die Quelleneinrichtung 10 und die Registriereinrichtung 20 sind mittels einer Halteeinrichtung 30 miteinander verbunden, die aus Haltekäfigen 31 und Achselementen 32 zusammengesetzt ist. Die Quellen- und Registriereinrichtungen 10, 20 sind linear nebeneinander angeordnet. Somit hat die Seismikeinrichtung 100 eine längliche Form (Stab-, Säulen- oder Zylinderform), die an die Gestalt des Bohrlochs angepasst ist. Die Längsachse der Seismikeinrichtung 100 verläuft in Längsrichtung (z-Richtung) des Bohrlochs.

Das Bohrloch 1 ist schematisch in Figur 1A illustriert. Es erstreckt sich gerade oder mit einer Krümmung in einer geologischen Formation 2, die einen unterirdischen oder unterseeischen Bereich der Erdkruste umfasst. In Abhängigkeit von der Art des Bohrlochs 1 kann die Wand 3 des Bohrlochs durch die geologische Formation 2, zum Beispiel Felsgestein, oder eine Wandverschalung gebildet werden. Der Innendurchmesser des Bohrlochs 1 kann zum Beispiel 10 cm bis 50 cm betragen.

Die mindestens zwei seismischen Quellen 11 sind entlang der Längsachse der Seismikeinrichtung 100 nebeneinander und somit in Längsrichtung des Bohrlochs 1 relativ zueinander versetzt angeordnet. Die seismischen Quellen 11 haben beim dargestellten Ausführungsbeispiel den gleichen Aufbau. Alternativ können sich die seismischen Quellen 11 in Bezug auf Einzelheiten, wie zum Beispiel den Typ der Schwingungserzeugung oder die Kopplung mit der Halteeinrichtung 30 unterscheiden.

Jede seismische Quelle 11 umfasst einen Aktuator 12, der mit einer Anpressvorrichtung 13 verbunden ist. Der Aktuator 12 ist beispielsweise ein magnetostriktiver oder ein piezoelektrischer Aktuator, wie er in seismischen Messverfahren verwendet wird. Der Aktuator 12 kann gemäß einem abgewandelten Ausführungsbeispiel mit einem Bewegungssensor (nicht gezeigt) ausgestattet sein. Der Bewegungssensor ist vorzugsweise unmittelbar im Bereich der Schwingungseinleitung in die Fixierstempel an einem Kopfteil des Aktuators positioniert. Mit dem Signal des Bewegungssensors wird die real eingekoppelte Bewegung am Fixierstempel registriert. Dieses Signal kann zur Regelung des Aktuators in Bezug auf eine vorbestimmte Führungsgröße und/oder bei der Auswertung der mit der Registriereinrichtung 20 registrierten Signale verwendet werden. Der Aktuator 12 (und ggf. der Bewegungssensor) ist über elektrische Leitungsverbindungen (nicht dargestellt) mit einer Steuereinrichtung (siehe Figur 3) verbunden.

Die Anpressvorrichtung 13, die in radialer Richtung ausdehnbar ist, umfasst einen sich in radialer Richtung erstreckenden, einstellbaren Rahmen 14, an dessen nach außen weisenden Seiten jeweils ein Fixierstempel 15 vorgesehen ist. Der Rahmen 14 enthält ein oder (wie dargestellt) zwei Spannelemente 16, mit denen die Fixierstempel 15 radial nach außen gedrückt werden können. Die Spannelemente 16 umfassen zum Beispiel Hydraulikzylinder oder Spiralfedern. Die Anpressvorrichtung 13 ist im Haltekäfig 31 der Halteeinrichtung 30 schwimmend gelagert. Abweichend von der illustrierten Struktur kann die Anpressvorrichtung 13 mit weiteren Fixierstempeln ausgestattet sein, so dass zum Beispiel drei, vier oder mehr Fixierstempel vorgesehen sind.

Gemäß dem illustrierten Ausführungsbeispiel ist der Aktuator 12 mit einem der Fixierstempel 15 verbunden, um über diesen in der umgebenden geologischen Formation Schwingungen anzuregen und seismische Wellen zu erzeugen. Alternativ kann jede seismische Quelle 11 mehrere Aktuatoren 12, zum Beispiel zwei oder mehr Aktuatoren aufweisen, die jeweils mit einem der Fixierstempel 15 verbunden sind.

Das Registriermodul 21 der Registriereinrichtung 20 hat einen ähnlichen Aufbau wie die seismische Quelle 11. Das Registriermodul 21 enthält einen oder (wie dargestellt) zwei Sensoren 22, die mit einer Anpressvorrichtung 23 verbunden sind. Die Sensoren 22 umfassen zum Beispiel Dreikomponentengeophone, zum Beispiel vom Typ GS14L3, oder piezoelektrische Dreikomponentenaufnehmer, zum Beispiel vom Typ KS943B.100. Die Sensoren 22 sind über elektrische Leitungen (nicht dargestellt) mit der Steuereinrichtung (siehe Figur 3) verbunden. Die Anpressvorrichtung 23 umfasst einen sich in radialer Richtung erstreckenden Rahmen 24 mit Fixierstempeln 25 und Spannelementen 26, zum Beispiel hydraulischen Zylindern oder Spiralfedern. Die Anpressvorrichtung 23 ist im Haltekäfig 31 der Halteeinrichtung 30 schwimmend gelagert, um eine Schwingungsentkopplung von den übrigen Teilen der Seismikeinrichtung 100 zu erzielen.

Die Halteeinrichtung 30 wird durch die lineare Anordnung der Haltekäfige 31 gebildet, die über die Achselemente 32 miteinander verbunden sind. An einem ersten (vorderen) Ende der Halteeinrichtung 30 ist ein Kopfteil 33 vorgesehen, das eine sich in axialer Richtung verjüngende Form, zum Beispiel Halbkugel- oder Kegelform aufweist. Am zweiten (rückseitigen) Ende der Halteeinrichtung 30 ist ein Kopplungsteil 34 vorgesehen, das einen mechanischen Abschluss der Seismikeinrichtung 100 bildet. Zugleich kann das Kopplungsteil 34 eine Schnitt-

stelle zur Verbindung der elektrischen Leitungen der Aktuatoren und Sensoren mit der Steuereinrichtung bilden.

Die Haltekäfige 31, die sich in axialer Richtung der Seismikeinrichtung 100 erstrecken, bilden jeweils eine Aufnahme für eine Anpressvorrichtung 13, 23 der seismischen Quellen 11 oder des Registriermoduls 21. Die Achselemente 32 können starre Verbindungsstäbe zwischen benachbarten Haltekäfigen 31 umfassen. In diesem Fall ist die Struktur der Seismikeinrichtung 100 und insbesondere die relative Ausrichtung der seismischen Quellen 11 und der Registriermodule 21 unveränderlich. Bevorzugt ist eine Variante der Erfindung, bei der die Haltekäfige 31 relativ zueinander um die Längsachse der Seismikeinrichtung 100 drehbar sind. Hierzu können die Achselemente 32 mit Drehlagern ausgestattet sein. Vorteilhafterweise kann damit die Ausrichtung der seismischen Quellen 11 und des Registriermoduls 21, insbesondere in Abhängigkeit von den konkreten Anwendungsbedingungen, geändert werden.

Es kann vorgesehen sein, die Ausrichtung der seismischen Quellen 11 und des Registriermoduls 21 vor der Einführung der Seismikeinrichtung 100 in das Bohrloch 1 einzustellen. In diesem Fall ist eine spätere Änderung der Orientierung nur nach einer wiederholten Entnahme der Seismikeinrichtung 100 aus dem Bohrloch 1 möglich. Die Flexibilität bei der Einstellung der Seismikeinrichtung 100 kann noch verbessert werden, wenn der Haltekäfig 31 und/oder das Achselement 32 von mindestens einem Teil der Quellen- und Registriereinrichtungen 20 mit einer Stelleinrichtung, z. B. einem Stellmotor (nicht dargestellt) ausgestattet ist. Die größte Variabilität ergibt sich, wenn für jede Komponente der Quellen- und Registriereinrichtungen 10, 20 ein Stellmotor vorgesehen ist, um die seismischen Quellen 11 und/oder das Registriermodul 21 konti-

nuierlich oder in vorbestimmten Schritten um die Längsachse der Seismikeinrichtung 100 zu drehen.

Die Figuren 1A bis 1C illustrieren beispielhaft die verschiedenen Ausrichtungen der seismischen Quellen 11 und des Registriermoduls 21 derart, dass die Fixierstempel 15, 25 radial in verschiedene Richtungen weisen (siehe insbesondere Figur 1C).

Vorteilhafterweise wird ein weiterer Freiheitsgrad bei der Einstellung der Seismikeinrichtung 100 erhalten, wenn die gegenseitigen Abstände der seismischen Quellen 11 und/oder des mindestens einen Registriermoduls 21 in Längsrichtung der Seismikeinrichtung 100 einstellbar sind. Es können Achselemente 32 mit verschiedenen Längen vorgesehen sein. Alternativ kann die Seismikeinrichtung 100 mit einer Vielzahl von Kombinationen aus Haltekäfigen 31 und Achselementen 32 ausgestattet sein, von denen nicht alle Haltekäfige 31 mit seismischen Quellen 11 oder Registriermodulen 21 besetzt sind. In beiden Fällen ist der Aufbau der Seismikeinrichtung 100 besonders einfach, die Einstellbarkeit während des Betriebs jedoch beschränkt.

Gemäß einer vorteilhaften Variante der Erfindung können daher zwischen den Haltekäfigen 31 Achselemente mit veränderlicher Länge vorgesehen sein. Die Achselemente können eine Teleskopstruktur aus mindestens zwei ineinander gesteckten und relativ zueinander verschiebbaren Rohren aufweisen. Auch in diesem Fall können Stelleinrichtungen vorgesehen sein, um die Länge der Achselemente 32 einzustellen. Somit kann erfindungsgemäß der Abstand zwischen seismischen Quellen 11 und/oder Registriermodulen 21 eingestellt werden, während sich die Seismikeinrichtung 100 im Bohrloch 1 befindet.

Die Seismikeinrichtung 100 wird beispielsweise mit den folgenden Dimensionen realisiert. Die Gesamtlänge der Seismikeinrichtung 100 in Längsrichtung kann beispielsweise im Bereich von 50 cm bis 5 m gewählt sein und z. B. 2 m betragen. Die Querschnittsdimension in radialer Richtung, zum Beispiel der Durchmesser, kann im Bereich von 10 cm bis 50 cm gewählt sein und z. B. 20 cm betragen. Die Querschnittsdimension in radialer Richtung entspricht im Wesentlichen der Größe der Rahmen 14, 24 in radialer Richtung. In der Halteeinrichtung 30 sind mindestens zwei seismische Quellen 11 angeordnet. Bei Registrierung der seismischen Wellen im Bohrloch 1 ist des Weiteren das mindestens eine Registriermodul 21 in der Halteeinrichtung 30 angeordnet.

In Figur 2 ist eine abgewandelte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Seismikeinrichtung 100 gezeigt, bei der die Quellen-, Registrier- und Halteeinrichtungen 10, 20 und 30 wie in Figur 1 gezeigt aufgebaut sind. Zusätzlich sind die seismischen Quellen 11 und das Registriermodul 21 mit Gehäusen ausgestattet. Die Gehäuse bilden einen Schutz der seismischen Quellen 11 und des Registriermoduls 21 im Bohrloch, insbesondere gegen unerwünschte mechanische Einflüsse oder Verunreinigungen. Die seismische Quelle 11 ist mit einem Quellen-Gehäuse 17 ausgestattet, in dessen Gehäusewand Öffnungen 18 vorgesehen sind, durch welche die Fixierstempel 15 radial nach außen ragen. Das Quellen-Gehäuse 17 ist mit dem Haltekäfig 31 (siehe Figur 1) fest verbunden. Wenn die Haltekäfige 31 der Halteeinrichtung 30 drehbar sind, können die Quellen-Gehäuse 17 ebenfalls um die Längsachse der Seismikeinrichtung 100 gedreht werden. Das Registriermodul 21 ist mit einem Registriermodul-Gehäuse 27 ausgestattet, das ebenfalls Öffnungen 28 aufweist, durch welche die Fixierstempel 25 radial nach außen ragen. Die Quellen- und Registriermodul-Gehäuse

17, 27 bestehen zum Beispiel aus Edelstahl oder einem Kunststoff.

Figur 2 illustriert des weiteren die Freiheitsgrade der Einstellung der erfindungsgemäßen Seismikeinrichtung 100. Die Pfeile a illustrieren die Einstellung der seismischen Quellen 11 und/oder der Registriermodule 21 in azimutaler Richtung, d. h. durch eine Drehung um die Längsachse der Seismikeinrichtung, während die Pfeile b die Einstellung der seismischen Quellen 11 und/oder der Registriermodule 21 in Längsrichtung veranschaulichen. Zusätzlich ist mit den Pfeilen c die Verstellmöglichkeit der Fixierstempel 15 in radialer Richtung gezeigt.

Eine weitere Ausführungsform der erfindungsgemäßen Seismikeinrichtung 100 ist schematisch in Figur 3 mit einem Betriebszustand in einem vertikal ausgerichteten Bohrloch 1 gezeigt. Die Seismikeinrichtung ist im Wesentlichen aufgebaut, wie es oben unter Bezug auf die Figuren 1 und 2 beschrieben wurde. Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel sind vier seismische Quellen 11 vorgesehen, die entlang der Längsachse der Seismikeinrichtung 100 übereinander angeordnet sind. An den Enden der Seismikeinrichtung 100 sind die Registriermodule 21 vorgesehen. Die seismischen Quellen 11 und die Registriermodule 21 sind schwimmend in den Haltekäfigen 31 der Halteeinrichtung gelagert. Abweichend von den oben beschriebenen Ausführungsformen sind zwischen den Haltekäfigen 31 keine Achselemente vorgesehen. Die Seitenscheiben 35 der Haltekäfige 31 sind über Drehlager unmittelbar miteinander verbunden.

Figur 3 illustriert schematisch eine Steuereinrichtung 40, die an der Oberfläche 5 der geologischen Formation 2 vorgesehen und über eine Leitungsverbindung 41 mit den Aktuatoren 12 und den Sensoren 22 der Quellen- und Registriereinrichtungen

10, 20 verbunden ist. Die Steuereinrichtung 40 enthält eine Stromversorgungseinrichtung und eine Datenverarbeitungseinrichtung. Die Datenverarbeitungseinrichtung ist zur Steuerung der Aktuatoren 12 und zur Verarbeitung der Signale der Sensoren 22 eingerichtet.

Zur Durchführung der erfindungsgemäßen seismischen Erkundung der Umgebung des Bohrlochs 1 sind die folgenden Schritte vorgesehen. Zunächst wird die Seismikeinrichtung 100 im Bohrloch 1 positioniert. Es erfolgt eine Einstellung der Abstrahlcharakteristik der Quelleneinrichtung 10. Hierzu werden die Abstände der seismischen Quellen 11 in Längsrichtung und die Ausrichtung der seismischen Quellen 11 in azimutaler Richtung eingestellt. Die Einstellung erfolgt derart, dass seismische Wellen mit einer vorbestimmen Abstrahlcharakteristik, zum Beispiel mit einer kegel- oder keulenförmigen Abstrahlcharakteristik erzeugt werden. Die seismischen Wellen werden beispielsweise auf einen Untersuchungsbereich 4 in der geologischen Formation 2 gerichtet. Zusätzlich können zur Einstellung der Abstrahlcharakteristik die Aktuatoren 12 der seismischen Quellen 11 mit der Steuereinrichtung 40 so betätigt werden, dass die seismischen Wellen Vibrationssweeps aufweisen. Die Vibrationssweeps zeichnen sich durch gleiche Frequenzgänge, zum Beispiel im Bereich von 0,1 kHz bis 20 kHz aus, variieren jedoch hinsichtlich der Phase und/oder der Amplitude der von den Aktuatoren 12 erzeugten Schwingungen. Die Vibrationssweeps können gebildet werden, wie es an sich aus der Explorationsseismik, wie z. B. bei der Erdöl-Explorationsseismik bekannt ist, und weisen z. B. eine lineare Frequenzänderung (insbesondere „up-sweep") auf.

Mit den Sensoren 22 der Registriermodule 21 werden charakteristische Schwingungssignale aufgenommen, die durch die in der geologischen Formation 2, insbesondere an dem Untersu-

chungsbereich 4 reflektierten und auf den Laufwegen gegebenenfalls gebrochenen oder gestreuten seismischen Wellen bestimmt werden. Schließlich werden die mit den Sensoren 22 registrierten Signale mit der Steuereinrichtung 40 verarbeitet, zum Beispiel um ein Bild des Zielbereiches 4 zu erzeugen. Die Verarbeitung der Signale der Sensoren 22 kann an sich aus der Seismik bekannte Verfahren umfassen und insbesondere eine Verarbeitung von Stapelsignalen aus mehreren Messungen (Rauschminderung), eine Dekonvolution (Erzeugung der Impulsantwort), eine Frequenzfilterung, eine Richtungsfilterung, eine Migrationsanalyse und/oder eine tomographische Bildrekonstruktion einschließen.

In Figur 3 wurde für die seismische Untersuchung das Werkzeug zum Bohren des Bohrlochs 1, insbesondere das Bohrgestänge aus dem Bohrloch 1 entfernt, um Platz für die Seismikeinrichtung 100 zu schaffen. Vorteilhafterweise ist es nicht zwingend erforderlich, ein Bohrgestänge aus einem Bohrloch 1 zu entfernen. Die Seismikeinrichtung 100 kann erfindungsgemäß angepasst sein, um gleichzeitig mit dem Bohrgestänge 200 im Bohrloch 1 angeordnet zu sein, wie schematisch in Figur 4 illustriert ist. Beispielsweise kann die Seismikeinrichtung 100 Bestandteil der üblichen MWD-Geräte („measurement while drilling") oder angepasst in den oder am Antriebsstrang 210 integriert sein. Vorteilhaft ist die Anordnung der Seismikeinrichtung möglichst nahe am Bohrmeißel 220.

Anwendungen der Erfindung bestehen bei allen bekannten bohrloch-geophysikalischen Messmethoden, so insbesondere beim Ausbau der kostengünstigen und sicheren Nutzung des geologischen Untergrundes in unterschiedlichsten Tiefenbereichen. Das Anwendungsspektrum reicht z. B. von vertikalen Flach- und Tiefbohrungen bis zu Horizontalbohrungen, insbesondere mit Durchmessern z. B. von 31 cm. Dabei liegt der Fokus auf vor-

ausschauende Erkundungen zur Erfassung des jeweiligen Untersuchungsbereiches wie Aquifere oder Störungen im Hartgestein.

Bei Anwendungen im Tiefbau, insbesondere Tunnelbau, und/oder Bergbau ermöglicht die Erfindung als Ergänzung zu punktuellen Erkundungen bei Kernbohrungen eine geotechnische Bewertung von Standsicherheit und Stabilität des Untergrundes in Hinblick auf wassergefüllte oder trockene Störzonen. Während es im Tunnelbau üblich ist, für die Vorauserkundung Horizontalbohrungen mit Kerngewinn durchzuführen, kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren die zu erreichende Erkundungstiefe über die eigentlich erbohrte Strecke deutlich erhöht werden. So kann die Anzahl und die Länge der erforderlichen Kernbohrungen minimiert werden, da das erfindungsgemäße Verfahren auch Aussagen über das Bohrlochumfeld liefert. Dies ergibt bei Kosten von rd. 1000 EUR für einen Meter Kernbohrung erhebliche Kosteneinsparungen. Neben Kosteneinsparungen ist der zusätzliche Erkenntnisgewinn von Strukturinformationen in Vortriebsrichtung von Vorteil, da diese die Sicherheit der untertägigen Arbeiten erhöhen und die Stillstandszeiten der Tunnelbohrmaschine verringern.

In der Geothermie können erfindungsgemäß thermalwasserführende Gesteinsschichten oder geklüftete Störzonen, insbesondere in großen Tiefen (z. B. vier bis fünf Kilometer), nachgewiesen oder geologischen Modelle aus der Vorerkundung der Bohrung überprüft werden. Während thermalwasserführende Zonen mit der herkömmlichen Erkundung von der Oberfläche aus nur unzureichend aufgelöst werden können, ermöglicht das erfindungsgemäße Verfahren eine Minimierung des Fündigkeitsrisikos und des Verlusts von Bohrkosten (rd. 10 Mio. EUR pro Bohrung). Dieses Risiko war bisher das wesentliche Hemmnis für eine breitere Anwendung der Geothermie, z. B. auch zur Stromerzeugung.

Beim Betrieb einer Bohranlage zur Erschließung geothermischer Horizonte kann ein wesentlicher Teil der Spülflüssigkeit in geologischen Formationen verloren gehen, wenn nicht rechzeitig das Erreichen einer kritischen Formation bekannt ist. Die sehr teure Spülflüssigkeit dringt dann mit dem Bohrklein in diese Horizonte ein. Auf diese Weise werden die Erdschichten, bei denen es sich beispielsweise um Malmkalke handelt, verstopft. Diese Verstopfungen müssen durch aufwändige Maßnahmen aufgelöst werden und es entstehen lange Stillstandszeiten der Bohranlage. Insbesondere bei der Integration der erfindungsgemäßen Seismikeinrichtung in den Bohrstrang fallen keine zusätzlichen Kosten an, da keine Stillstandszeiten anfallen und der Bohrprozess entsprechend der zu erwartenden Horizonte gesteuert werden kann.

Eine weitere Anwendung besteht bei der Kohlenwasserstoff-Erschließung, insbesondere der Erkundung und Verifizierung eines Lagerstättenmodells. In der Untergrundspeicherung oder in Reservoirtechnologien können bohrlochgeophysikalische Messprogramme ergänzt, Aquiferspeicher-Eigenschaften bestimmt, Messungen zur Überwachung der Sättigungsverhältnisse durchgeführt, eine Diagnose bei Stör- oder Schadensfällen durchgeführt und/oder de Bohrprozesses überwacht werden. Anwendungen sind auch in der Wasserwirtschaft, insbesondere in der Brunnentechnik gegeben, wobei z. B. tiefe Aquiferen erkundet werden.

Bei Errichtung und Betrieb von Untergrundspeichern (z. B. Erdgas, CO_2) können während des Abteufens der Bohrungen wertvolle zusätzliche Informationen bezüglich der lithologisch-petrographischen Profilgliederung und Schichtbewertung ermittelt werden. Daraus ergeben sich zusätzliche Aussagen über Aquiferspeicher-Eigenschaften, die für die Errichtung des

Speichersystems von großem Wert sind. Während des Speicherbetriebes können Messungen zur Überwachung des Sättigungsverhältnisses im Speichergestein sowie zur Unterstützung von Diagnosen im Stör- oder Schadensfall durchgeführt werden, um so die Effizienz und Betriebssicherheit der Anlage zu erhöhen.

Bohrlochmessungen in der Lagerstättenerkundung sind insbesondere für die lithologisch-petrographische Profilgliederung und Schichtbewertung sowie zur Vorratsermittlung der Lagerstätte (Lagerstättenbewertung)wichtig, um die Vorerkundung mittels Oberflächenseismik zu ergänzen. Die bohrlochnahe Erkundung kann von wenigen Metern auf über 50 Meter erweitert werden und damit den Aussagewert einer Erkundungsbohrung erhöhen.

Durch die Erweiterung des bohrlochnahen Erkundungsraumes können auch in der Hydrogeologie entsprechende Vorteile für die hydrologische Erkundung des Untergrundes im Bereich der Wasserwirtschaft generiert werden. Ebenso können mit der seismischen Vorauserkundung des Bohrlochtools tiefe Aquifere erkundet werden, wie auch bei nichtfündigen Brunnenbohrungen das Fündigkeitsrisiko bestimmt werden kann.

Die in der vorstehenden Beschreibung, den Zeichnungen und den Ansprüchen offenbarten Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch in Kombination für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausgestaltungen von Bedeutung sein.

ANSPRÜCHE

1. Verfahren zur seismischen Erkundung, insbesondere einer Umgebung eines Bohrlochs (1) in einer geologischen Formation (2), umfassend die Schritte:
- Bereitstellung einer Quelleneinrichtung (10), die mindestens zwei seismische Quellen (11) umfasst, im Bohrloch (1),
- Erzeugung von seismischen Wellen, die sich mit einer vorbestimmten, durch die mindestens zwei seismischen Quellen (11) gebildeten Abstrahlcharakteristik in der geologischen Formation (2) ausbreiten, und
- Registrierung der seismischen Wellen mit einer Registriereinrichtung (20).

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem die Bereitstellung der Quelleneinrichtung (10) umfasst:
- serielle Anordnung der mindestens zwei seismischen Quellen (11) entlang der Längsachse des Bohrlochs (1).

3. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Bereitstellung der Quelleneinrichtung (10) umfasst:
- Fixierung der mindestens zwei seismischen Quellen (11) jeweils mit einer vorbestimmten Vorspannung relativ zur Wand (3) des Bohrlochs (1).

4. Verfahren gemäß Anspruch 3, bei dem
- die Vorspannung mit Anpresseinrichtungen (13) erzeugt wird, die jeweils an den seismischen Quellen (11) vorgesehen sind.

5. Verfahren gemäß Anspruch 4, bei dem
- die erzeugten seismischen Wellen über Fixierstempel (15) der Anpresseinrichtungen (13) in die geologische Formation (2) übertragen werden.

6. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, mit dem Schritt:
- Einstellung der Abstrahlcharakteristik der Quelleneinrichtung (10).

7. Verfahren gemäß Anspruch 6, bei dem
- die Einstellung der Abstrahlcharakteristik der Quelleneinrichtung (10) erfolgt, wenn sich die mindestens zwei seismischen Quellen (11) im Bohrloch (1) befinden.

8. Verfahren gemäß Anspruch 6 oder 7, bei dem die Einstellung der Abstrahlcharakteristik der Quelleneinrichtung (10) umfasst:
- Einstellung eines Abstandes der mindestens zwei seismischen Quellen (11) im Bohrloch (1),
- Einstellung einer Ausrichtung der mindestens zwei seismischen Quellen (11) im Bohrloch (1),
- Ansteuerung der mindestens zwei seismischen Quellen (11) derart, dass die seismischen Wellen mit mindestens einer räumlichen Vorzugsrichtung der Abstrahlcharakteristik erzeugt werden, und/oder
- Ansteuerung der mindestens zwei seismischen Quellen (11) derart, dass die seismischen Wellen mit Vibrationssweeps erzeugt werden.

9. Verfahren gemäß Anspruch 8, bei dem
- die Vibrationssweeps der seismischen Wellen, die mit den mindestens zwei seismischen Quellen (11) erzeugt werden,

gleiche Frequenzgänge und verschiedene Phasen und/oder Amplituden aufweisen.

10. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem
- die Registrierung der seismischen Wellen im Bohrloch (1), in mindestens einem weiteren Bohrloch und/oder an einer Oberfläche (5) der geologischen Formation (2) erfolgt.

11. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem
- die Registrierung der seismischen Wellen mit mehreren Registriermodulen (21) der Registriereinrichtung (20) erfolgt, die im Bohrloch (1) voneinander beabstandet angeordnet sind.

12. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem
- die Erzeugung und die Registrierung der seismischen Wellen jeweils mit veränderter Abstrahlcharakteristik der Quelleneinrichtung (10) wiederholt werden.

13. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, mit dem Schritt
- Auswertung der registrierten seismischen Wellen mit einer Strukturerkundung der Umgebung des Bohrlochs.

14. Verfahren gemäß Anspruch 13, bei dem
- die Strukturerkundung auf Untersuchungsbereiche (4) beschränkt ist, die von der Abstrahlcharakteristik der Quelleneinrichtung (10) abgedeckt sind.

15. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem
- die seismischen Quellen Vibrationsquellen (11) umfassen, mit denen die seismischen Wellen erzeugt werden.

16. Seismikeinrichtung (100), insbesondere zur seismischen Erkundung einer Umgebung eines Bohrlochs in einer geologischen Formation, umfassend:
- eine Quelleneinrichtung (10) mit mindestens zwei seismischen Quellen (11), die eine vorbestimmte Abstrahlcharakteristik aufweist und in dem Bohrloch (1) positionierbar ist, und
- eine Registriereinrichtung (20), mit der seismische Wellen in der Umgebung des Bohrlochs (1) registrierbar sind.

17. Seismikeinrichtung gemäß Anspruch 16, bei der die mindestens zwei seismische Quellen (11)
- voneinander unabhängig betätigbar sind,
- einen verstellbaren Abstand aufweisen, und/oder
- relativ zueinander verdrehbar sind.

18. Seismikeinrichtung gemäß einem der Ansprüche 16 bis 17, bei der die Registriereinrichtung (20) relativ zu den seismischen Quellen (11)
- einen verstellbaren Abstand aufweist, und/oder
- verdrehbar ist.

19. Seismikeinrichtung gemäß einem der Ansprüche 16 bis 18, bei der
- jede der seismischen Quellen (11) eine Anpresseinrichtung (13) aufweist, die zur Fixierung der seismischen Quelle (11) mit einer vorbestimmten Vorspannung relativ zur Wand (3) des Bohrlochs (1) eingerichtet ist.

20. Seismikeinrichtung gemäß einem der Ansprüche 16 bis 19, bei der
- die Quelleneinrichtung (10) und die Registriereinrichtung (20) verbunden sind und eine serielle Anordnung bilden, deren äußere Form an die innere Form eines Bohrlochs angepasst ist.

21. Seismikeinrichtung gemäß Anspruch 20, bei der
- die Quelleneinrichtung (10) und die Registriereinrichtung (20) durch eine Halteeinrichtung (30) verbunden sind, die eine Vielzahl von Haltekäfigen (31) umfasst, mit denen jeweils ein seismische Quelle (11) oder ein Registriermodul (21) verbunden ist.

22. Seismikeinrichtung gemäß Anspruch 21, bei der
- die Haltekäfige (31) relativ zueinander drehbar angeordnet sind.

23. Seismikeinrichtung gemäß einem der Ansprüche 16 bis 22, bei der
- die Registriereinrichtung (20) mehrere Registriermodule (21) umfasst.

24. Seismikeinrichtung gemäß Anspruch 23, bei der die Registriermodule (21)
- an entgegengesetzten Enden der Seismikeinrichtung angeordnet sind, und/oder
- relativ zu den seismischen Quellen (11) einen verstellbaren Abstand aufweisen.

25. Seismikeinrichtung gemäß einem der Ansprüche 16 bis 24, bei der
- die Registriereinrichtung (20) mindestens ein Dreikomponentengeophon enthält.

26. Seismikeinrichtung gemäß einem der Ansprüche 20 bis 25, bei der
- jede der seismischen Quellen (11) einen Aktuator (12) aufweist, der in einem der Haltekäfige (31) angeordnet ist.

27. Seismikeinrichtung gemäß einem der Ansprüche 26, bei der
- der Aktuator (12) schwimmend in dem Haltekäfig (31) angeordnet ist.

28. Seismikeinrichtung gemäß einem der Ansprüche 20 bis 27, bei der
- die Anpresseinrichtung (13) schwimmend in dem Haltekäfig (31) gelagert ist.

29. Seismikeinrichtung gemäß einem der Ansprüche 16 bis 28, bei der
- die Quelleneinrichtung (10) und/oder die Registriereinrichtung (20) zur Verbindung mit einem Bohrlochgestänge (200) eingerichtet sind.

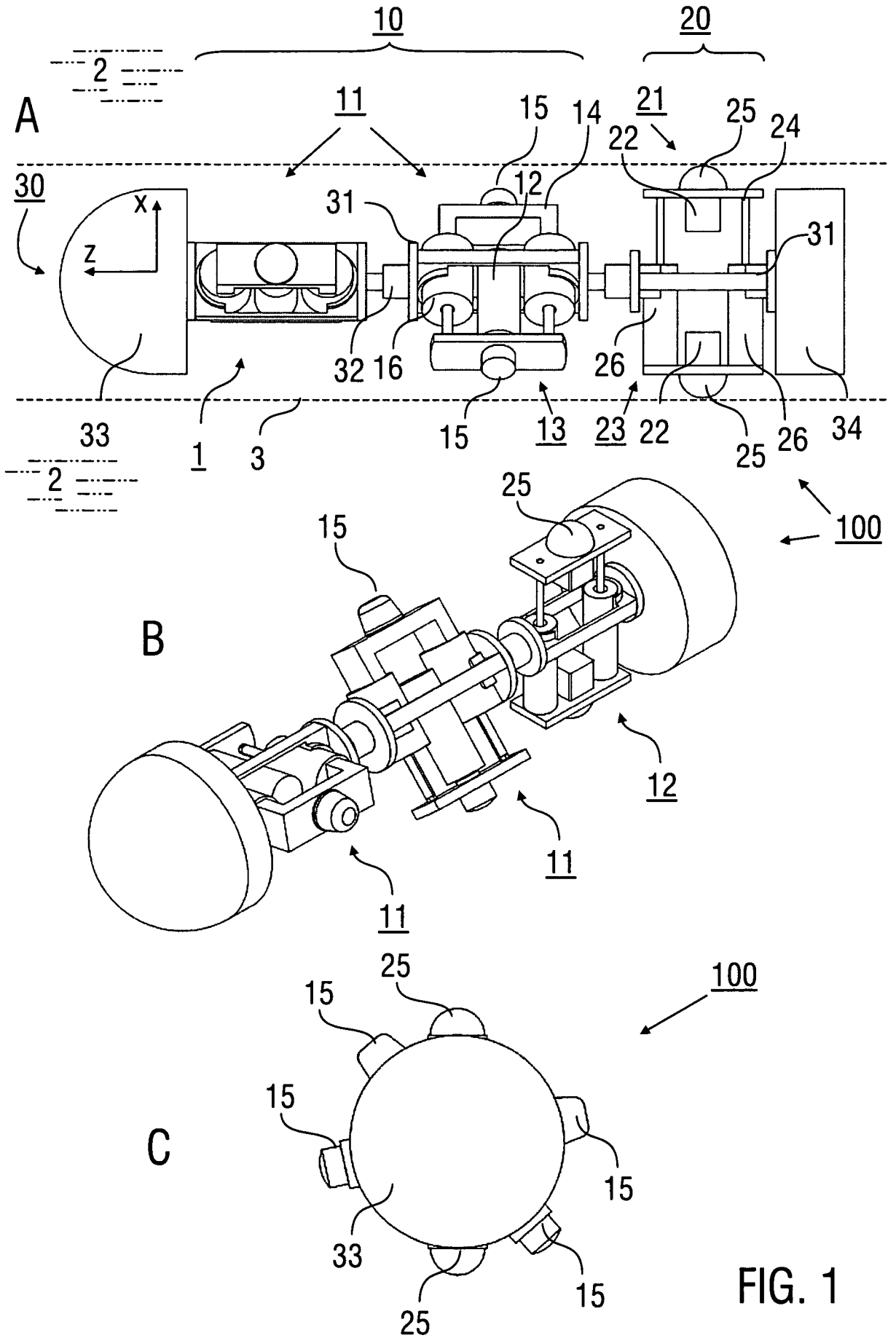

A
10
20
2
11
15
14
21
25
24
22
30
x
z
31
12
31
32
16
26
33
1
3
15
13
23
22
25
26
34
2
B
25
15
100
12
11
11
C
25
100
15
15
15
33
15
25

FIG. 1

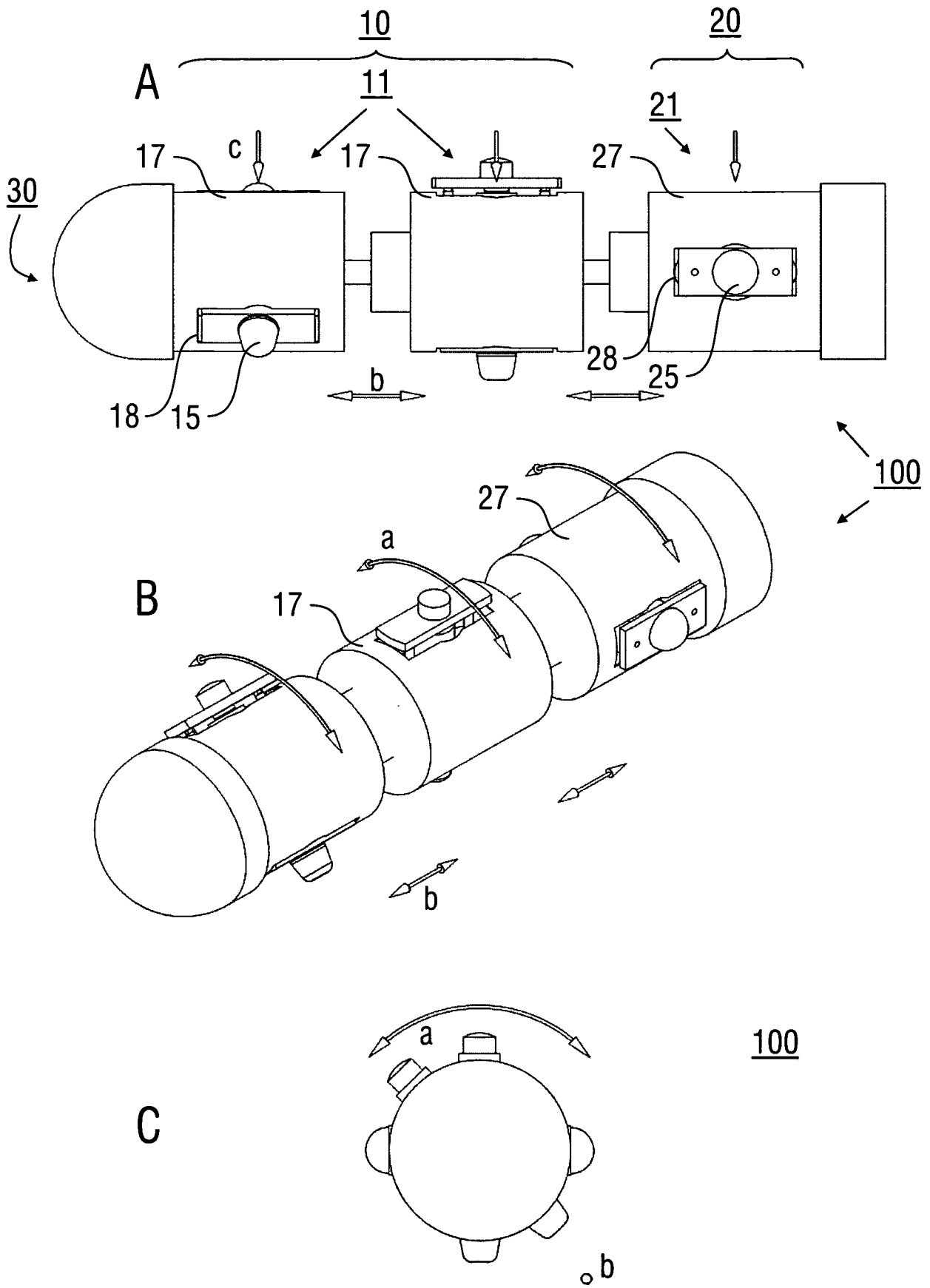


FIG. 2

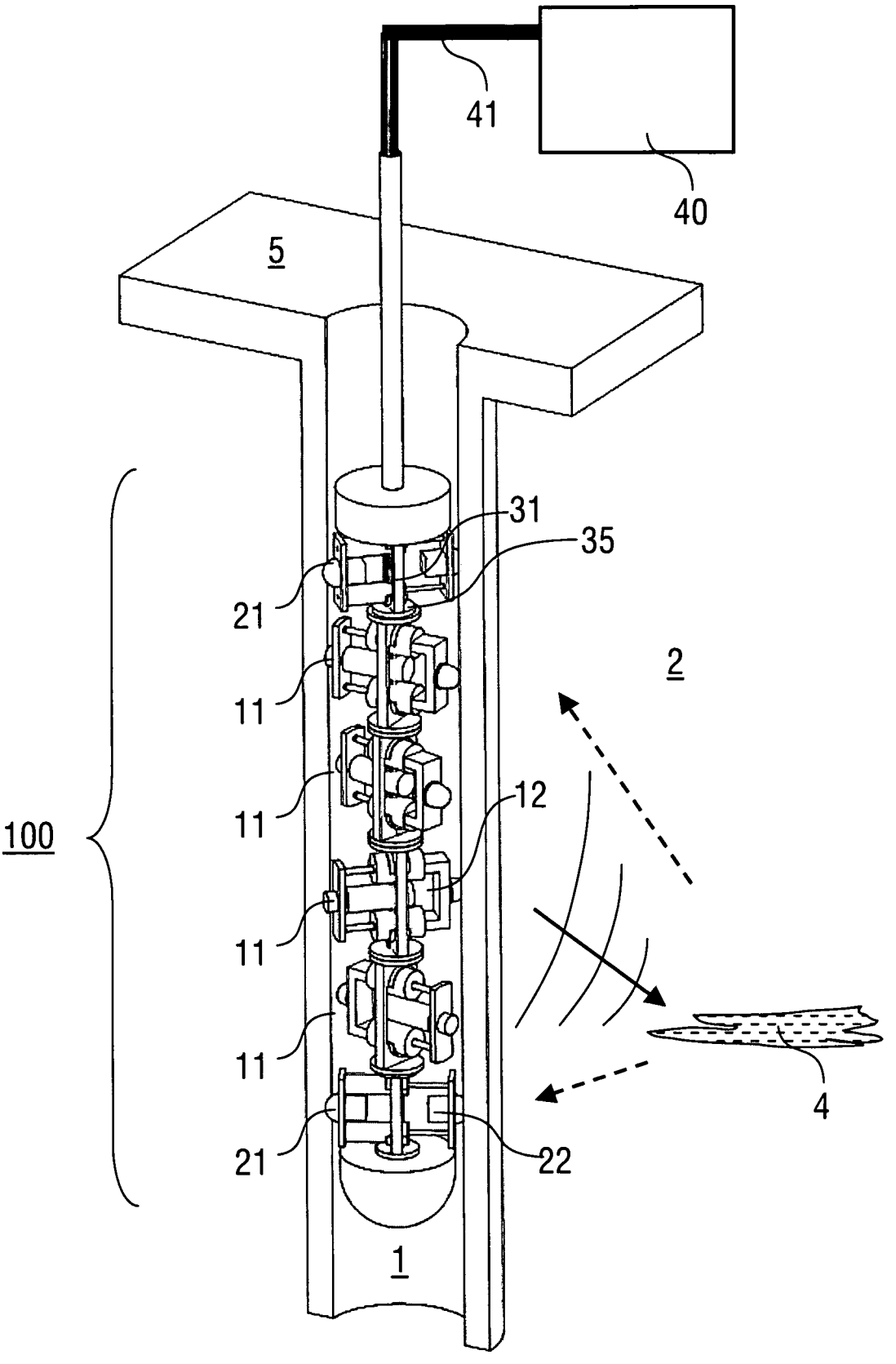


FIG. 3

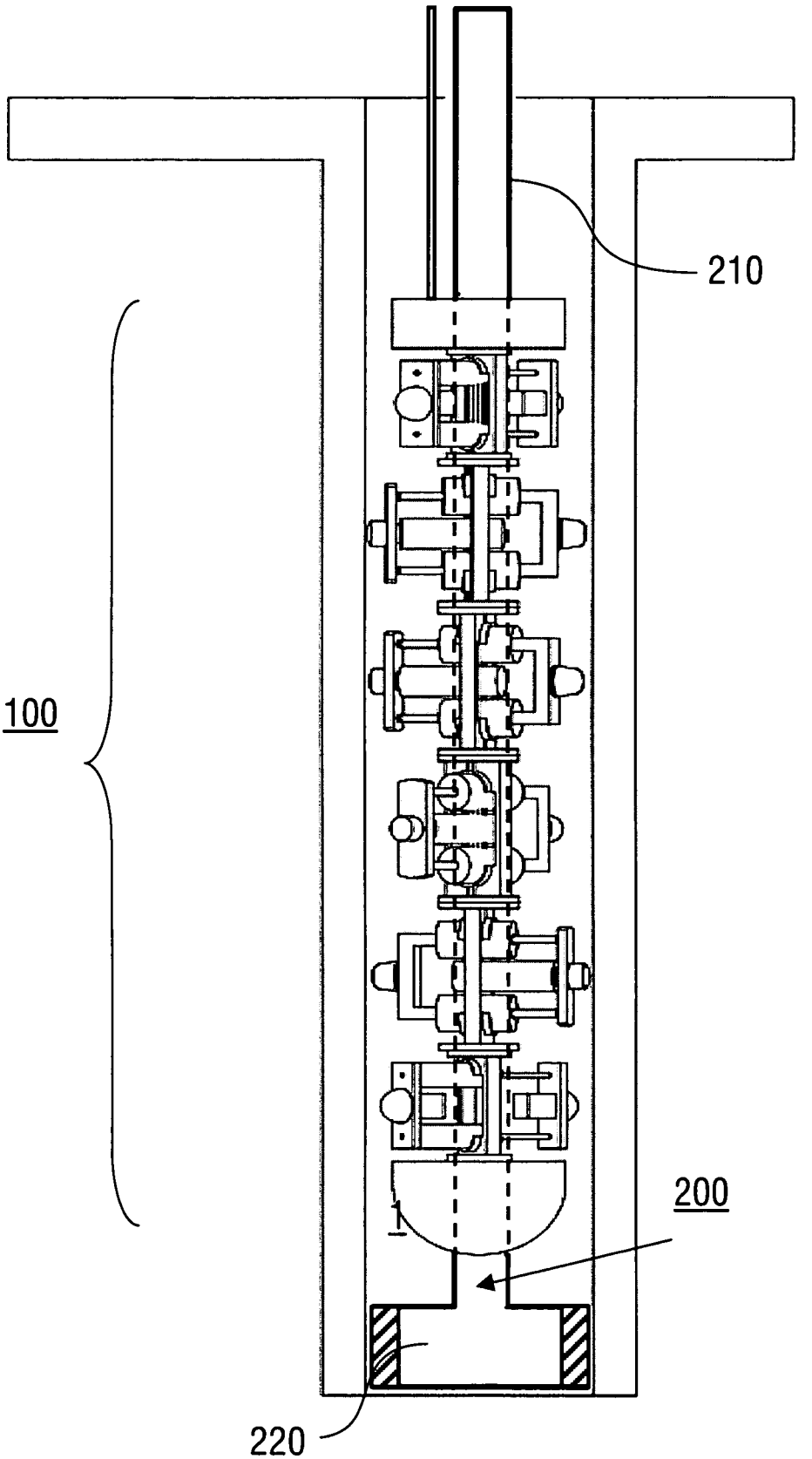


FIG. 4