



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**18.04.2018 Patentblatt 2018/16**

(51) Int Cl.:  
**E21B 47/16** (2006.01) **E21B 17/00** (2006.01)  
**G10K 11/16** (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **16193660.4**

(22) Anmeldetag: **13.10.2016**

(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 MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
**BA ME**  
Benannte Validierungsstaaten:  
**MA MD**

• **GUTIERREZ, Miguel A.**  
**10587 Berlin (DE)**  
• **KEUSGEN, Wilhelm**  
**14089 Berlin (DE)**

(74) Vertreter: **Zimmermann, Tankred Klaus et al**  
**Schoppe, Zimmermann, Stöckeler**  
**Zinkler, Schenk & Partner mbB**  
**Patentanwälte**  
**Radtkoferstrasse 2**  
**81373 München (DE)**

(71) Anmelder: **Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.**  
**80686 München (DE)**

(72) Erfinder:  
• **KRÜGER, Udo**  
**12161 Berlin (DE)**

Bemerkungen:

Geänderte Patentansprüche gemäss Regel 137(2) EPÜ.

(54) **BOHRROHR UND BOHRSTRANG ZUM ÜBERTRAGEN AKUSTISCHER SIGNALE**

(57) Ein Bohrrohr umfasst einen ersten Abschnitt mit einer ersten Wanddicke, einen zweiten Abschnitt benachbart zu einem Ende des Bohrrohrs mit einer zweiten Wanddicke, die sich von der ersten Wanddicke unterscheidet und einen dritten Abschnitt benachbart zu einem anderen Ende des Bohrrohrs, mit einer dritten Wanddicke, die sich von der ersten Wanddicke unter-

scheidet. Das Bohrrohr ist vorgesehen, um ein akustisches Signal innerhalb eines festgelegten Frequenzbereichs zu übertragen, wobei eine Ausdehnung des zweiten oder dritten Abschnitts entlang des Bohrrohrs abhängig von einem Wellenlängenbereich des zu übertragenden akustischen Signals gewählt ist.

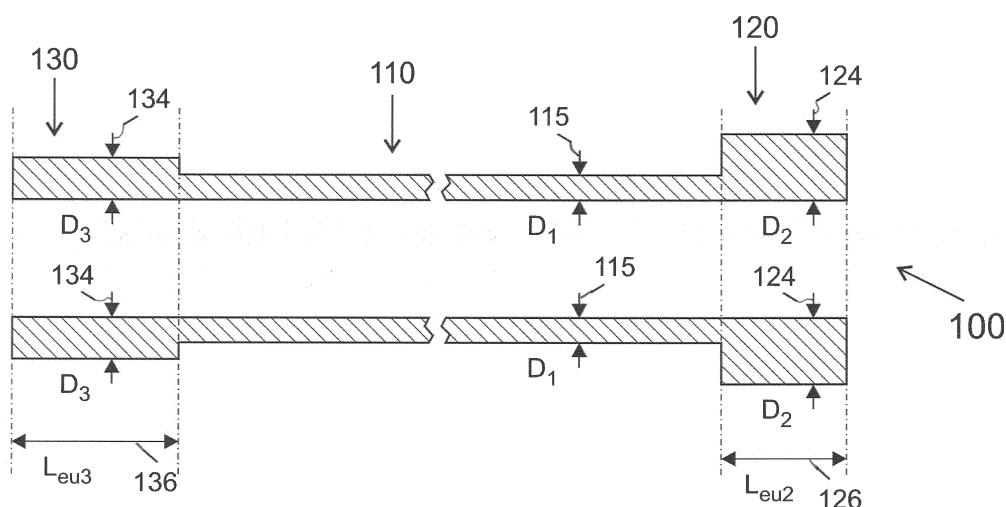


Fig. 1

## Beschreibung

### Technisches Gebiet

**[0001]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Bohrrohr, das geeignet ist, akustische Signale zu übertragen.

### Hintergrund der Erfindung

**[0002]** Bei Tiefbohrungen fallen bei den heutzutage üblichen Messungen untertage große Datenmengen an, die möglichst schnell nach übertage gesendet werden sollten, um darauf rechtzeitig reagieren zu können, z. B. um die Bohrrichtung anzupassen und damit teure Fehlbohrungen zu vermeiden. Die mit bisherigen Methoden erzielten Datenraten sind dafür jedoch zu niedrig, bzw. die Reichweiten zu gering oder beides.

**[0003]** Bisher wird zumeist die "mud-pulse"-Telemetrie verwendet, die aber nur Datenraten von wenigen Bits pro Sekunde zulässt. Dabei werden mit Hilfe von Druckänderungen in der Spülflüssigkeit die Informationen übertragen. Diese Technik ist daher nur anwendbar, wenn der Spülungskreislauf der Bohrung angeschlossen und aktiv ist.

**[0004]** Ein auf akustischen Wellen basierendes Kommunikationssystem für einen Bohrstrang wird von der kanadischen Firma XACT (<http://www.xactinc.com/>) angeboten, das auf schmalbandigen Chirp-Sequenzen basiert. Der Empfänger wird übertage am letzten Bohrröhr befestigt, d. h. mit dem Kommunikationssystem können nur Daten übertragen werden, wenn die letzte Bohrstrange montiert ist und optimal nur dann, wenn der Bohrstrang nicht mit der Spannzange am Bohrtisch gehalten wird, da die akustische Dämpfung durch das Schließen der Spannzange größer wird [1] und die Qualität der Übertragung abnimmt und damit auch die Reichweite. Mit diesem Kommunikationssystem werden Datenraten bis 30 Bit/s und vertikale Tiefen bis 2600 m erreicht (ohne zusätzlichen Repeater) [2].

**[0005]** Im Übrigen wird eine akustische Kommunikation bei tiefen Frequenzen stark durch die dort besonders großen Nichtlinearitäten der üblicherweise verwendeten akustischen Quellen und von den Bohrgeräuschen eines Bohrkopfs gestört und bei hohen Frequenzen leidet die Kommunikation durch die starke Materialdämpfung der Bohrröhre in dem Bohrstrang.

**[0006]** Daher besteht ein Bedarf nach einem Bohrröhr, das eine bessere Übertragung in einem Frequenzbereich, der weniger beeinflusst von Nichtlinearitäten von Sendern, Bohrgeräuschen und Materialdämpfung ist, ermöglicht und damit eine höhere Datenrate für große vertikale Tiefen ermöglicht.

### Zusammenfassung der Erfindung

**[0007]** Ein Ausführungsbeispiel gemäß der Erfindung schafft ein Bohrröhr, mit einem ersten Abschnitt mit einer

ersten Wanddicke und einem zweiten Abschnitt an oder benachbart zu einem Ende des Bohrröhrs mit einer zweiten Wanddicke und einem dritten Abschnitt an oder benachbart zu dem anderen Ende des Bohrröhrs mit einer dritten Wanddicke, die sich von der ersten Wanddicke unterscheiden. Des Weiteren ist das Bohrröhr vorgesehen, um ein akustisches Signal innerhalb eines festgelegten Frequenzbereichs zu übertragen, wobei eine Ausdehnung des zweiten und dritten Abschnitts entlang des Bohrröhrs abhängig von einem Wellenlängenbereich des zu übertragenden akustischen Signals gewählt ist.

**[0008]** Dieses Ausführungsbeispiel gemäß der Erfindung basiert auf der Erkenntnis, dass akustische Signale, die sich innerhalb einer metallischen Wand eines Bohrröhrs fortbewegen, an Positionen mit sprunghafter Änderung der Bewandungsdicke des Bohrröhrs teilweise reflektiert werden können. Bohrröhre können einen sogenannten elevation upset aufweisen, der mit dem zweiten und dritten Abschnitt korrespondieren, die an Enden des Bohrröhrs angeordnet sind. Diese weisen in der Regel eine höhere Wanddicke auf als das restliche Bohrröhr, um mechanische Stabilität zu gewährleisten. Sind Abschnitt zwei und drei gleich dimensioniert, ist eine direkte Verbindung mehrerer Bohrröhre möglich, wobei der sogenannte elevation upset in diesem Fall die Funktion eines Verbindungselements (tool joint) übernimmt und zur Minimierung destruktiver Interferenzen in Ausbreitungsrichtung aufgrund von Reflexionen an den Sprungstellen, ist die Wahl der Ausdehnung des zweiten Abschnitts entlang des Bohrröhrs, also des elevation upsets, abhängig von einem Wellenlängenbereich des zu übertragenden akustischen Signals vorteilhaft. Durch die beschriebene Wahl der Ausdehnung kann eine Maximierung der konstruktiven Interferenz in der Ausbreitungsrichtung erwirkt werden, was letztendlich zu einer geringeren Dämpfung oder Filterwirkung in dem genutzten Frequenzbereich führt. Durch die geringere effektive Dämpfung wird ein Signal mit einer großen Datenrate über eine große Strecke übermittelt, beispielsweise über einen Bohrstrang, der aus mehreren der beschriebenen Bohrröhre besteht. Im weiteren wird auch genutzt, dass eine maximale konstruktive Interferenz in Ausbreitungsrichtung einer maximalen destruktiven Interferenz entgegen der Ausbreitungsrichtung entspricht, also einer minimalem effektiven Reflexion.

**[0009]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung weisen der zweite und dritte Abschnitt unterschiedliche Ausdehnungen entlang des Bohrröhrs auf, hierbei ist die Wahl der addierten Ausdehnungen des zweiten und dritten Abschnitts entlang des Bohrröhrs abhängig von einem Wellenlängenbereich des zu übertragenden akustischen Signals vorteilhaft, beispielsweise ergeben die Addition der Ausdehnungen die Hälfte einer Wellenlänge des zu übertragenden akustischen Signals.

**[0010]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist die Querschnittsfläche des Bohrröhrmaterials des zweiten Abschnitts proportional zu einem akustischen Wellenwiderstand des zweiten Abschnitts. Durch geeignete Wahl

der zweiten Wanddicke kann somit ein geeigneter akustischer Wellenwiderstand realisiert werden. Beispielsweise kann ein akustischer Wellenwiderstand durch geeignete Wahl der Wanddicke des zweiten Abschnitts zu

$$Z_{eu} = \sqrt{Z_{pipe} \cdot Z_{joint}}$$

gesetzt werden, wobei  $Z_{pipe}$  der akustische Wellenwiderstand des ersten Abschnitts ist und  $Z_{joint}$  den akustischen Wellenwiderstand eines unmittelbar benachbarten Bereichs bezeichnet. Dieses kann auch analog für das andere Ende des Bohrrohrs, d. h. für die dritte Wanddicke durchgeführt werden. Durch die Anpassung des akustischen Wellenwiderstands an die Wellenwiderstände benachbarter Abschnitte kann die effektive Reflexion des akustischen Signals noch weiter reduziert werden. Durch die Reduktion der effektiven Reflexion entsteht ein Kanal, der besser zur Übertragung akustischer Signale geeignet ist. Die Reduktion der effektiven Reflexion führt ebenfalls zu einer Reduktion der Filterwirkung des Bohrrohrs, wodurch Signale weniger gedämpft werden.

**[0011]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung weisen der zweite und dritte Abschnitt einen sich verjüngenden Verlauf von dem zweiten, bzw. dritten Durchmesser des zweiten, bzw. dritten Abschnitts zu dem ersten Durchmesser des ersten Abschnitts auf. Durch den sich verjüngenden Verlauf wird die zweite, bzw. dritte Wanddicke kontinuierlich an die erste angepasst, so dass größere Sprünge in der Wanddicke vermieden werden, wodurch geringere Reflexionen entstehen.

**[0012]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung ist der sich verjüngende Verlauf ein stufenförmiger Verlauf. Ein stufenförmiger Verlauf ist kostengünstig herstellbar beispielsweise durch Auftragen von Schichten unterschiedlicher Dicke. Der Stufenförmige Verlauf ermöglicht eine bessere Handhabung des Bohrrohrs mittels eines Greifwerkzeugs.

**[0013]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist der sich verjüngende Verlauf ein linearer Verlauf. Durch einen linearen Verlauf werden Sprungstellen stark reduziert, und somit werden ebenfalls Reflexionen auf ein Minimum gebracht.

**[0014]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist die Ausdehnung des zweiten, bzw. dritten Abschnitts im Bereich von einem Viertel der Wellenlänge des Frequenzbereichs des zu übertragenden akustischen Signals gewählt. Die Wahl der Ausdehnung entsprechend einem Viertel der Wellenlänge ist vorteilhaft, um eine konstruktive Interferenz im gewünschten Frequenzbereich in Ausbreitungsrichtung zu erzeugen, die eine geringere Filterwirkung erzielt, was zu einer effektiv verringerten Signaldämpfung führt. Durch die verringerte Signaldämpfung kann leichter eine hohe Datenrate über einen langen Kanal übermittelt werden.

**[0015]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel umfasst der zweite, bzw. dritte Abschnitt einen Aufsatz, der auf dem ersten Abschnitt angeordnet ist und fest mit ihm

verbunden werden kann. Hierdurch wird ermöglicht, ein bereits vorhandenes Rohr an einen gewünschten Frequenzbereich einfach nachträglich anzupassen.

**[0016]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung ist der zweite, bzw. dritte Abschnitt einstückig mit dem ersten Abschnitt gebildet. Durch eine einstückige Fertigung werden beispielsweise Kosten gespart, da eine einstückige Fertigung schneller vollzogen werden kann, beispielsweise in demselben Fertigungsprozess wie die Fertigung des restlichen Bohrrohrs.

**[0017]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung ist ein Außendurchmesser des Bohrrohrs im zweiten, bzw. dritten Abschnitt größer oder gleich einem Außendurchmesser des ersten Abschnitts. Durch die geeignete Wahl des Außendurchmessers wird eine gewünschte Querschnittsfläche des Rohrmantels erzeugt, womit beispielsweise ein gewünschter akustischer Wellenwiderstand realisiert wird.

**[0018]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist ein Innendurchmesser im zweiten, bzw. dritten Abschnitt kleiner oder gleich einem Innendurchmesser im ersten Abschnitt. Durch eine geeignete Wahl des Innendurchmessers im zweiten, bzw. dritten Abschnitt werden größere Sprünge des Innendurchmessers vermieden, womit Reflexionen minimiert werden können. Die Veränderung des Innendurchmessers ist weiterhin vorteilhaft, da eine äußere Form des Bohrrohrs unverändert bleibt. Des Weiteren kann einhergehend mit der beschriebenen Veränderung des Innendurchmessers eine Veränderung des Außendurchmessers erfolgen. Durch beidseitige Änderung des Durchmessers wird eine flexiblere Wahl der radialen Bohrrohr Querschnittsfläche im zweiten, bzw. dritten Abschnitt ermöglicht und damit ebenfalls eine flexiblere Anpassung des akustischen Wellenwiderstands ermöglicht. Durch die beschriebenen verschiedenen Möglichkeiten einen bestimmten Wellenwiderstand zu erzeugen, kann das beschriebene Bohrrohr gut mit Erfordernissen der Bohrtechnik integriert werden, d. h. beispielsweise die nötige Stabilität erzeugt werden.

**[0019]** Gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel ist ein Bohrrohr mit einem Verbindungselement zur Verbindung mit einem weiteren Bohrrohr ausgestattet, wobei das Verbindungselement in dem zweiten Abschnitt gebildet ist oder wobei der zweite Abschnitt zwischen dem ersten Abschnitt und dem Verbindungselement angeordnet ist. Analog wird der dritte Abschnitt mit einem dazu passenden Verbindungselement ausgestattet. Das beschriebene Bohrrohr kann mittels der Verbindungselemente mit einem weiteren Bohrrohr verbunden werden, um größere Bohrstränge zu ermöglichen.

**[0020]** Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel unterscheidet sich die zweite Wanddicke des zweiten Abschnitts von einer dritten Wanddicke des dritten Abschnitts. Des Weiteren unterscheidet sich die Ausdehnung des zweiten Abschnitts von der Ausdehnung des dritten Abschnitts. Damit lassen sich unterschiedlich dimensionierte Bohrrohre für denselben Frequenzbereich anpassen. In diesem Fall hat das Bohrrohr die Funktion

eines Adapters zwischen Bohrstrangabschnitten mit unterschiedlich dimensionierten Bohrröhren.

**[0021]** Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel ist die dritte Wanddicke gleich der zweiten Wanddicke und die Ausdehnung des dritten Abschnitts gleich der Ausdehnung des zweiten Abschnitts. Durch gleiche Wahl der Wanddicken und der Ausdehnungen werden symmetrische Reflexionseigenschaften angepasst an den gewünschte Frequenzbereich realisiert.

**[0022]** Ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel gemäß der Erfindung ist ein Bohrstrang, mit einer Mehrzahl von Bohrröhren, die mittels der Verbindungselemente miteinander verbunden sind. Weiterhin weist der Bohrstrang einen akustischen Sender auf, der an einem Ende oder benachbart zu dem einen Ende des Bohrstrangs angeordnet ist. Weiterhin weist der Bohrstrang einen akustischen Empfänger auf, der an dem anderen Ende, oder an einem oberen Ende des Bohrstrangs angeordnet ist. Der beschriebene Bohrstrang überträgt Informationen vom akustischen Sender, beispielsweise in der Nähe des Bohrkopfs, zu einem akustischen Empfänger, der sich beispielsweise übertage befindet. Hierbei ermöglicht der beschriebene Bohrstrang eine Datenübertragung mit hoher Datenrate bei großen Tiefen, beziehungsweise großen Entfernungen zwischen Sender und Empfänger. Weiterhin können die beschriebenen Sender und Empfänger auch als Sende- und Empfangseinheiten ausgelegt werden, um eine bidirektionale Kommunikation zu ermöglichen.

**[0023]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist die Wanddicke der Verbindungselemente größer als die zweite Wanddicke des zweiten Abschnitts und die dritte Wanddicke des dritten Abschnitts. Dadurch, dass die Wanddicke der Verbindungselemente groß gewählt wird, widerstehen die Verbindungselemente großen mechanischen Belastungen, die beispielsweise während eines Bohrprozesses auf die Verbindungselemente wirken.

**[0024]** Ein weiteres Ausführungsbeispiel ist ein Verfahren zum Übertragen eines akustischen Signals aus einer Bohrung, mit folgenden Schritten: Bereitstellen eines Bohrstrangs und Senden des akustischen Signals über den Bohrstrang. Hierbei haben die Mehrzahl von Bohrröhren des Bohrstrangs unterschiedliche Längen und die Bohrröhre sind in beliebiger Reihenfolge angeordnet. Das beschriebene Verfahren kann eine simple Nutzung von ungeordnet vorliegenden Bohrröhren zur akustischen Datenübertragung ermöglichen.

**[0025]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist die Längenvariation der Bohrröhre im Bereich von  $\pm 0,25\text{m}$  (beispielsweise Bohrröhre mit Längen zwischen 8,894m und 9,394m). Die Einhaltung der beschriebenen Längenvariation ermöglicht, dass eine maximale Signaldämpfung des Bohrstrangs vermieden oder höchstens erreicht werden.

**[0026]** Ein Ausführungsbeispiel gemäß der Erfindung ist ein akustisches Datenübertragungssystem für Tiefbohranwendungen mit besonders geeignetem Bohrstrang.

## Figurenkurzbeschreibung

**[0027]** Ausführungsbeispiele gemäß der vorliegenden Erfindung werden nachfolgend Bezug nehmend auf die beiliegenden Figuren näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Querschnittszeichnung eines Bohrrohrs gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

Fig. 2A-C schematische Darstellungen von Bohrröhren wobei, Fig. 2A ein Bohrrohr ohne elevation upset beschreibt, Fig. 2B ein Bohrrohr mit einem herkömmlichen elevation upset beschreibt und Fig. 2C ein Bohrrohr mit einem erfindungsgemäßen elevation upset beschreibt;

Fig. 3 eine schematische Darstellung eines Bohrröhres an dem ein Verbindungselement angeordnet ist und eine Illustration der jeweiligen Querschnittsflächen;

Fig. 4A-C schematische Darstellungen von Bohrsträngen und akustischem Kommunikationssystem gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung;

Fig. 5 Graphen von Übertragungsverhalten von Bohrsträngen im Frequenzbereich in Abhängigkeit der Länge des Bohrstrangs;

Fig. 6 Graphen von Übertragungsverhalten im Frequenzbereich von Bohrsträngen umfassend Bohrröhre gemäß Fig. 2A, 2B, beziehungsweise 2C;

Fig. 7 Graphen von Übertragungsverhalten im Frequenzbereich von Bohrsträngen umfassend unangepasste Bohrröhre;

Fig. 8 Graphen von Übertragungsverhalten im Frequenzbereich von Bohrsträngen in den Bohrröhre unterschiedlich sortiert vorliegen;

Fig. 9 schematische Darstellung eines Bohrrohrs gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Fig. 10A-D schematische Darstellungen von Bohrröhren gemäß wieder weiteren Ausführungsbeispielen der Erfindung;

Fig. 11A-C schematische Darstellung von Bohrröhren und Verbindungen von Bohrröhren.

# Detaillierte Beschreibung der Ausführungsbeispiele

**[0028]** Fig. 1 zeigt ein Bohrrohr 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung. Das Bohrrohr 100 weist in einem ersten Abschnitt 110 eine erste Wanddicke  $D_1$  115 auf. In einem zweiten Abschnitt 120 weist das Bohrrohr 100 eine zweite Wanddicke  $D_2$  124 auf. Des Weiteren ist die Ausdehnung des zweiten Abschnitts 120 entlang des Bohrrohrs 100 in der Länge gleich  $L_{eu2}$  126. In einem dritten Abschnitt 130 weist das Bohrrohr 100 eine dritte Wanddicke  $D_3$  134 auf. Des Weiteren ist die Ausdehnung des dritten Abschnitts 130 entlang des Bohrrohrs 100 in der Länge gleich  $L_{eu3}$  136. Im Weiteren werden der zweite und dritte Abschnitt 120, 130 jeweils auch als elevation upset bezeichnet.

**[0029]** Zur Übertragung des akustischen Signals in einem festgelegten Frequenzbereich über das Bohrrohr 100 sind die Ausdehnungen  $L_{eu2}$  126 und  $L_{eu3}$  136 abhängig von einer Wellenlänge  $\lambda$  des Wellenlängenbereichs des zu übertragenden akustischen Signals gewählt. Die Wellenlänge  $\lambda$  des akustischen Signals ist invers proportional zu der Frequenz  $f$  des Signals, das heißt  $\lambda = c/f$ , wobei  $c$  die Schallgeschwindigkeit des Mediums ist. Die Wahl der Ausdehnungen  $L_{eu2}$  126 und  $L_{eu3}$  136, abhängig von der Wellenlänge  $\lambda$ , insbesondere zu einem Viertel der Wellenlänge  $\lambda/4$  (siehe  $\lambda/4$ -Transformator), verringert Filterverluste entlang des Bohrrohrs die auf das zu übertragende Signal wirken. Insbesondere sind diese Filterverluste dadurch reduziert, da die beschriebene Wahl der Ausdehnungen 126 und 136 bevorzugt zu konstruktiven Interferenzen im genutzten Frequenzbereich in Ausbreitungsrichtung führen, beziehungsweise destruktive Interferenzen vermieden werden, die zu einer kompletten Unterdrückung gewisser Frequenzbereiche führen können. Des Weiteren sind die beschriebenen Wanddicken  $D_2$  124 und  $D_3$  134 des elevation upsets 120, 130 größer als die Wanddicke  $D_1$  115. Hierdurch wird eine Anpassung an Verbindungselemente, die an dem elevation upset 120, 130 angeordnet sein können und eine größere Wanddicke als die Abschnitte 110, 120 und 130 aufweisen, ermöglicht. Insbesondere bedeutet Anpassung hier, dass für bestimmte Frequenzbereiche die Sprungstellen der radialen Querschnittsfläche zu derartigen Reflektionen des akustischen Signals führen, dass es zu vollständiger destruktiver Interferenz entgegen der Ausbreitungsrichtung kommt. Die beschriebenen Sprungstellen entstehen im Übergang zwischen herkömmlichen Bohrröhren und daran optional angeordneten Verbindungselementen auf Grund der beschriebenen unterschiedlichen Bewandungsdicken von Bohrrohr und Verbindungselement. Mittels des beschriebenen elevation upset, wird die Querschnittsfläche des Bohrrohrs in dem Bereich erhöht, benachbart zu dem ein Verbindungsstück angebracht werden kann, um Reflexionen einer zusätzlichen Reflexionsstelle zu erzeugen, die für einen bestimmten Frequenzbereich und überlagert mit den restlichen Reflexionen zu einer destruktiven Interferenz entgegen der Ausbreitungsrichtung führen.

**[0030]** Fig. 2A zeigt eine schematische Darstellung eines Bohrrohrs 200a, ohne einen zweiten Abschnitt beziehungsweise elevation upset, an dem ein Verbindungselement 250, auch tool-joint genannt, angeordnet ist. Das Verbindungselement weist einen höheren Außendurchmesser als das Bohrrohr auf, wodurch an der Verbindungsstelle ein großer Sprung der Querschnittsfläche entsteht, der Reflektionen des akustischen Signals bewirkt.

**[0031]** Fig. 2B zeigt eine schematische Darstellung eines Bohrrohrs 200b an dem ein Verbindungselement 250 angeordnet ist, wobei das Bohrrohr einen herkömmlichen elevation upset 210b aufweist. Das elevation upset 210b führt eine gewisse Anpassung herbei, da die Sprünge an den Übergängen Bohrrohr-elevation upset und elevation upset-Verbindungselement geringer sind als der Sprung in Fig. 2A. Bezüglich seiner Ausdehnung und Dicke ist aber der elevation upset 210b so ausgelegt, dass eine gute Handhabung des Bohrrohrs durch ein Greifwerkzeug ermöglicht ist, für eine verbesserte Übertragung in dem Frequenzbereich des akustischen Signals ist der elevation upset nicht vorgesehen und auch nicht ausgelegt.

**[0032]** Fig. 2C zeigt eine schematische Darstellung eines Bohrrohrs 200c gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, an dem ein Verbindungselement 250 angeordnet ist. Das Bohrrohr 200c weist einen elevation upset 210c auf, dessen Ausdehnung  $L_{eu}$  220 gemäß einem Viertel einer Wellenlänge des Wellenlängenbereichs des akustischen Signals gewählt ist. Weiterhin sind akustische Wellenwiderstände proportional zu der Querschnittsfläche des Mediums senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle, und daher ist ein weiterer Aspekt die Anpassung der Querschnittsflächen zur Reduktion der effektiven Reflektion. Hierzu wird die Querschnittsfläche  $F_{eu}$  230, des elevation upsets 210c, mittels der Wanddicke so ausgelegt, dass ein akustischer Wellenwiderstand realisiert wird, der der Quadratwurzel des Produkts der Wellenwiderstände des Bohrrohrs ohne elevation upset und dem Verbindungselement ent-

spricht, d.h.  $Z_{eu} = \sqrt{Z_{pipe} \cdot Z_{joint}}$ . Durch diese Dimensionierung wird gewährleistet, dass die Reflexionen an den beiden Enden eines elevation upsets, d. h. an den Enden von Abschnitt 2 und Abschnitt 3, gleich sind.

**[0033]** Das beschriebene Verhältnis von Querschnittsflächen ist in Fig. 3 illustriert anhand des Bohrrohrs 310 und des Verbindungselements 320. Die jeweiligen radialen Querschnittsflächen 315 und 325 sind dargestellt und abhängig von dem Verhältnis ihrer Flächeninhalte ist das Verhältnis der akustischen Wellenwiderstände von  $Z_{joint}/Z_{pipe} \approx 3,5$ . Ein Wert des Verhältnisses nahe 1 kennzeichnet eine gute Anpassung. Durch Einfügen des elevation upsets 210c in Fig. 2C wird die Anzahl der Sprungstellen größer und die Verhältnisse der Wellenwiderstände an den Sprungstellen werden Werte annehmen, die näher an 1 liegen als ohne den elevation upset

210c, womit im Mittel per se schon eine bessere Anpassung und damit geringere Reflexionen erzielt werden. Der wesentliche Anteil zu einer guten Anpassung erfolgt mit einer gezielten Beeinflussung der richtungsabhängigen Interferenzen.

**[0034]** Fig. 4A zeigt einen Bohrstrang 400a, der aus einer Mehrzahl der beschriebenen Bohrröhre 100 oder 200c besteht. Der Bohrstrang 400a ist an einem Bohrturm 410 befestigt, um eine Tiefenbohrung auszuführen. Der Bohrstrang 400a weist einen Bohrkopf 402, eine Sendeeinheit 404a, die beispielsweise benachbart zum Bohrkopf 402 angeordnet ist, sowie eine Empfangseinheit 406a auf, die oberhalb eines Bohrtisches 408 angeordnet ist. Der Bohrtisch weist eine Zange auf, die den Anbau weiterer Bohrröhre an den Bohrstrang 400a ermöglicht. Zwischen der Sendeeinheit 404a besteht ein unidirektionaler Kanal entlang des Bohrstrangs, über den mittels akustischer Signale, Daten an die Empfangseinheit 406a gesendet werden. Die Daten der Empfangseinheit 406a können beispielsweise per Funk an einen Rechner 415a übermittelt werden. Die Übertragung per Funk ist bevorzugt bei Anordnung der Empfangseinheit 406a an einem oberen Ende des Bohrstrangs 400a, da dieser sich in einem Bohrprozess drehen kann. Durch Einsatz der Bohrröhre 100, oder 200c kann ein verlässlicher akustischer Kanal in einem festgelegten Frequenzbereich des akustischen Signals, gesendet durch den Sender 404a, erreicht werden. Insbesondere können durch die Ausstattung der beschriebenen Bohrröhre mit dem zweiten und dem dritten Abschnitt Reflexionen des Signals, die zu destruktiver Interferenz in Ausbreitungsrichtung führen, vermieden werden.

**[0035]** Fig. 4B zeigt einen Bohrstrang 400b mit den entsprechenden Merkmalen des Bohrstrangs 400a, der an einem Bohrturm 410 befestigt ist. Der Bohrstrang 400b weist eine Sende- und Empfangseinheit 404b auf, die beispielsweise benachbart zu dem Bohrkopf 402 angeordnet ist. Des Weiteren weist der Bohrstrang 400b eine weitere Sende- und Empfangseinheit 406b auf, die Daten über den akustischen Kanal, bzw. den Bohrstrang 400b, von der Sende- und Empfangseinheit 404b erhält. Weiterhin kann die Sende- und Empfangseinheit 406b Daten an die Sende- und Empfangseinheit 404b übermitteln, womit eine bidirektionale Kommunikation ermöglicht wird. Da die Sende- und Empfangseinheit 406b bevorzugt benachbart zu dem oberen Ende des Bohrstrangs 400b unter dem Bohrtisch 408 angebracht ist, bietet sich für eine Übermittlung der Daten an einen Rechner 415b bevorzugt eine kabelgebundene Übertragung an. Weiterhin ist die kabelgebundene Verbindung bevorzugt, da die in Fig. 4B dargestellt Kommunikation bevorzugt stattfindet wenn das Bohrrohr 400b sich in Ruhe befindet und mittels der Zange im Bohrtisch 408 festgehalten wird. Des Weiteren kann mittels der Kabelverbindung eine Energieversorgung für die Sende- und Empfangseinheit 406b bereitgestellt werden. Hinzukommend kann die Sende- und Empfangseinheit 406b bevorzugt genutzt werden wenn der Bohrstrang sich in Ru-

he befindet, also kein Bohrprozess stattfindet, hierbei bietet sich eine störsichere kabelgebundene Übertragung vorteilhaft an.

**[0036]** In Fig. 4C ist ein Bohrstrang 400c dargestellt, der hinsichtlich seiner Funktionalität eine Kombination der beiden Bohrstränge 400a und 400b darstellt. Sowohl eine unidirektionale Verbindung mittels der Empfangseinheit 406a sowie eine bidirektionale Verbindung mittels der Sende- und Empfangseinheit 406b zur Sende- und Empfangseinheit 404c ist hiermit möglich. Die Empfangseinheit 406a und die Sende- und Empfangseinheit 406b ermöglichen eine Kombination der Konzepte, die in Fig. 4A und Fig. 4B dargestellt wurden, und kommunizieren entsprechend mit einer Rechneinheit 415c. Der beschriebene Bohrstrang 400c ermöglicht einen robusten Empfang von Daten aus der Sende- und Empfangseinheit 404a über den unidirektionalen Kanal, beispielsweise während eines Bohrprozesses. Der bidirektionale Kanal, der durch die Sende- und Empfangseinheit 404b genutzt wird, kann beispielsweise genutzt werden um große Datenmengen während einer Unterbrechung eines Bohrprozesses an die Sende- und Empfangseinheit 406b zu übermitteln.

**[0037]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel wird ein Datenübertragungssystem genutzt um mittels akustischer Wellen entlang des Bohrstrangs, z. B. vorteilhaft zusammen mit dem Modulationsformat OFDM, Daten von untertage nach ober- oder ober- und untertage zu transportieren. Dabei sind grundsätzlich zwei Betriebsarten zu unterscheiden.

1. Datenübertragung während des Bohrprozesses, die durch zusätzliche Störgeräusche erheblich beeinträchtigt wird. Um diesen schwierigen Randbedingungen gerecht zu werden, muss eine sehr robuste Übertragungsmethode benutzt werden, wie z. B. die in [3] eingeführte, sehr robuste, breitbandige, unidirektionale OFDM-Übertragungsmethode. Dieses Übertragungsverfahren erlaubt Datenraten im Bereich von wenigen bit/s bis über 100 bit/s, je nach Parametersatz. Der Empfänger 406a kann z. B. als Manschette um das letzte Bohrrohr gelegt und über WLAN mit einem Terminalrechner verbunden werden.

2. Datenübertragung während des Stillstands des Bohrstrangs, der sich z. B. dann ergibt, wenn eine weitere Bohrstange, oder Bohrrohr, angebaut werden soll. Dazu wird im Allgemeinen die Spannzange im Bohrtisch 408 betätigt, um den restlichen Bohrstrang festzuhalten. Zusammen mit dieser Spannzange am Bohrtisch können vorteilhaft auch akustische Sender und Empfänger 406b an den Bohrstrang 400b,c angepresst werden. Da nun weder gebohrt, noch die Spülung betrieben wird, sind die Störgeräusche gering und es kann eine hochratige Übertragung mit der Untertagestation aufgebaut werden, wie z. B. die in [4] beschriebene, adaptive, bidirektionale OFDM-Übertragung, wobei Datenraten bis zu

einigen kbit/s erzielt werden können.

**[0038]** Beide Verfahren zur Datenübertragung können vorteilhaft miteinander verbunden werden und erlauben somit eine höhere, mittlere Gesamtdatenrate und eine nahezu unterbrechungsfreie Datenübertragung. Die Figuren 4A-C zeigen schematisch die drei möglichen Datenübertragungssysteme.

**[0039]** Für ein System nach Fig. 4C kann die Auswahl, welches der Kommunikationssysteme gerade aktiv sein soll, z. B. anhand der Empfangssignale der Untertagestation 404c festgelegt werden. Während des robusten, unidirektionalen Modus, bei dem eigentlich kein Rückkanal vorgesehen ist, wird dazu in der Untertagestation 404c periodisch der Sender ausgeschaltet und der Empfänger abgefragt, damit, falls entsprechende Befehle von der Überstation 406b gesendet und an der Untertagestation 404c empfangen werden, in den bidirektionalen Modus umgeschaltet werden kann. Sollten dagegen während des bidirektionalen Betriebs über einen längeren Zeitraum keine Steuerbefehle mehr an der Untertagestation 404c ankommen oder andere, vorher definierte Kriterien vorliegen, z. B. starke Störsignale, so schaltet die Untertagestation 404c von selber in den robusten, unidirektionalen Modus um. Die Rechneinheit 415c an der Überstation 406b oder 406a kann dabei an bestimmten Kriterien der Empfangssignale (z. B. Art der Beladung oder Piloten) erkennen, welcher Modus gerade von der Untertagestation 404c gesendet wird und entsprechende Empfangsroutinen einsetzen. Um die Betriebssicherheit noch weiter zu erhöhen, ist denkbar, dass wichtige Systembefehle zusätzlich mit anderen Technologien übertragen werden, z. B. über die Spülung mit der mud-pulse Telemetry.

**[0040]** Für viele Tiefbohranwendungen wird die Reichweite des Kommunikationssystems nicht ausreichen. Wird jedoch ein Bohrstrang gemäß Ausführungsbeispielen der Erfindung eingesetzt, der mittels Bohrrohren 100 oder 200c gemäß Ausführungsbeispielen der Erfindung gewonnen werden kann, werden die Kanaleigenschaften für eine akustische Übertragung deutlich verbessert und insbesondere die Reichweiten der Datenübertragungsverfahren der Systeme in Figuren 4A-C wesentlich größer.

**[0041]** Fig. 5 zeigt Messungen von Betragsfrequenzgängen 500a bis 500g akustischer Kanäle, die über einen Bohrstrang realisiert sind, beispielsweise die Bohrstränge 400a-c [1]. Die Länge der Bohrstränge steigt von dem Betragsfrequenzgang 500a, beginnend bei 520 m, zum Betragsfrequenzgang 500g jeweils um 260 m an, womit eine maximale Bohrstranglänge von 2030 m erreicht wird. Messungen der Kanaleigenschaften deuten darauf hin, dass die Dämpfung des akustischen Kanals aufgrund von Materialdämpfung mit der Frequenz ansteigt, in anderen Worten das Material des Bohrrohrs hat Tiefpasscharakteristik.

**[0042]** Ein günstiger Frequenzbereich zur Übertragung von Daten ergibt sich, wenn der Bohrstrang trans-

parent wird, d. h. in diesem Frequenzbereich wirkt dann nur noch seine Materialdämpfung, die Filterdämpfung aufgrund seiner zahlreichen Fabry-Perot-Resonatoren, gebildet durch die sich ständig abwechselnden pipe- und tool-joint-Bereiche, ist dann vernachlässigbar, wobei ein tool-joint ein Verbindungselement bezeichnet und ein pipe ein Bohrrohr. Transparenz wird z. B. erreicht, wenn die Fabry-Perot-Resonatoren der kürzeren, zusammengeschraubten tool-joint Verbinder (vgl. Verbindungselement 250) gerade in Resonanz sind [5]. Insofern lässt sich jeder beliebige Frequenzbereich dadurch anpassen, dass die tool joint Verbinder eine entsprechende Länge annehmen (z. B. je  $\lambda/4$ , also zusammengeschraubt  $\lambda/2$ ), was aber zu langen tool joint Verbindern führt, aber für spezielle Bohrrohre denkbar ist. Auch ist die Reichweite und die Bandbreite nicht so groß wie bei der Lösung mit einem zusätzlichen elevation upset. Für einen typischen Bohrstrang ohne elevation upset, der dem zweiten oder dritten Abschnitt des Bohrrohrs entspricht, ist dies im Bereich von 5000 Hz bis 6000 Hz der Fall. Mit einem typischen elevation upset liegt diese Resonanz immer noch in diesem Bereich, wird aber spektral breiter. Dabei bezeichnet ein elevation upset einen verstärkten Bereich hinter jedem tool-joint-Verbinder eines Bohrrohrs, der ein robusteres Hantieren mit den Bohrrohren erlaubt.

**[0043]** Messungen der Kanaleigenschaften deuten darauf hin, dass die akustische Materialdämpfung mit der Frequenz ansteigt (vgl. Fig. 5). Simulationen und Messungen haben außerdem gezeigt, dass die Dämpfung aufgrund von Schwankungen der Länge der Bohrrohre ebenfalls mit der Frequenz größer wird [6]. Insofern werden sich kleinere akustische Frequenzen zur Datenübertragung über sehr große Strecken besser eignen als hohe akustische Frequenzen. Dies wird besonders deutlich im Betragsfrequenzgang 500g, da oberhalb von ca. 3000 Hz keine signifikante Durchlässigkeit, oder Transparenz, des Kanals mehr feststellbar ist.

**[0044]** Dem entgegen stehen aber die Eigenschaften eines Senders, der beliebig tiefe Frequenzen nicht mit genügender akustischer Leistung im Bohrrohr erzeugen kann und der für kleinere Frequenzen auch besonders nichtlinear wird, was die Qualität der Übertragung verschlechtert oder ganz unmöglich macht. Insofern ist ein Bereich von beispielsweise 500 Hz bis 2000 Hz günstig für eine akustische Datenübertragung und es wäre vorteilhaft dort einen transparenten, beziehungsweise durchlässigen, Bereich zu erzeugen.

**[0045]** Gemäß Ausführungsbeispielen ist der elevation upset in besonderer Weise dimensioniert, so dass sogar die Frequenzen, an denen der Bohrstrang transparent wird, in weiten Teilen bestimmt und eingestellt werden kann. Dabei entspricht die Dimensionierung der eines  $\lambda/4$  Transformators, der aus der Mikrowellentechnik bekannt ist. D. h. die Länge  $L_{eu}$  des elevation upset ergibt sich aus der gewünschten Frequenz, genauer zu  $\lambda/4$  davon, und der Wellenwiderstand zu

$Z_{eu} = \sqrt{Z_{pipe} \cdot Z_{joint}}$ , wobei  $Z_{pipe}$  bzw.  $Z_{joint}$  den akustischen Wellenwiderstand des pipe- bzw. joint-Bereiches bezeichnen. Der akustische Wellenwiderstand ist dabei in etwa proportional zur Querschnittsfläche des jeweils betrachteten Abschnitts des Bohrrohrs, z. B. ist die Querschnittsfläche  $F_{eu}$  des elevation upset in etwa proportional zum Wellenwiderstand  $Z_{eu}$  [7].

**[0046]** Fig. 6 zeigt simulierte Betragsfrequenzgänge unterschiedlicher Bohrstränge. Der Betragsfrequenzgang 600a ist charakteristisch für einen Bohrstrang, der aus Bohrrohren 200a gebildet wird ohne elevation upset. Die horizontale Linie 610 kennzeichnet eine Empfängersensitivität oder Empfängerempfindlichkeit, d. h. Frequenzanteile deren Betrag unterhalb dieser Linie liegen, können von einem Empfänger nicht empfangen werden.

**[0047]** Der Betragsfrequenzgang 600a zeigt in einem besonders für Datenübertragung geeigneten Frequenzbereich von beispielsweise 500 Hz bis 2000 Hz keinen nennenswerten Betrag auf. Frequenzen unter 500 Hz sind für die Übertragung innerhalb eines Bohrstrangs weniger geeignet, da sie stark durch Bohrgeräusche überlagert werden. Frequenzen oberhalb von 2000 Hz wiederum erleiden durch die starke Materialdämpfung des Bohrstrangs eine zu hohe Dämpfung, um effektiv für Kommunikation genutzt werden zu können. Daher ist der mit Betragsfrequenzgang 600a charakterisierte Bohrstrang weniger für eine robuste Kommunikation geeignet.

**[0048]** Betragsfrequenzgang 600b beschreibt einen Bohrstrang, bei dem Bohrrohre 200b, die einen elevation upset aufweisen, verwendet werden, der elevation upset jedoch nicht an den Wellenlängenbereich, der dem Frequenzbereich von 500 bis 2000 Hz entspricht, angepasst ist. Diese sogenannte Fehlanpassung zeigt sich durch eine Verstärkung der Anteile im Frequenzbereich oberhalb von 3500 Hz im Vergleich zum Betragsfrequenzgang 600a.

**[0049]** Der Betragsfrequenzgang 600c beschreibt einen Bohrstrang, der aus Bohrrohren 200c besteht, die den beschriebenen elevation upset aufweisen. Der Betragsfrequenzgang 600c zeigt, dass ein solcher Bohrstrang in dem Frequenzbereich von 500 Hz bis 2000 Hz einen signifikanten Betrag, der größer als die Empfängersensitivität 610 ist, aufweist. Hierdurch kann eine akustische Kommunikation über den Bohrstrang in dem betrachteten Frequenzbereich sichergestellt werden.

**[0050]** In Fig. 6 wurde ein Bohrstrang, bestehend aus 600 30'-Bohrrohren, Länge  $\approx 5,5$  km, Dämpfung  $a_{BS} = 20$  dB/km, Wellengeschwindigkeit  $v_{AW} = 5130$  m/s, simuliert, wobei die drei Fälle nach Fig. 2 untersucht wurden. Ergebnisse dazu zeigt Fig. 6, wobei die Linie 610 einer typischen Empfängerempfindlichkeit entsprechen soll, d. h. alle Spektralanteile, bei denen die Kanalcharakteristik oberhalb der Linie 610 liegt, können empfangen werden, alle anderen nicht.

**[0051]** Ist kein elevation upset am Bohrrohr vorhanden

200a, ergibt sich im gewünschten Zielbereich (500 - 2000 Hz) kein erfolgreicher Empfangsbereich, siehe Betragsfrequenzgang 600a. Dies ändert sich auch nicht mit einem typisch dimensionierten elevation upset, entsprechend Bohrrohr 200b, obwohl der erfolgreiche Bereich größer wird, siehe Betragsfrequenzgang 600b. Wird dagegen der elevation upset auf 0,8 m verlängert und die Dicke entsprechend einem  $\lambda/4$ -Transformator gewählt, entsprechend Bohrrohr 200c, ergibt sich ein transparenter Bereich im Zielbereich, siehe Betragsfrequenzgang 600c ( $\lambda/4 = 0,8$  m  $\rightarrow$  1600 Hz).

**[0052]** Des Weiteren sind die Betragsfrequenzgänge in Fig. 6 Simulationsergebnisse für die Kanalcharakteristiken eines Bohrstrangs aus 600 Bohrrohren der Länge 30' (30'  $\approx 9,14$  m, d. h. insgesamt 5486 m; Linie 610 = typische Empfindlichkeit eines Empfängers):

600a: ohne elevation upset;

600b: mit typischem elevation upset ( $L_{eu} = 25$  cm,  $Z_{eu}/Z_{pipe} = 1,5$ );

600c: mit optimiertem elevation upset ( $L_{eu} = 80$  cm,

$$Z_{eu} = \sqrt{Z_{pipe} \cdot Z_{joint}}).$$

**[0053]** Fig. 7 zeigt Betragsfrequenzgänge 700a und 700b unterschiedlicher Bohrstränge auf.

**[0054]** Der Betragsfrequenzgang 700a charakterisiert einen Bohrstrang, der aus Bohrrohren 710a besteht die einen elevation upset aufweisen deren Ausdehnung entsprechend der Wellenlänge gewählt wurde, aber ihre Wanddicken nicht vorteilhaft gewählt sind. Dadurch bleibt der Betragsfrequenzgang 700a in dem Bereich von 500 Hz bis 2000 Hz unterhalb der Empfängersensitivität 610.

**[0055]** Die Betragsfrequenzgänge 720b und 730b in Graph 700b, charakterisieren Bohrstränge, deren Bohrrohre elevation upsets aufweisen, die weder in der Länge, also in der Ausdehnung noch in der Wanddicke vorteilhaft gewählt sind. Dies hat zur Folge, dass in dem Bereich von 500 Hz bis 2000 Hz kein nennenswerter Betrag über der Empfängersensitivität 610 erkennbar ist und somit kaum eine Datenübertragung in diesem Frequenzbereich realisierbar ist.

**[0056]** Fig. 8 zeigt Graphen 800a-c, die jeweils simulierte Betragsfrequenzgänge unterschiedlicher Bohrstränge zeigen. Der Betragsfrequenzgang 810a in Graph 800a charakterisiert einen Bohrstrang, der aus Bohrrohren besteht, die elevation upsets an ihren Enden aufweisen, wobei die Bohrrohre alle die gleiche Länge aufweisen. Betragsfrequenzgang 820a beschreibt einen Bohrstrang, der sich von dem durch Betragsfrequenzgang 810a beschriebenen Bohrstrang dadurch unterscheidet, dass die Bohrrohre um bis zu 0,5 m und die Verbindungselemente um bis zu 1 cm in ihrer Länge variieren können. Des Weiteren sind die Bohrrohre in dem durch den Be-



tragsfrequenzgang 820a beschriebenen Bohrstrang entsprechend ihrer Länge angeordnet. Der Betragsfrequenzgang 830a beschreibt einen Bohrstrang, der dem Bohrstrang entspricht, der mit dem Betragsfrequenzgang 820a beschrieben ist, wobei die einzelnen Bohrrohre ungeordnet bezüglich ihrer Länge im Bohrstrang angeordnet sind. Es ist ersichtlich, dass der Betragsfrequenzgang 810a den größten Anteil oberhalb der Empfängersensitivität 610 aufweist. Weiterhin bietet der sortierte Bohrstrang beschrieben durch den Betragsfrequenzgang 820a ebenfalls einen signifikanten Anteil in dem Bereich von 500 Hz bis 2000 Hz über der Empfängersensitivität 610. Der durch den Betragsfrequenzgang 830a beschriebene Bohrstrang mit unsortiert vorliegenden Bohrrohren bietet nur einen geringen spektralen Bereich an, in dem der Betrag größer als die Empfängersensitivität 610 ist. Zusammenfassend kann durch Sortierung herkömmlicher Bohrrohre eine bessere Kanalcharakteristik erreicht werden.

[0057] Graph 800b beinhaltet Betragsfrequenzgänge 810b, 820b und 830b, die analog sind zu den Betragsfrequenzgängen 810a, 820a und 830a. Die beschriebenen Bohrstränge unterscheiden sich allein dadurch, dass die verwendeten Bohrrohre elevation upsets aufweisen, die an den Frequenzbereich von 500 Hz bis 2000 Hz angepasst sind entsprechend Bohrrohr 200c. Die Betragsfrequenzgänge 810b, 820b und 830b bieten in dem Frequenzbereich von 500 Hz bis 2000 Hz eine ähnliche Übertragungscharakteristik an. Hiermit kann zusammenfassend gesagt werden, dass ein Bohrstrang, der aus den beschriebenen Bohrrohren 200c besteht, keiner Sortierung der Bohrrohre nach Länge bedarf, um eine vorteilhafte Übertragungscharakteristik aufzuweisen.

[0058] In Graph 800c sind Betragsfrequenzgänge 810c, 820c und 830c aufgetragen. Die Betragsfrequenzgänge 810c, 820c und 830c sind analog zu den Betragsfrequenzgängen 810b, 820b und 830b, wobei die Gesamtbohrstranglänge verdoppelt wurde. Hierdurch steigt die Gesamtdämpfung des Kanals um ca. 60 dB, wodurch in dem betrachteten Bereich von 500 Hz bis 2000 Hz nur noch eine Übertragung mit geringer Datenrate möglich ist.

[0059] Für kürzere Bohrstranglängen ergeben sich deutliche Vorteile durch Sortierung bei konventionellen Bohrrohren, siehe Graph 800a. Nimmt man Längenvariation der Elemente eines Bohrstrangs an, so zeigt sich, dass der Bohrstrang basierend auf Bohrrohren 200c mit dem optimierten elevation upset wesentlich toleranter gegenüber diesen Längenschwankungen ist, verglichen zu dem Bohrstrang basierend auf Bohrrohren 200b, der mit den typischen elevation upset ausgestattet ist, was z. B. in Graphen 800a und 800b gut zu sehen ist. Die angenommenen Variation der pipe, bzw. Bohrrohre, ist für die Simulationszwecke auf 0,5m und für die tool joint, bzw. Verbindungselement, Länge auf 1cm beschränkt, jeweils gleichverteilt. Die Variationen können in der Realität beispielsweise Herstellungstoleranzen sein. Längeneränderungen ergeben sich aber auch aufgrund der

enormen Zug- und Druckkräfte, abhängig von der Position des Bohrrohrs im Bohrstrang, und den von der Tiefe abhängigen Temperaturen, die ca. um 30°C pro 1000 m zunimmt.

5 [0060] Fig. 8 zeigt Simulationsergebnisse für die Kanalcharakteristik eines Bohrstrangs aus 300 Bohrrohren der Länge 30' (30' ≈ 9,14 m, d. h. insgesamt etwa 2750 m; Linie 610 =typische Empfindlichkeit eines Empfängers):

10 800a: mit typischem elevation upset ( $L_{eu}=25$  cm,  $Z_{eu}/Z_{pipe}=1,87$ );  
800b: mit optimiertem elevation upset ( $L_{eu}=80$  cm,  $Z_{eu}=\sqrt{Z_{pipe} \cdot Z_{joint}}$ );  
15 800c: wie 800b, aber für 600 Bohrrohre.

Für die Kurven 810a-c wurden keine Längenschwankungen angenommen, wohingegen bei den Kurven 820a-c und 830a-c die pipe Länge um maximal 0,5 m und die tool joint Länge um maximal 1 cm jeweils schwanken dürfen (gleichverteilt). Die Kurven 820a-c ergeben sich, wenn die Bohrrohre der Länge nach sortiert in den Bohrstrang eingebaut werden.

20 [0061] Fig. 9 zeigt ein Bohrrohr 900, das dem Bohrrohr 100 entspricht und hinzukommend Verbindungselemente 922 und 932 an den Enden des Rohrs 100 aufweist, die benachbart zu den elevation upsets 120 und 130 angeordnet sind. Die elevation upsets 120 und 130 sind so gewählt, dass ihr akustischer Wellenwiderstand gleich der Quadratwurzel des Produkts der Wellenwiderstände des ersten Abschnitts 110 und des Verbindungselements 922 oder 932 ist. Des Weiteren weist das Verbindungselement 922 ein Innengewinde und das Verbindungselement 932 ein Außengewinde auf. Innerhalb eines Bohrstrangs bietet das Bohrrohr 900 die Möglichkeit für einen bestimmten Frequenzbereich die Entstehung von Reflexionen an beiden Enden des Bohrrohrs zu vermeiden oder zu unterdrücken.

30 [0062] In Fig. 10A-D werden schematische Längsschnitte von unterschiedlichen Bohrrohren gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung gezeigt. Dabei wird immer nur eine Anschlussseite gezeigt. Eine beliebige Mischung der verschiedenen Ausführungsformen an den beiden Seiten ist möglich und entspricht einem Adapter.

35 [0063] Fig. 10A zeigt einen schematischen Querschnitt eines Bohrrohrs 1000a, das einen ersten Abschnitt 110 und einen zweiten Abschnitt 1020a aufweist. Des Weiteren weist der erste Abschnitt 110 eine Wanddicke  $D_1$  auf die kleiner ist als die Wanddicke  $D_2$  des zweiten Abschnitts 1020a und der zweite Abschnitt 1020a weist einen geringeren Innendurchmesser  $d_2$  als der erste Abschnitt 110 mit  $d_1$  auf. Weiterhin weist der zweite Abschnitt 1020a eine Ausdehnung entlang des Bohrrohrs 1000a auf, der einem Viertel der Wellenlänge des zu übertragenden akustischen Signals entspricht. Durch das beschriebene Ausführungsbeispiel kann eine gewünschte Anpassung erzielt werden ohne die äußere

Form des Bohrrohrs zu verändern.

**[0064]** Fig. 10B zeigt einen schematischen Querschnitt eines Bohrrohrs 1000b entsprechend dem Bohrrohr 1000a, wobei der zweite Abschnitt 1020b im Vergleich zum zweiten Abschnitt 1020a des Bohrrohrs 1000a einen vergrößerten Außendurchmesser aufweist. Das beschriebene Ausführungsbeispiel ist vorteilhaft um eine Flächenvergrößerung auf die Innenseite und die Außenseite des Bohrrohrs 1000b zu verteilen.

**[0065]** Fig. 10C zeigt einen schematischen Querschnitt eines Bohrrohrs 1000c entsprechend dem Bohrrohr 100. Der zweite Abschnitt des Bohrrohrs 1020c des Bohrrohrs 1000c weist einen sich stufenförmigen verjüngenden Verlauf von der Wanddicke  $D_2$  des zweiten Abschnitts 1020c zu der Wanddicke  $D_1$  des ersten Abschnitts 110. Das beschriebene Ausführungsbeispiel ist vorteilhaft da Sprungstellen in der Wanddicke durch den stufenförmigen Verlauf verkleinert werden, zusätzlich erzeugte Interferenzen benutzt werden können, um die Anpassung zu verbessern, und eine gute Handhabbarkeit des Bohrrohrs für ein Greifwerkzeug gewährleistet wird. Da außerdem mindestens zwei Stufen vorhanden sind, können, analog zur Mikrowellentechnik, die Längen und Höhen der Stufen nach verschiedenen Kriterien festgelegt werden, z. B. nach Tschebyscheff Polynomen, um den Übergang weiter zu optimieren.

**[0066]** Fig. 10D zeigt einen schematischen Querschnitt eines Bohrrohrs 1000d, entsprechend dem Bohrrohr 100. Der zweite Abschnitt des Bohrrohrs 1020d des Bohrrohrs 1000d weist einen sich linear verjüngenden Verlauf von der Wanddicke  $D_2$  des zweiten Abschnitts 1020d zu der Wanddicke  $D_1$  des ersten Abschnitts auf. Das beschriebene Ausführungsbeispiel reduziert Sprungstellen auf ein Minimum womit ebenfalls Reflexionen stark gedämpft oder gänzlich vermieden werden können. Entsprechend zur Mikrowellentechnik können auch andere funktionale Zusammenhänge für den Verlauf des Wellenwiderstandes vorteilhaft sein, z. B. ein exponentieller Verlauf, der dazu benutzt werden kann, die Bandbreite noch weiter zu vergrößern.

**[0067]** Zum besseren Verständnis werden im Folgenden, in Figuren 11A-C, 3 mögliche Verbindungen von Bohrrohren, 1100a-c, betrachtet und ihren Zusammenhang zur Phasenlage der Reflexionen diskutiert.

**[0068]** Würde man zwei Bohrrohre entsprechend dem Bohrrohr 1100a in Fig. 11A zusammenschrauben, so erhielte man eine Anordnung gemäß Anordnung 1110a. Da aber nun der Wellenwiderstand einmal von klein nach groß und einmal von groß nach klein wechselt, ist die Reflexion einmal gleichphasig (positiv) und einmal gegenphasig (negativ;  $r = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2)$ ). Da der zusätzliche Umweg der hinteren Reflexion um zwei Mal  $\lambda/4$  bewirkt, dass beide Reflexionen wieder gleichphasig werden, wird die gesamte Reflexion maximal (Mehrfachreflexionen vernachlässigt). D. h. mit einem Bohrrohr 1100a entsprechend der Fig. 11A kann kein Bohrstrang aufgebaut werden, der bei einer Frequenz von  $f = c/\lambda$  besonders gut überträgt.

**[0069]** Die genannte maximale Reflexion wird behoben, d. h. die Reflexion wird minimal, wenn am anderen Ende des Bohrrohrs die gleiche Verdickung vorgesehen wird wie am ersten Ende, siehe Bohrrohr 1100b in Fig. 11B, denn dann wird die Verdickung des verschraubten Bohrrohrübergangs  $\lambda/2$  lang (Anordnung 1110b). Dies entspricht dem Fall, dass man die tool-joint Bereiche gleich so lang macht, dass ihre erste Resonanzfrequenz im gewünschten Frequenzbereich liegt. Dazu müssten jedoch die Tool-Joints, die relativ dick sind, etwa dreimal länger werden, so dass diese Möglichkeit für herkömmliche Bohrrohre ausscheidet, da sie zu schwer werden würden. Für spezielle Bohrrohre, die auch immer verwendet werden müssen, wäre dies dagegen denkbar.

**[0070]** Mit einem elevation upset, der in einem bevorzugten Fall eine Länge von  $\lambda/4$  hat, ergibt sich das Bohrrohr 1100c in Fig. 11C. Dabei ergibt sich immer die minimale Reflexion, da die Reflexionen an beiden Enden des  $\lambda/4$ -Transformators entweder beide positiv oder beide negativ, also gleichphasig, sind (die Ausbreitungsrichtung entscheidet über das Vorzeichen).

**[0071]** Mit dem hier gewählten Ansatz kann sowohl eine Lösung ohne elevation upset (Fig. 11B;  $\lambda/2$ -Resonanz der zusammen-geschraubten tool joints), als auch eine Lösung mit elevation upset (Fig. 11C;  $\lambda/4$ -Transformator) beschrieben werden. Damit ist auch der Fall eingeschlossen, dass mit einem entsprechenden Adapter, Bohrrohre mit elevation upset mit Bohrrohre ohne elevation upset für einen bestimmten Frequenzbereich optimal gekoppelt werden.

#### Weitere Aspekte und Schlussfolgerung

**[0072]** Ohne den optimierten elevation upset ist im Zielbereich (500 Hz - 2000 Hz) für längere Bohrstränge schon nahezu kein Empfang mehr möglich, während mit dem optimierten elevation upset, beispielsweise erzielt durch geeignete Wahl der Ausdehnung und der Wanddicke des zweiten und des dritten Abschnitts, noch der Großteil der Bandbreite zur Verfügung gestellt werden kann. Das Sortieren der Bohrrohre der Länge nach ergibt für einen Bohrstrang mit einem typischen elevation upset zwar eine deutliche Verbesserung, jedoch ist die erzielte Übertragungskapazität immer noch gering. Bei einem Bohrstrang mit optimiertem elevation upset ist die Änderung durch das Sortieren gering (vgl. Kurven 820b bis 830b), d. h. durch das Verwenden des optimierten elevation upset kann der Arbeitsschritt des Sortierens der Bohrrohre der Länge nach, um den Übertragungskanal zu verbessern, zumeist gespart werden. Zum Vergleich zeigt die Kurven 810c, 820c und 830c in Fig. 8 das Verhalten eines Bohrstrangs aus 600 Bohrrohren, die jeweils mit dem optimierten elevation upset ausgestattet sind. Es ist zu erkennen, dass trotz der Längenschwankungen immer noch der Großteil der Bandbreite, die sich ohne Längenschwankungen ergeben würde, zur Verfügung steht.

**[0073]** Wird der elevation upset in weitere Stufen un-

terteilt, lässt sich die Bandbreite für die akustische Übertragung noch weiter erhöhen. Im Grenzfall würde sich dann ein kontinuierlicher Übergang ergeben.

**[0074]** Gemäß Ausführungsbeispielen kann, wenn aus irgendwelchen Gründen der optimale elevation upset nicht vollständig realisiert werden kann, die Länge und Breite des elevation upset so nahe wie möglich an die optimalen Werte heran gewählt werden, da unter diesen Umständen dann die beste akustische Übertragung zu erwarten ist.

**[0075]** Weitere Aspekte der Erfindung sind:

- Nichtlineare Effekte begrenzen die maximale Sendeleistung der Aktuatoren. Die Nichtlinearität kann z. B. dadurch reduziert werden, dass das Sendesignal aus mehreren Einzelsignalen zusammengesetzt wird und zum Erreichen derselben gesamten Sendeleistung, jedes Einzelelement nicht mehr so weit angesteuert werden muss. Da die Überlagerung der jeweiligen Signalanteile kohärent erfolgt und die der Störterme im Allgemeinen nicht, ist der Effekt besonders ausgeprägt. Bei den nach den GFZ (GeoForschungsZentrum)-Spezifikationen [8] gebauten Aktuatoren ergaben Messungen, dass die quadratische Nichtlinearität dominant ist. In diesem Fall können zwei Sender, verglichen zu einem Sender mit gleichem S/R (Signal zu Störleistungsverhältnis=Signal-to-Interference Ratio), eine um 9 dB höhere akustische Leistung im Bohrrohr erzeugen. Dieser Wert erhöht sich auf ~14 dB für drei und ~18 dB für vier Sender.
- Dominieren beim Sender die Nichtlinearitäten 2. Grades, so kann das Sendespektrum so gewählt werden, dass die Mischprodukte 2. Grades nur außerhalb des Sendespektrums liegen. Zum Erreichen eines bestimmten SNR (Signal-Rauschleistungsverhältnis=Signal-to-Noise Ratio) kann dann eine höhere Sendeleistung gewählt werden, als wenn diese Mischprodukte im Sendespektrum liegen würden. Beginnt das Sendespektrum z. B. bei der Frequenz  $f_1$ , so stören die Nichtlinearitäten 2. Grades bis zu einer Frequenz  $2 \cdot f_1$  nicht.
- Bei einem OFDM (Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren=Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)-Signal mit seinen vielen unabhängigen Unterträgern, besteht das erzeugte Störsignal aus so vielen unabhängigen Mischprodukten, dass es als nichtlineares Rauschen betrachtet werden kann. Dominiert z. B. die Nichtlinearität 2. Grades, so ergibt sich ein optimales SNIR (Signal zu Rausch und Störleistungsverhältnis=Signal-to-Noise and Interference Ratio), wenn das Empfängerrauschen und das nichtlineare Rauschen am Empfänger gleiche Leistung haben.
- Im Bohrbetrieb führt das Anschlagen des hochge-

spülten Bohrkleins an den Bohrstrang zu großen Störspitzen, die nach 1 - 5 ms wieder abgeklungen sind. Das Datensignal ist zumeist deutlich kleiner als diese Spitzen. Durch das Abschneiden der Spitzen, so dass das Datensignal gerade nicht betroffen wird, ist eine Reduzierung des Störspektrums möglich.

- Hat man eine MIMO (Mehreingangs-Mehrausgangs=Multiple Input-Multiple Output)-Anwendung, so ist der Übertragungskanal zwar singular, aber die SVD (Singulärwertzerlegung=Singular Value Decomposition) liefert trotzdem eine Anleitung zum optimalen Einkoppeln in und Auskoppeln aus diesen einen Eigenwert.
- Kommt die erste dominante Reflexion hinter dem Sender (oder Empfänger) nach einem Abstand der höchstens einige Wellenlängen betragen kann, so sollte der Abstand so gewählt werden, dass sich am Sender (oder Empfänger) für den maßgeblichen Frequenzbereich möglichst eine konstruktive Interferenz ergibt. Kommt die erste dominante Reflexion hinter dem Sender (oder Empfänger) jedoch in einem Abstand von vielen Wellenlängen, so kann der Abstand nahezu beliebig gewählt werden, da im maßgeblichen Frequenzbereich viele destruktive und konstruktive Frequenzüberlagerungen auftreten werden.

#### Referenzen:

#### [0076]

[1] M. A. Gutierrez Estevez, K. A. Krüger, K. Krüger, M. Groh, A. Jurczyk, M. Sohmer, U. Krüger, V. Jungnickel, K. Manolakis, K. Jaksch, R. Giese, M. Reich, "Vibrationen aus der Tiefe - Wie neue Mobilfunktechniken helfen, große Datenmengen in kürzerer Zeit akustisch über einen Bohrstrang zu übertragen," DGMK-Tagungsbericht 2013-1, ISBN 978-3-941721-31-9, Celle, Germany, April 2013.

[2] M.E. Reeves, P.L. Camwell, J. McRory, "High Speed Acoustic Telemetry Network Enables Real Time Along String Measurements, Greatly Reducing Drilling Risk," Offshore Europe, United Kingdom, 2011.

[3] M. J. Berro, M. A. Gutierrez Estevez, U. Krüger, K. Krüger, M. Reich, K. Jaksch, R. Giese, K. Egge-mann, A. Zandi-Nia, "Robustes, unidirektionales OFDM-Kommunikationssystem: Integration in einen Bohrstrang und Messungen des autarken Systems," DGMK-Tagungsbericht, Celle, Germany, April, 2016.

[4] V. Jungnickel, M. A. Gutierrez Estevez, K. A. Krüger, U. Krüger, K. Manolakis, R. Giese, M. Groh,

K. Jaksch, A. Jurczyk, K. Krüger, S. Mikulla, S. Weisheit, M. Reich, M. Sohmer, "Anwendung der neuesten Mobilfunktechniken auf akustische Wellen zur Verbesserung der Kommunikation in der Tiefbohrtechnik," DGMK-Tagungsbericht 2012-2, ISBN 978-3-941721-25-8, Celle, Germany, April, 2012.

[5] M. Gutierrez, U. Krueger, K. A. Krueger, K. Manolakis, V. Jungnickel, "Acoustic Channel Model for Adaptive Downhole Communication over Deep Drill Strings," ICASSP-2013, ISSN 1520-6149, Vancouver, Canada, May 2013.

[6] Drumheller, D., S., Knudsen, S., D., "The Propagation of Sound Waves in Drill Strings," J. Acoust. Soc. Am. vol. 97, pp. 2116-2125, 1995.

[7] D. S. Drumheller, "Wave impedances of drill strings and other periodic media," J. Acoust. Soc. Am. 112 (6), 2002.

[8] Schlussberichte zu den BMU / BMWi geförderten Projekten SPWD-BUSData und SPWD-BUSData II, 2011-2015, Technische Informationsbibliothek (TIB) - Hannover.

#### Patentansprüche

1. Bohrrohr (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d), mit  
einem ersten Abschnitt (110) mit einer ersten Wanddicke ( $D_1$ ) (115), und  
einem zweiten Abschnitt (120; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) an oder benachbart zu einem Ende des Bohrrohrs (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) mit einer zweiten Wanddicke ( $D_2$ ) (124), die sich von der ersten Wanddicke (115) unterscheidet,  
einem dritten Abschnitt (130; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) an oder benachbart zu einem anderen Ende des Bohrrohrs (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) mit einer dritten Wanddicke ( $D_3$ ) (134), die sich von der ersten Wanddicke (115) unterscheidet,  
wobei das Bohrrohr (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) vorgesehen ist, um ein akustisches Signal innerhalb eines festgelegten Frequenzbereichs zu übertragen,  
wobei eine Ausdehnung ( $L_{eu1}; L_{eu2}; L_{eu3}$ ) (126; 136; 220) des zweiten oder dritten Abschnitts (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) entlang des Bohrrohrs (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) abhängig von einem Wellenlängenbereich des zu übertragenden akustischen Signals gewählt ist.

2. Bohrrohr gemäß Anspruch 1, wobei eine radiale

Querschnittsfläche des Rohrmaterials des zweiten oder dritten Abschnitts (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) proportional zu einem akustischen Wellenwiderstand des zweiten oder dritten Abschnitts (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) ist.

3. Bohrrohr gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei der zweite oder dritte Abschnitt (1020c; 1020d) einen sich verjüngenden Verlauf von dem zweiten Durchmesser des zweiten Abschnitts (1020c; 1020d) zu dem ersten Durchmesser des ersten Abschnitts (110) aufweist.

4. Bohrrohr gemäß Anspruch 3, wobei der sich verjüngende Verlauf ein stufenförmiger (1020c) Verlauf ist.

5. Bohrrohr gemäß Anspruch 3, wobei der sich verjüngende Verlauf ein linearer (1020d) Verlauf ist.

6. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Ausdehnung (126; 136; 220) des zweiten oder dritten Abschnitts (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) im Bereich von einem Viertel der Wellenlänge ( $\lambda$ ) des Frequenzbereichs des zu übertragenden akustischen Signals gewählt ist.

7. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei der zweite oder dritte Abschnitt (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) einen Aufsatz umfasst, der auf dem ersten Abschnitt (110) angeordnet ist, oder wobei der zweite oder dritte Abschnitt (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) einstückig mit dem ersten Abschnitt (110) gebildet ist.

8. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei ein Außendurchmesser des Bohrrohrs im zweiten oder dritten Abschnitt (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) größer oder gleich einem Außendurchmesser des ersten Abschnitts (110) ist.

9. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei ein Innendurchmesser ( $d_2, d_3$ ) im zweiten oder dritten Abschnitt kleiner oder gleich einem Innendurchmesser ( $d_1$ ) im ersten Abschnitt ist.

10. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9, mit einem Verbindungselement (250; 922; 932) zur Verbindung mit einem weiteren Bohrrohr, wobei das Verbindungselement in dem zweiten oder dritten Abschnitt gebildet ist, oder wobei der zweite oder dritte Abschnitt (120; 130) zwischen dem ersten Abschnitt (110) und dem Verbindungselement (250; 922; 932) angeordnet ist.

11. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die zweite Wanddicke ( $D_2$ ) (124) des zweiten Abschnitts sich von einer dritten Wanddicke ( $D_3$ ) (134)

des dritten Abschnitts unterscheidet und die Ausdehnung ( $L_{eu}; L_{eu2}$ ) (126; 220) des zweiten Abschnitts sich von der Ausdehnung ( $L_{eu3}$ ) (136) des dritten Abschnitts unterscheidet.

12. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei die dritte Wanddicke ( $D_3$ ) (134) gleich der zweiten Wanddicke ( $D_2$ ) (124) ist und die Ausdehnung ( $L_{eu3}$ ) (136) des dritten Abschnitts (130) gleich der Ausdehnung ( $L_{eu}; L_{eu2}$ ) (126; 220) des zweiten Abschnitts (120; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) ist.

13. Bohrstrang (400a; 400b; 400c), mit einer Mehrzahl von Bohrröhren (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12, die mittels der Verbindungselemente (250; 922; 932) miteinander verbunden sind, einem akustischen Sender (404a; 404b; 404c), und einem akustischen Empfänger (406a; 406b), der an einem oberen Ende des Bohrstrangs (400a; 400b; 400c) angeordnet ist.

14. Bohrstrang (400a; 400b; 400c) gemäß Anspruch 13, wobei eine Wanddicke der Verbindungselemente (250, 922, 932) größer ist als die zweite Wanddicke ( $D_2$ ) (124) des zweiten Abschnitts (120; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) und die dritte Wanddicke ( $D_3$ ) des dritten Abschnitts (130).

15. Verfahren zum Übertragen eines akustischen Signals aus einer Bohrung, mit folgenden Schritten:

Bereitstellen eines Bohrstrangs (400a; 400b; 400c) gemäß Anspruch 13 oder 14, und Senden des akustischen Signals über den Bohrstrang (400a; 400b; 400c), wobei die Mehrzahl von Bohrröhren (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) des Bohrstrangs (400a; 400b; 400c) unterschiedliche Längen haben, und wobei die Bohrröhre (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) in beliebiger Reihenfolge angeordnet sind.

16. Verfahren gemäß Anspruch 15, wobei die Längenvariation der Bohrröhre (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) im Bereich von  $\pm 0,25$ m ist.

#### Geänderte Patentansprüche gemäß Regel 137(2) EPÜ.

1. Bohrrohr (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d), mit einem ersten Abschnitt (110) mit einer ersten Wanddicke ( $D_1$ ) (115), einem zweiten Abschnitt (120; 210c; 1020a; 1020b;

1020c; 1020d) an oder benachbart zu einem Ende des Bohrrohrs (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) mit einer zweiten Wanddicke ( $D_2$ ) (124), die sich von der ersten Wanddicke (115) unterscheidet,

einem dritten Abschnitt (130; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) an oder benachbart zu einem anderen Ende des Bohrrohrs (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) mit einer dritten Wanddicke ( $D_3$ ) (134), die sich von der ersten Wanddicke (115) unterscheidet, und

Verbindungselemente (250; 922, 932) an jedem Ende des Bohrrohrs, die so angeordnet sind, dass der zweite und der dritte Abschnitt (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) zwischen einem jeweiligen Verbindungselement und dem ersten Abschnitt (110) angeordnet sind,

wobei das Bohrrohr (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) vorgesehen ist, um ein akustisches Signal innerhalb eines festgelegten Frequenzbereichs zu übertragen,

#### **dadurch gekennzeichnet, dass**

eine Länge ( $L_{eu}; L_{eu2}; L_{eu3}$ ) (126; 136; 220) des zweiten oder dritten Abschnitts (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) entlang des Bohrrohrs (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) abhängig von einem Wellenlängenbereich des zu übertragenden akustischen Signals gewählt ist.

2. Bohrrohr gemäß Anspruch 1, wobei eine radiale Querschnittsfläche des Rohrmaterials des zweiten oder dritten Abschnitts (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) proportional zu einem akustischen Wellenwiderstand des zweiten oder dritten Abschnitts (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) ist.

3. Bohrrohr gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei der zweite oder dritte Abschnitt (1020c; 1020d) einen sich verjüngenden Verlauf von dem zweiten Durchmesser des zweiten Abschnitts (1020c; 1020d) zu dem ersten Durchmesser des ersten Abschnitts (110) aufweist.

4. Bohrrohr gemäß Anspruch 3, wobei der sich verjüngende Verlauf ein stufenförmiger (1020c) Verlauf ist.

5. Bohrrohr gemäß Anspruch 3, wobei der sich verjüngende Verlauf ein linearer (1020d) Verlauf ist.

6. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Ausdehnung (126; 136; 220) des zweiten oder dritten Abschnitts (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) im Bereich von einem Viertel der Wellenlänge ( $\lambda$ ) des Frequenzbereichs des zu übertragenden akustischen Signals gewählt ist.

7. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei

- der zweite oder dritte Abschnitt (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) einen Aufsatz umfasst, der auf dem ersten Abschnitt (110) angeordnet ist, oder wobei der zweite oder dritte Abschnitt (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) einstückig mit dem ersten Abschnitt (110) gebildet ist. 5
8. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei ein Außendurchmesser des Bohrrohres im zweiten oder dritten Abschnitt (120; 130; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) größer oder gleich einem Außendurchmesser des ersten Abschnitts (110) ist. 10
9. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei ein Innendurchmesser ( $d_2$ ,  $d_3$ ) im zweiten oder dritten Abschnitt kleiner oder gleich einem Innendurchmesser ( $d_1$ ) im ersten Abschnitt ist. 15
10. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die zweite Wanddicke ( $D_2$ ) (124) des zweiten Abschnitts sich von einer dritten Wanddicke ( $D_3$ ) (134) des dritten Abschnitts unterscheidet und die Ausdehnung ( $L_{eu1}$ ;  $L_{eu2}$ ) (126; 220) des zweiten Abschnitts sich von der Ausdehnung ( $L_{eu3}$ ) (136) des dritten Abschnitts unterscheidet. 20 25
11. Bohrrohr gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die dritte Wanddicke ( $D_3$ ) (134) gleich der zweiten Wanddicke ( $D_2$ ) (124) ist und die Ausdehnung ( $L_{eu3}$ ) (136) des dritten Abschnitts (130) gleich der Ausdehnung ( $L_{eu1}$ ;  $L_{eu2}$ ) (126; 220) des zweiten Abschnitts (120; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) ist. 30
12. Bohrstrang (400a; 400b; 400c), mit einer Mehrzahl von Bohrröhren (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11, die mittels der Verbindungselemente (250; 922; 932) miteinander verbunden sind, einem akustischen Sender (404a; 404b; 404c), und einem akustischen Empfänger (406a; 406b), der an einem oberen Ende des Bohrstrangs (400a; 400b; 400c) angeordnet ist. 35 40
13. Bohrstrang (400a; 400b; 400c) gemäß Anspruch 12, wobei eine Wanddicke der Verbindungselemente (250, 922, 932) größer ist als die zweite Wanddicke ( $D_2$ ) (124) des zweiten Abschnitts (120; 210c; 1020a; 1020b; 1020c; 1020d) und die dritte Wanddicke ( $D_3$ ) des dritten Abschnitts (130). 45 50
14. Verfahren zum Übertragen eines akustischen Signals aus einer Bohrung, mit folgenden Schritten:
- Bereitstellen eines Bohrstrangs (400a; 400b; 400c) gemäß Anspruch 12 oder 13, und Senden des akustischen Signals über den Bohrstrang (400a; 400b; 400c), 55
- wobei die Mehrzahl von Bohrröhren (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) des Bohrstrangs (400a; 400b; 400c) unterschiedliche Längen haben, und wobei die Bohrröhre (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) in beliebiger Reihenfolge angeordnet sind.
15. Verfahren gemäß Anspruch 14, wobei die Längensvariation der Bohrröhre (100; 200c; 900; 1000a; 1000b; 1000c; 1000d) im Bereich von  $\pm 0,25$  m ist.

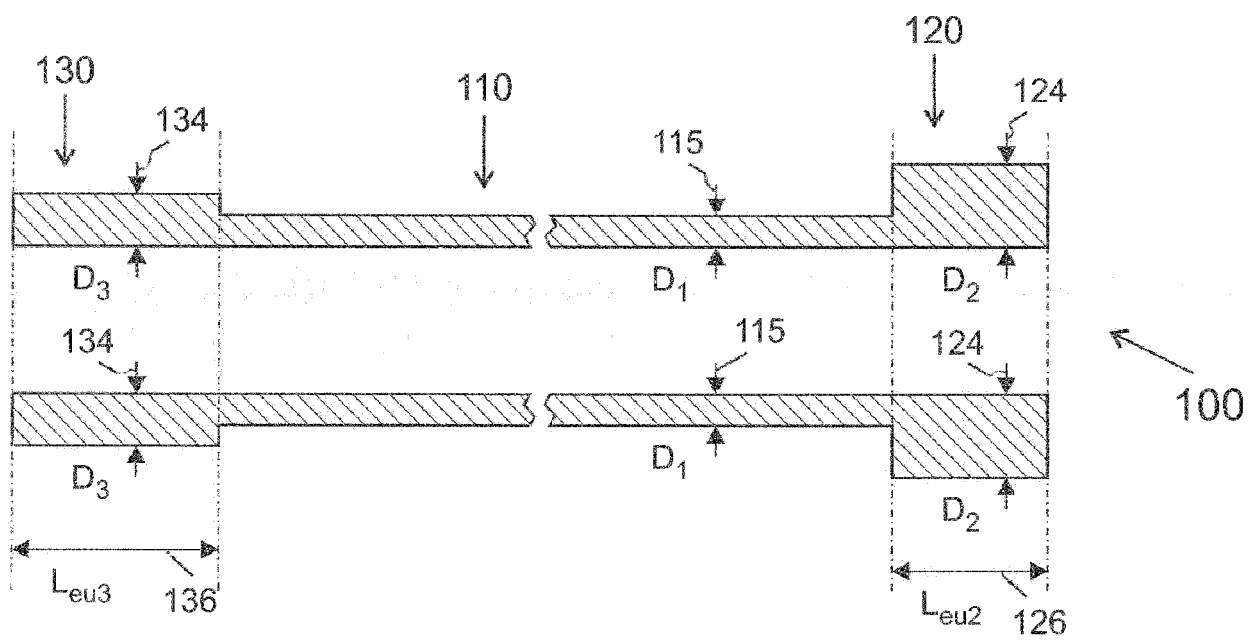


Fig. 1

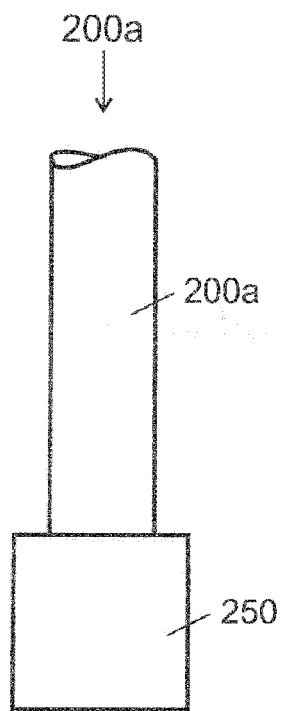


Fig. 2A

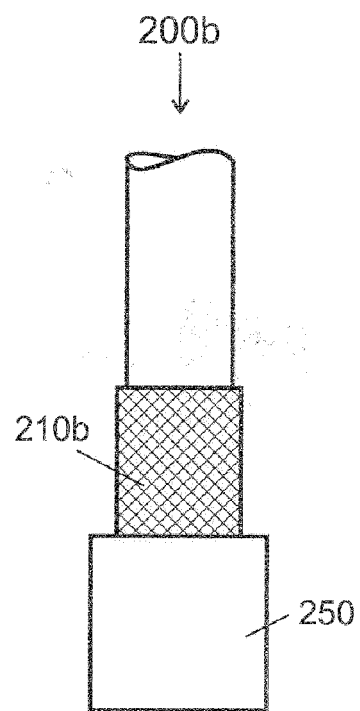


Fig. 2B

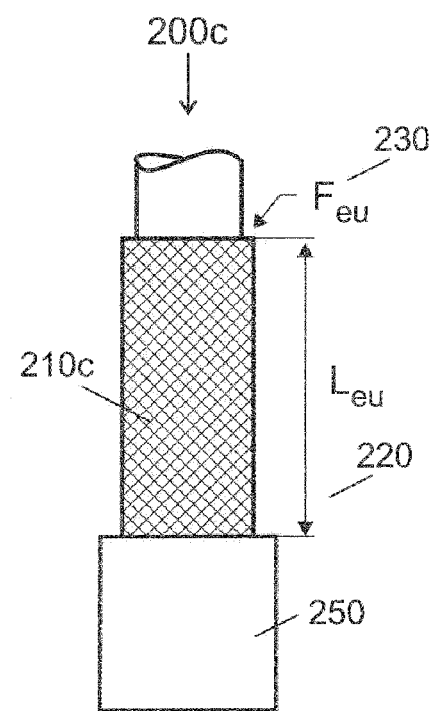


Fig. 2C



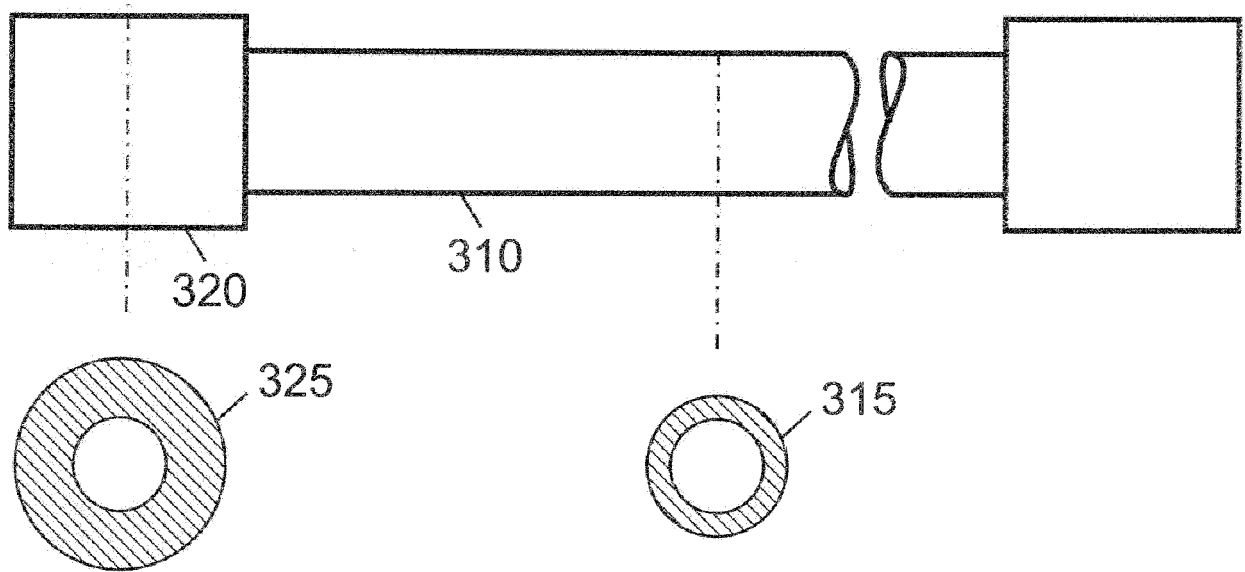
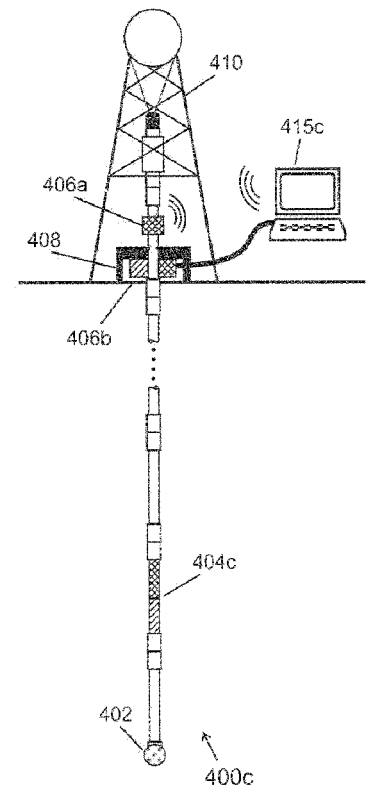
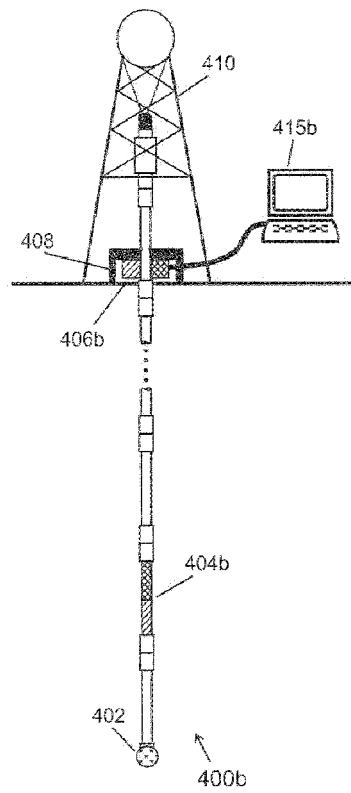
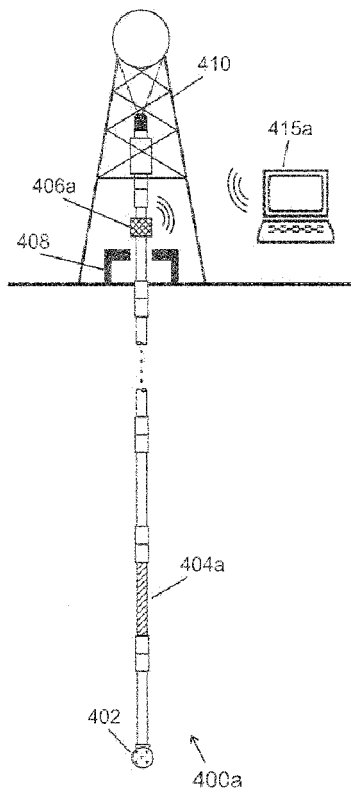


Fig. 3



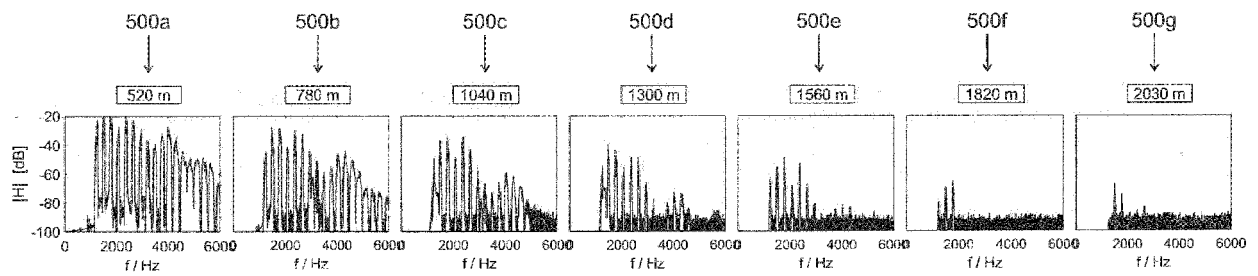


Fig. 5

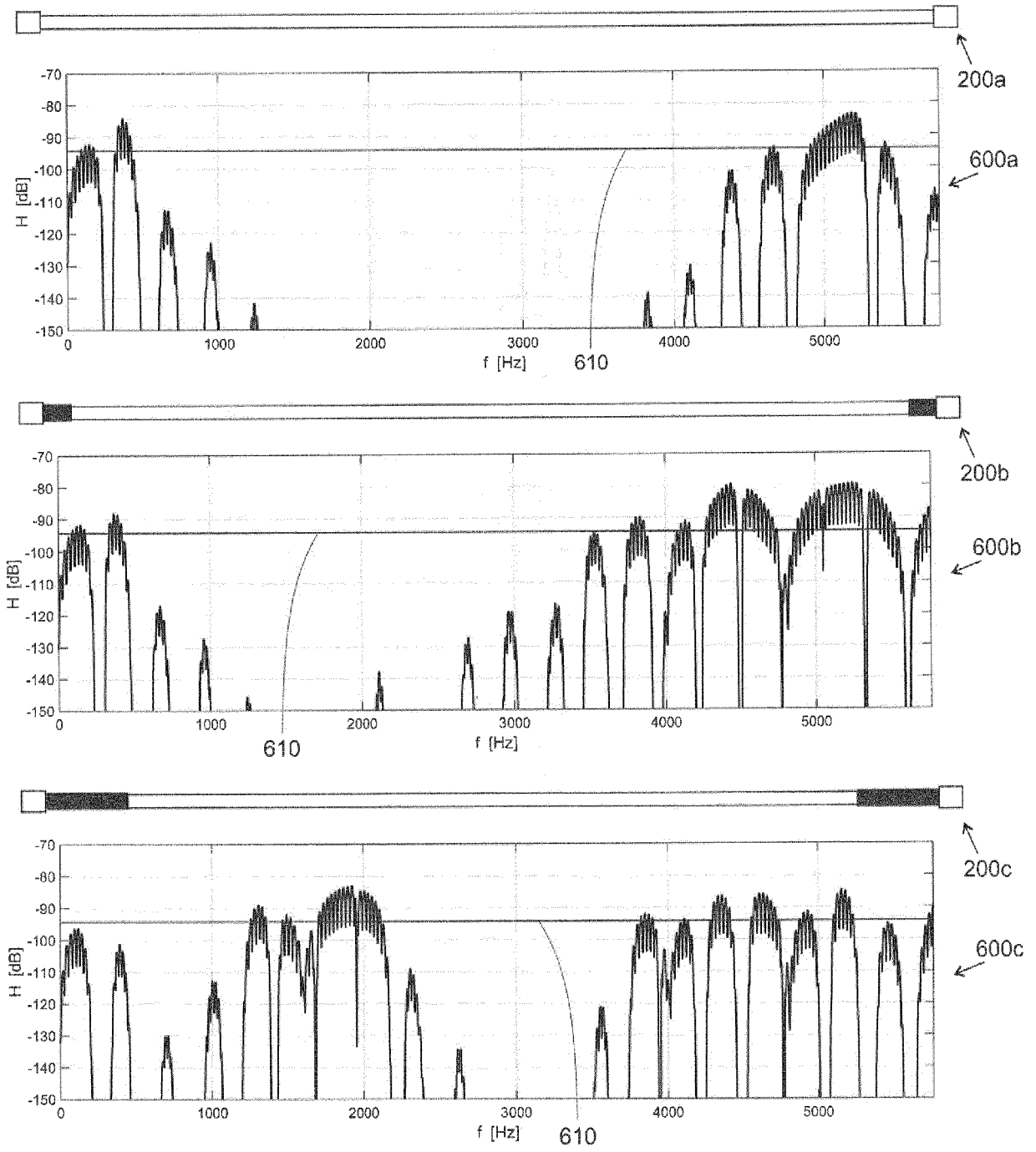
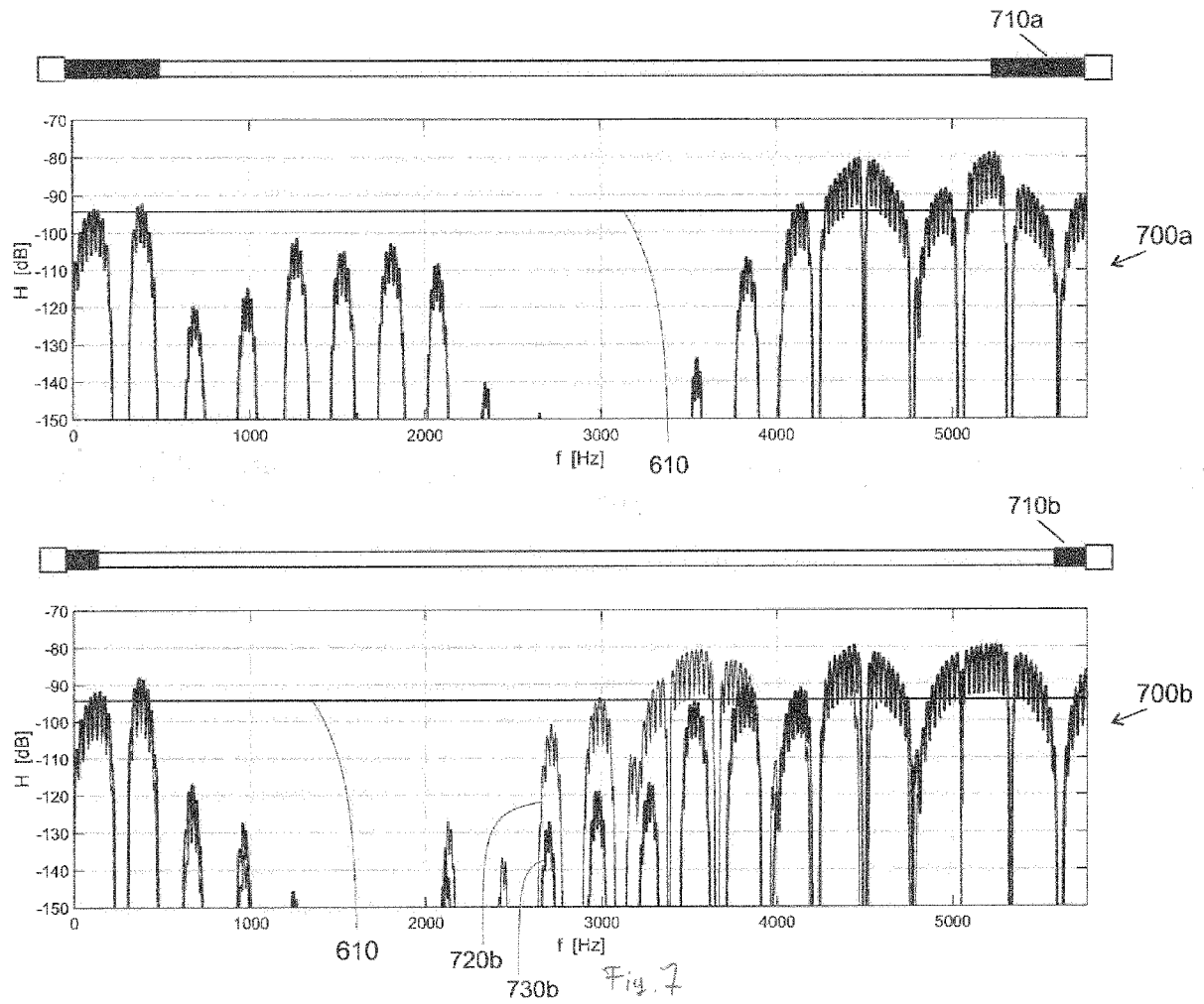


Fig. 6



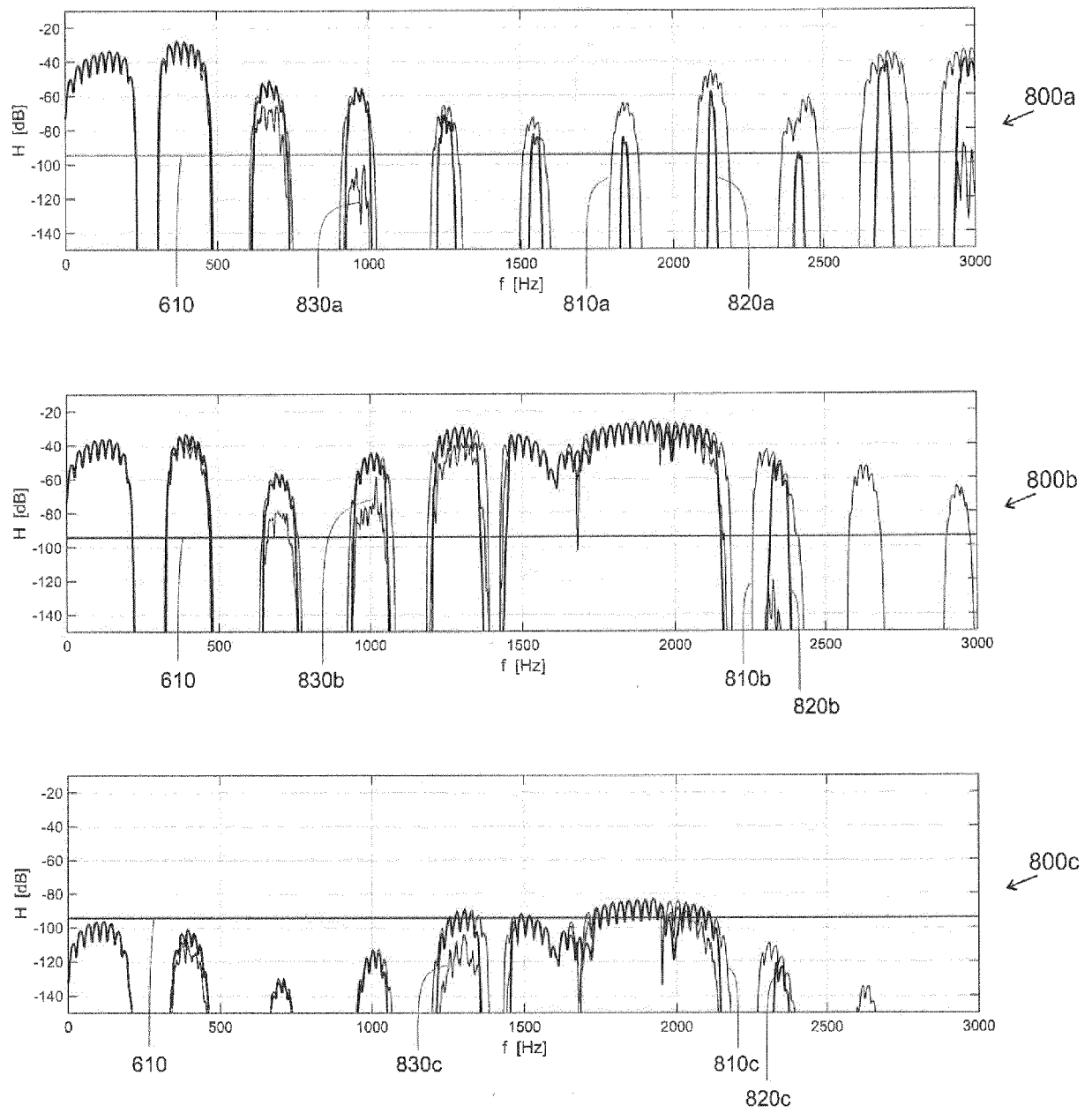


Fig. 8

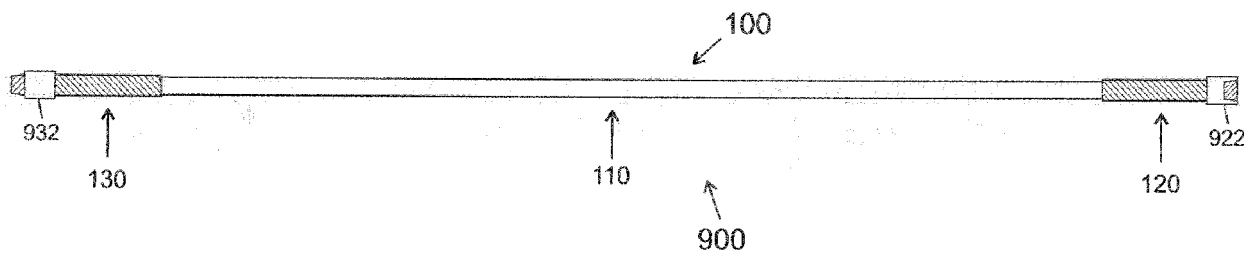


Fig. 9

Fig. 10A

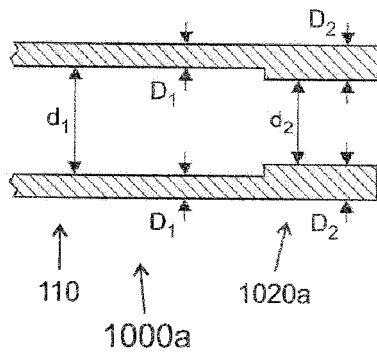


Fig. 10B

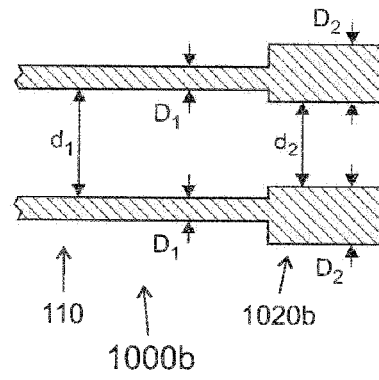


FIG. 10C and FIG. 10D are cross-sectional views of the device 1000c and 1000d, respectively, showing different configurations of the layers 110 and 1020c/d.

Fig. 10C

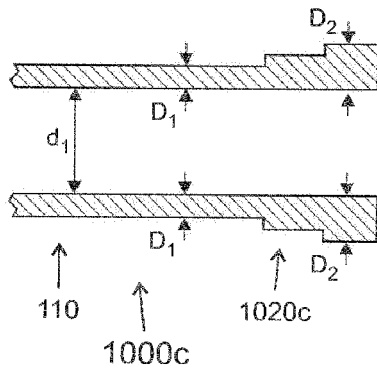


Fig. 10D

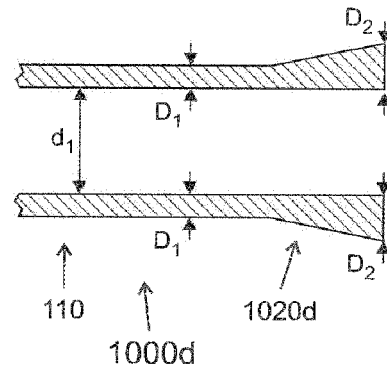




Fig. 11A

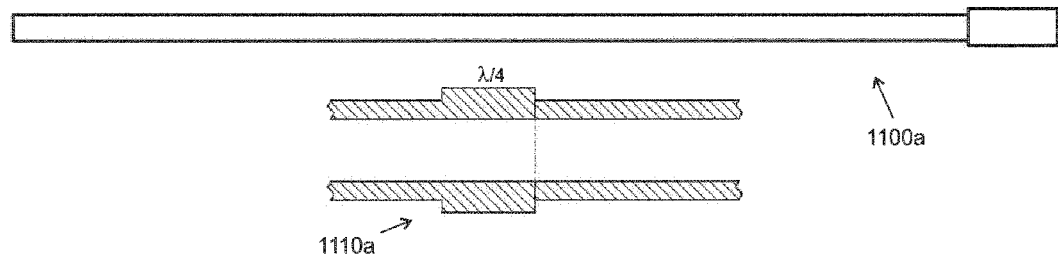


Fig. 11B

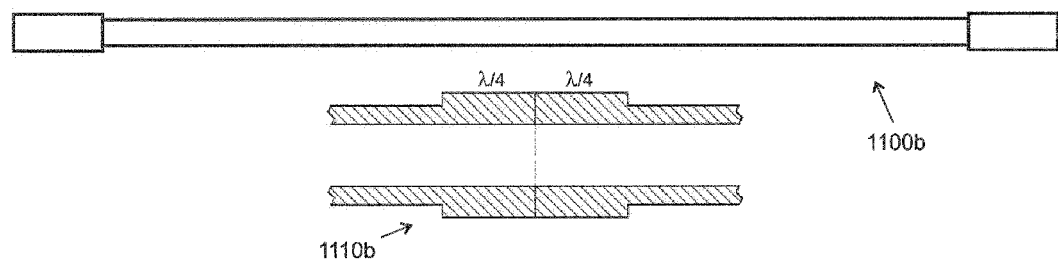
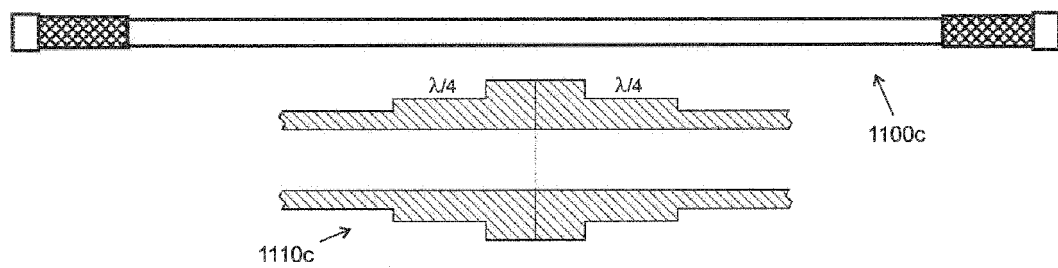


Fig. 11C





## EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung  
EP 16 19 3660

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X,D	GUTIERREZ-ESTEVEZ M A ET AL: "Acoustic channel model for adaptive downhole communication over deep drill strings", 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH AND SIGNAL PROCESSING (ICASSP); VANCOUCER, BC; 26-31 MAY 2013, INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, PISCATAWAY, NJ, US, 26. Mai 2013 (2013-05-26), Seiten 4883-4887, XP032508380, ISSN: 1520-6149, DOI: 10.1109/ICASSP.2013.6638589 [gefunden am 2013-10-18] * Abbildungen 1,6-9 * * Zusammenfassung * * Seite 4883, Spalte 2 * * Seite 4884, Spalte 1 * * Seite 4885, Absatz III * * Seite 4886, Spalte 1 * -----	1-5, 7-10, 12-16	INV. E21B47/16 E21B17/00 G10K11/16
X,D	DRUMHELLER DOUGLAS S: "Wave impedances of drill strings and other periodic media", THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS FOR THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, NEW YORK, NY, US, Bd. 112, Nr. 6, 1. Dezember 2002 (2002-12-01), Seiten 2527-2539, XP012003156, ISSN: 0001-4966, DOI: 10.1121/1.1513365 * Zusammenfassung * * Abbildung 14 * * Seite 2527, letzter Absatz * * Seite 2528, Spalte 1 * * Seite 2529, Spalte 2 * * Absatz [0IIC] * * Absatz [III B] * ----- -/--	1-12	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)  E21B G10K
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort <b>Den Haag</b>		Abschlußdatum der Recherche <b>18. November 2016</b>	Prüfer <b>Pasquini, Matteo</b>
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 03.02 (P04C03)



## EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung  
EP 16 19 3660

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	US 3 252 225 A (HIXSON ELMER L) 24. Mai 1966 (1966-05-24) * Abbildungen 1,3,5 * * Spalte 1 * * Spalten 7-10 *	1-12	
X	US 5 283 768 A (RORDEN LOUIS H [US]) 1. Februar 1994 (1994-02-01) * Abbildungen 1-2 * * Spalte 3, letzter Absatz * * Spalte 5 * * vorletzter Absatz; Spalte 6 * * erster Absatz; Spalte 9 * * vorletzter Absatz; Spalte 11 *	1-12	
X	WO 2016/108881 A1 (HALLIBURTON ENERGY SERVICES INC [US]) 7. Juli 2016 (2016-07-07) * Abbildungen 1,3,5,6,8 * * Absätze [0006], [0013], [0016], [0019] - [0020], [0024], [0033] *	1-12	
A	US 5 128 901 A (DRUMHELLER DOUGLAS S [US]) 7. Juli 1992 (1992-07-07) * das ganze Dokument *	1,3-6, 13,15	
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 18. November 2016	Prüfer Pasquini, Matteo
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 16 19 3660

5 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.

18-11-2016

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
	US 3252225	A	24-05-1966	KEINE		
15	US 5283768	A	01-02-1994	CA	2071067 A1	15-12-1992
				CA	2130282 A1	19-02-1995
				CA	2363981 A1	19-02-1995
				FR	2679681 A1	29-01-1993
				FR	2716492 A1	25-08-1995
20				GB	2256736 A	16-12-1992
				GB	2281424 A	01-03-1995
				GB	2317955 A	08-04-1998
				GB	2317979 A	08-04-1998
				NO	922284 A	15-12-1992
				NO	943059 A	20-02-1995
25				NO	20030612 A	20-02-1995
				US	5283768 A	01-02-1994
				US	5592438 A	07-01-1997
				US	5850369 A	15-12-1998
				US	6208586 B1	27-03-2001
30	WO 2016108881	A1	07-07-2016	KEINE		
	US 5128901	A	07-07-1992	KEINE		

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 Nicht-Patentliteratur

- **M. A. GUTIERREZ ESTEVEZ ; K. A. KRÜGER ; K. KRÜGER ; M. GROH ; A. JURCZYK ; M. SOHMER ; U. KRÜGER ; V. JUNGNICKE ; K. MANOLAKIS ; K. JAKSCH.** Vibrationen aus der Tiefe - Wie neue Mobilfunktechniken helfen, große Datenmengen in kürzerer Zeit akustisch über einen Bohrstrang zu übertragen. *DGMK-Tagungsbericht 2013-1*, April 2013, ISBN 978-3-941721-31-9 [0076]
- **M.E. REEVES ; P.L. CAMWELL ; J. MCRORY.** *High Speed Acoustic Telemetry Network Enables Real Time Along String Measurements, Greatly Reducing Drilling Risk*, 2011 [0076]
- **M. J. BERRO ; M. A. GUTIERREZ ESTEVEZ ; U. KRÜGER ; K. KRÜGER ; M. REICH ; K. JAKSCH ; R. GIESE ; K. EGGEMANN ; A. ZANDI-NIA.** Robustes, unidirektionales OFDM-Kommunikationssystem: Integration in einen Bohrstrang und Messungen des autarken Systems. *DGMK-Tagungsbericht*, April 2016 [0076]
- **V. JUNGNICKE ; M. A. GUTIERREZ ESTEVEZ ; K. A. KRÜGER ; U. KRÜGER ; K. MANOLAKIS ; R. GIESE ; M. GROH ; K. JAKSCH ; A. JURCZYK ; K. KRÜGER.** Anwendung der neuesten Mobilfunktechniken auf akustische Wellen zur Verbesserung der Kommunikation in der Tiefbohrtechnik. *DGMK-Tagungsbericht 2012-2*, April 2012, ISBN 978-3-941721-25-8 [0076]
- Acoustic Channel Model for Adaptive Downhole Communication over Deep Drill Strings. **M. GUTIERREZ ; U. KRUEGER ; K. A. KRUEGER ; K. MANOLAKIS ; V. JUNGNICKE.** ICASSP-2013. Vancouver, Mai 2013 [0076]
- **DRUMHELLER, D., S. ; KNUDSEN, S., D.** Thje Propagation of Sound Waves in Drill Strings. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, vol. 97, 2116-2125 [0076]
- **D. S. DRUMHELLER.** Wave impedances of drill strings and other periodic media. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2002, vol. 112 (6) [0076]
- Schlussberichte zu den BMU / BMWi geförderten Projekten SPWD-BUSData und SPWD-BUSData II. *Technische Informationsbibliothek (TIB) - Hannover*, 2011 [0076]