



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 36 768 T2 2008.02.07**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 096 272 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 36 768.1**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 309 346.5**

(96) Europäischer Anmeldetag: **24.10.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **02.05.2001**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **17.10.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **07.02.2008**

(51) Int Cl.⁸: **G01V 1/50 (2006.01)**
G01H 9/00 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

429048 29.10.1999 US

430058 29.10.1999 US

430057 29.10.1999 US

(73) Patentinhaber:

Litton Systems, Inc., Woodland Hills, Calif., US

(74) Vertreter:

Patentanwälte Wallach, Koch & Partner, 80339 München

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB, IT

(72) Erfinder:

Roscigno, John A., Stevenson Ranch, California 91381, US; Frederick, Donald, Simi Valley, California 93065, US; Knaack, William C., West Hills, California 91304, US; Hodgson, Craig W., Thousand Oaks, California 91320, US

(54) Bezeichnung: **Akustische Sensoranordnung für bohrlochseismische Anwendungen unter Verwendung einer fiberoptischen Fühleranordnung**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

Hintergrund der Erfindung

Gebiet der Erfindung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich allgemein auf akustische Mess-Systeme und insbesondere bezieht sie sich auf ein System zur Messung von akustischen oder Schallwellen, das eine akustische Sensor-Anordnung umfasst.

Beschreibung des verwandten Standes der Technik

[0002] Typischerweise wird zur Ölgewinnung ein Quelle oder eine Bohrung durch Bohren und Entfernen von Erde aus dem Boden zur Bildung eines Schachtes gegraben, der als „Bohrloch“ bekannt ist, das sich zum Boden des Schachtes erstreckt. Allgemein wird ein großes Metallrohr oder eine Auskleidung in das Bohrloch eingesetzt. Kleinere Rohre, die als Produktions-Rohre bekannt sind, werden in die Auskleidung eingesetzt. Diese Produktions-Rohre ermöglichen einen Zugang an den Boden des Schachtes. Beispielsweise kann Öl aus dem Schacht durch das Produktions-Rohr abgezogen werden.

[0003] Schließlich erscheint der Schacht trocken zu sein. Trotz des scheinbaren Fehlens von Öl in dem Schacht sind große Vorräte an Öl in vielen Fällen in Taschen in der Erde in der Nähe des Schachtes eingefangen. Diese Taschen sind jedoch in Allgemeinen für den gebohrten Schacht unzugänglich. Um derartige Taschen zu lokalisieren, die in der Technik als Reserven „an Ort und Stelle“ bekannt sind, führen Biologen Erkundungen von Erdmassen aus, die die Schächte umgeben. Biologen verwenden Techniken wie zum Beispiel eine Kreuz-Schacht-Tomographie, bei der akustische Wellen durch ein Volumen der Erde übertragen werden, um Eigenschaften, wie zum Beispiel die Dichte, in diesem Volumen zu Charakterisieren. Die Kenntnis der Dichte der Erde trägt dazu bei, dass Vorhandensein oder Fehlen von Öl in dem Gebiet der Erde festzustellen, das charakterisiert wird.

[0004] Um die Übertragungseigenschaften eines Gebietes der Erde zu erkunden, kann eine Quelle für akustische Wellen zur Erzeugung von akustischen Wellen, das heißt Schall, verwendet werden, während eine Anordnung von akustischen Sensoren diese akustischen Wellen erfasst. Allgemein wird sich jeder der Sensoren in der Anordnung an einer unterschiedlichen Stelle befinden. Die von der akustischen Quelle emittierten akustischen Wellen werden somit an einer Vielzahl von Punkten abgetastet, die typischerweise eine Linie bilden. Durch Ändern der Position der akustischen Quelle, der Position der Sensor-Anordnung oder von beiden können die Übertragungseigenschaften eines Volumens der Erde gemessen werden. Auf diese Weise kann eine dreidimensionale Karte der Dichte über einen Bereich der Erde hinweg erzeugt werden.

[0005] Obwohl einige bekannte Techniken auf akustischen Quellen und/oder Sensor-Anordnungen beruhen, die auf der Oberfläche der Erde liegen, ist die Anordnung von akustischen Quellen und Sensor-Anordnungen tief im Inneren der Erde effektiver, um tiefere Regionen der Erde zu erkunden. Um Messungen tief in der Erde durchzuführen, kann eine Sonde in den Schacht abgesenkt werden.

[0006] Die Empfindlichkeit konventioneller bekannter Sensoren verhindert jedoch, dass bekannte Sensor-Anordnungen tief im inneren eines Schachtes verwendet werden. Konventionelle Sensor-Anordnungen verwenden piezoelektrische Wandler (oder Piezos), um Schwingungen, die aus den akustischen Wellen herrühren, in elektrische Signale umzuwandeln. Weil ein piezoelektrischer Wandler lediglich ein kleines Signal abgibt, muss ein elektronischer Vorverstärker in der Nähe des piezoelektrischen Wandlers befestigt werden, um zu verhindern, dass Störungen und Rauschen das kleine Wandlersignal überdecken. Elektronische Bauteile sind jedoch mit den rauen Umgebungsbedingungen, wie zum Beispiel einer hohen Temperatur und einem hohen Druck, inkompatibel, die tief im inneren der Erde vorherrschen. Selbst Vorverstärker, die hohe Temperaturen überstehen können, haben eine kurze Lebensdauer, und sie können beispielsweise lediglich eine Stunde unter rauen Bedingungen aushalten. Somit verhindert die Notwendigkeit eines elektronischen Vorverstärkers die Verwendung von piezoelektrischen Wandlern tief innerhalb eines Schachtes.

[0007] Faseroptische Sensoren sind andererseits elektrisch passive Einrichtungen. Das heißt, sie erfordern keine elektrischen Komponenten oder elektrische Verbindungen. Daher sind sie weniger empfindlich gegenüber den rauen Bedingungen, die sich aus Umgebungen mit hoher Temperatur und hohem Druck ergeben. Weiterhin vermeiden faseroptische Sensoren die Umgebungsprobleme, die mit elektrischen Komponenten verbunden sind, beispielsweise die elektromagnetische Störung, die entsteht, wenn elektrische Bauteile in der

Nähe von Übertragungsleitungen angeordnet werden. Aus diesen Gründen werden faseroptische Sensoren manchmal in Hydrophonen verwendet, die unter rauen Umgebungsbedingungen arbeiten.

[0008] Faseroptische Hydrophone können allgemein in zwei Kategorien klassifiziert werden. Hydrophone der luftgestützten Wickelkern- oder Dorn-Konstruktion haben einen hohlen abgedichteten Hohlraum, der sich in Abhängigkeit von dem Teildruck verformt, so dass Beanspruchungen auf die um den Dorn gewickelte Lichtleitfaser übertragen werden. Andere weniger empfindliche Lichtleitfaser-Hydrophon-Konstruktionen zeichnen die Auswirkungen des Druckes direkt auf die Lichtleitfaser selbst auf, das heißt die Lichtleitfaser kann um einen massiven Körper gewickelt werden. Faseroptische Hydrophone mit hoher Empfindlichkeit (das heißt Hydrophone mit luftgestützten Wickelkern) sind allgemein auf Betriebsdrücke von weniger ungefähr 35 MPa (5000 englische Pfund pro Quadratzahl (psi)) und Temperaturen von weniger als ungefähr 120°C beschränkt. Außerhalb dieses Bereiches verformen sich die in dem Wickelkern von Hydrophonen mit luftgestützten Dornen verwendeten Materialien übermäßig. Beispielsweise verformt sich Polycarbonat-Kunststoffmaterial bei diesen Temperaturen, während sich Metalle, wie zum Beispiel Aluminium, unelastisch verformen, wenn sie hohen Drücken ausgesetzt werden. Andererseits haben faseroptische Hydrophone, die massive Körper oder eine Lichtleitfaser zur akustischen oder Schall-Wandlung verwenden, typischerweise wesentlich geringere Empfindlichkeiten.

[0009] Zusätzlich zu den Betriebsbeschränkungen hinsichtlich des Druckes und der Temperatur sind derzeitige faseroptische Hydrophone im Allgemeinen raumaufwendig, und sie können große Querschnitte haben, die sich als solche nicht zur Verwendung in Anwendungen eignen, bei denen die Kompaktheit ein wesentlicher Faktor ist, beispielsweise in kommerziellen petrochemischen Schächten und Bohrlöchern. Daher besteht ein Bedarf an einem faseroptischen Hydrophon, das einen relativ kleinen Querschnitt und die Fähigkeit hat, hohen Drücken und Temperaturen zu widerstehen.

[0010] Zusätzlich zu den Beschränkungen hinsichtlich der Anordnung bekannter akustischer Anordnungen gibt es Beschränkungen hinsichtlich der Anzahl von Sensoren, die bei bekannten akustischen Anordnungen verwendet werden können. Bei einer größeren Anzahl von Sensoren muss mehr Information verarbeitet werden. Beschränkungen hinsichtlich der Menge an Information, die innerhalb einer annehmbaren Zeitdauer verarbeitet werden kann, begrenzen die Anzahl der Sensoren, die verwendet werden können. Eine höhere Auflösung aufweisende Karten können jedoch mit einer größeren Anzahl von Sensoren erzielt werden.

[0011] Somit besteht ein Bedarf an einem System zur Messung akustischer Wellen, das robust genug ist, um in den rauen Umgebungsbedingungen eines Bohrloches zu arbeiten und das eine große Anzahl von Sensoren aufnimmt.

[0012] Systeme, die eine große Anzahl von Sensoren verwenden, können einen Nutzen aus der Verwendung der Multiplexierung ziehen, bei der mehrfache Signale in einer einzigen Leitung übertragen werden. Eine übliche Lösung, die als Frequenz-Multiplexierung (FDM) bekannt ist, arbeitet durch Modulieren einer Trägerwelle mit einer Anzahl von unterschiedlichen Frequenzen gleich der Anzahl von Signalen, die zu multiplexieren sind. Wenn FDM auf ein System angewandt wird, das interferometrische Sensoren verwendet, so schließt das multiplexierte Signal Komponenten nicht nur bei den Modulations-Frequenzen, sondern auch bei allen harmonischen Frequenzen der Modulations-Frequenzen ein. Für ein derartiges System kann das multiplexierte Signal durch die Detektion der Modulations-Komponenten bei der Modulations-Frequenz und der ersten harmonischen Frequenz demultiplexiert werden, vorausgesetzt, dass diese Komponenten sich nicht miteinander oder mit irgendwelchen Komponenten bei den höheren Harmonischen (hinsichtlich ihrer Frequenz) überlappen. Eine derartige Überlappung kann durch die Auswahl von Modulations-Frequenzen verhindert werden, die ausreichend groß und voneinander getrennt sind, damit die niedrigste harmonische Komponente zweiter Ordnung die höchste erste harmonische Komponente übersteigt. Dies führt zu großen Bändern von ungenutzten Frequenzen zwischen Gleichspannung der höchsten erfassten Frequenzsignal-Komponente. Um die Signalverarbeitungs-Elektronik einfach zu halten, ist es jedoch vorzuziehen, die maximale detektierte Frequenz so niedrig wie möglich zu halten. Daher besteht ein Bedarf an einem Verfahren zur Auswahl eines Satzes von FDM-Modulations-Frequenzen, die eine maximale Frequenz haben, die so niedrig wie möglich ist, wobei jedoch gleichzeitig Funkfrequenz-Komponenten und erste harmonische Signal-Komponenten beibehalten werden, die nicht durch andere Signal-Komponenten überlappt sind.

[0013] Das Dokument EP 0936453 beschreibt eine Technik zum Abfragen von faseroptischen interferometrischen Sensoren. Das Dokument WO 9802898 beschreibt Anordnungen von faseroptischen interferometrischen Sensoren und Mechanismen vom Maximieren des Signal-/Störverhältnisses in verstärkten Sensor-Anordnungen, die zeitmultiplexiert sind. Das Dokument WO 9835208 beschreibt ein System für die vertikale seis-

mische Profilbestimmung einer Erdbohrung.

Zusammenfassung der Erfindung

[0014] Die vorliegende Erfindung umfasst ein System zum Messen unterirdischer akustischer Wellen, die von einer akustischen Quelle emittiert werden, wie es im Anspruch 1 beansprucht ist. Das System umfasst zumindest eine optische Quelle, die Licht emittiert. Eine Vielzahl von optischen Sensoren empfängt das Licht und ändert das Licht in Abhängigkeit von akustischen Wellen. Zumindest ein optischer Detektor empfängt das geänderte Licht und gibt ein elektrisches Signal ab. Das System umfasst weiterhin elektronische Schaltungen, die das elektrische Signal empfangen und das Signal in ein seismisches akustisches Datenformat umwandelt.

[0015] Das System umfasst in vorteilhafter Weise zumindest eine Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitung, die das von der optischen Quelle emittierte Licht an die Sensoren verteilt, sowie zumindest eine Rücklauf-Lichtleitfaser-Leitung, die das geänderte Licht, das von den Sensoren emittiert wird, an zumindest einen optischen Detektor lenkt.

[0016] Vorzugsweise wird das von der zumindest einen optischen Quelle emittierte Licht mit zumindest einer Modulations-Frequenz moduliert. Die elektronischen Schaltungen demultiplexieren oder demodulieren in vorteilhafter Weise das elektrische Signal durch Mischen des Signals mit periodischen Schwingungsformen, die Frequenzen aufweisen, die den Modulations-Frequenzen und dem Doppelten der Modulations-Frequenzen entsprechen.

[0017] Dieses System kann eine Anzahl von unterschiedlichen Arten von faseroptischen Sensor-Eingängen umfassen, vorzugsweise Land-seismische, Bohrloch-Herunterführungs- und Meeresboden-Kabel, die entweder Hydrophone, Geophone oder eine Kombination von beiden verwenden.

[0018] Eine weitere Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfasst ein in einem Bohrloch angeordnetes-System zur Messung von akustischen Wellen, die von einer akustischen Oberflächen-Quelle oder einer unterirdischen akustischen Welle emittiert werden. Das in dem Bohrloch angeordnete System umfasst zumindest eine optische Quelle, die Licht emittiert. Eine Anzahl von in dem Bohrloch angeordneten optischen Sensoren empfängt das Licht. Diese Anordnung ändert das Licht in Abhängigkeit von den akustischen Wellen. Eine Vielzahl von optischen Detektoren empfängt das geänderte Licht und gibt elektrische Signale ab. Elektronische Schaltungen verarbeiten diese elektrischen Signale und wandeln die Signale in ein seismisches Datenformat um.

[0019] Bei einer anderen Ausführungsform umfasst ein in einem Bohrloch angeordnetes System zur Durchführung einer Bohrloch-Quer-Tomographie eine Vielzahl von Laser-Quellen, die jeweils Licht emittieren, das mit unterschiedlichen Frequenzen moduliert ist. Dieses in der Bohrung angeordnete System umfasst weiterhin eine Anordnung von in der Bohrung angeordneten optischen Sensoren. Diese in der Bohrung angeordneten optischen Sensoren empfangen das Licht und ändern es in Abhängigkeit von akustischen Wellen, die auf die akustischen Sensoren auftreffen. Eine Anzahl von optischen Detektoren empfängt das geänderte Licht und gibt elektrische Signale ab. Elektronische Schaltungen verarbeiten die elektrischen Signale und wandeln die Signale in ein seismisches Datenformat um.

[0020] Eine zusätzliche Ausführungsform beinhaltet ein weiteres System zur Messung unterirdischer akustischer Wellen die von einer akustischen Quelle emittiert werden. Das System umfasst Einrichtungen zur Erzeugung einer Anzahl von kohärenten Lichtstrahlen und Einrichtungen zur Modulation der Anzahl von kohärenten Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Frequenzen. Das System umfasst weiterhin Einrichtungen zum Ändern der Lichtstrahlen in Abhängigkeit von den akustischen Wellen. Auf diese Weise werden Änderungen der Lichtstrahlen erzeugt. Das System umfasst zusätzlich Einrichtungen zur Detektion der Änderungen des Lichtstrahles. Einrichtungen zur Umwandlung der detektierten Änderungen in ein seismisches Datenformat sind ebenfalls enthalten.

[0021] Eine weitere Ausführungsform umfasst ein Verfahren zur Messung unterirdischer akustischer Wellen, die von einer akustischen Quelle emittiert werden, wie dies im Anspruch 28 beansprucht ist. Das Verfahren umfasst die Erzeugung von zumindest einem optischen Lichtstrahl. Der Lichtstrahl wird in Abhängigkeit von den akustischen Wellen geändert. Änderungen des Lichtstrahles werden auf diese Weise erzeugt. Diese Änderungen in dem Lichtstrahl werden detektiert, und die detektierten Änderungen werden in ein seismisches Datenformat umgewandelt.

[0022] Ein weiteres Verfahren zur Messung unterirdischer akustischer Wellen, die von einer akustischen Quelle emittiert werden, umfasst die Erzeugung einer Anzahl von kohärenten Lichtstrahlen. Die Anzahl der kohärenten Lichtstrahlen wird mit unterschiedlichen Frequenzen moduliert. Die Lichtstrahlen werden in Abhängigkeit von den akustischen Wellen geändert, wodurch eine Änderung der Lichtstrahlen erzeugt wird. Die geänderten Lichtstrahlen werden empfangen, und elektrische Signale werden abgegeben. Die elektrischen Signale werden verarbeitet und in Daten in einem seismischen Datenformat umgewandelt.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0023] Die vorliegende Erfindung wird im Einzelnen nachfolgend anhand der beigegeführten Zeichnungen beschrieben, in denen:

[0024] [Fig. 1](#) eine Seitenansicht eines sich in einem Bohrloch nach unten erstreckenden akustischen Mess-Systems zeigt, das eine bevorzugte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist;

[0025] [Fig. 2](#) eine perspektivische Ansicht eines Kabels zeigt, das ein Herabführungs-Kabel und ein Sensor-Anordnungs-Kabel umfasst;

[0026] [Fig. 3A](#) eine schematische Ansicht der ersten Ausführungsform des akustischen Mess-Systems der vorliegenden Erfindung zeigt, das sechs Laser-Quellen, sechzehn optische Detektoren und 96 akustische Sensoren umfasst, wobei die Sensoren in einer einzigen akustischen Sensor-Anordnung enthalten sind;

[0027] [Fig. 3B](#) eine schematische Ansicht einer Ausführungsform des akustischen Mess-Systems der vorliegenden Erfindung zeigt, das sechs Laser-Quellen, 32 optische Detektoren und 192 akustische Sensoren umfasst, wobei die Sensoren in zwei getrennten akustischen Sensor-Anordnungen enthalten sind;

[0028] [Fig. 4](#), die die [Fig. 4A](#) bis [Fig. 4H](#) umfasst, eine schematische Ansicht einer Implementierung der Verteilung und Zurücklieferung des optischen Signals bei der ersten Ausführungsform erläutert. Diese Implementierung nimmt eine optische 6×16 -Sensor-Anordnung mit sechzehn Sensor-Gruppen auf, wobei jede Sensor-Gruppe eine ausschließlich hierfür bestimmte Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitung hat;

[0029] [Fig. 5](#) eine schematische Ansicht einer bevorzugten Ausführungsform des akustischen Sensors in Form eines Lichtleitfaser-Sensors zeigt, der ein Mach-Zehnder-Interferometer ist;

[0030] [Fig. 6](#) ein Blockschaltbild der Detektor-/Elektronik-Baugruppe und eines Laser-Einschubes bei der ersten Ausführungsform des akustischen Mess-Systems zeigt, wobei 96 Sensoren in der 6×16 -Sensor-Anordnung nach [Fig. 4](#) vorgesehen sind;

[0031] [Fig. 7](#) ein Ablaufdiagramm der Wechselwirkung der akustischen Quelle und der akustischen Sensor-Systeme zeigt;

[0032] [Fig. 8](#) ein Ablaufdiagramm der Betriebsweise des akustischen Mess-Systems zeigt, nämlich den Prozess, mit dem akustische Wellen gemessen und Daten in einem konventionellen seismischen Industriennorm-Format ausgegeben werden;

[0033] [Fig. 9](#), die die [Fig. 9A](#) bis 9D umfasst, eine schematische Ansicht der Detektor-/Elektronik-Baugruppe und eines Laser-Einschubs in der zweiten Ausführungsform des akustischen Sensor-Systems zeigt, das 192 Sensoren in einer $2 \times (6 \times 16)$ Sensor-Anordnung aufweist;

[0034] [Fig. 10](#), die [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) umfasst, Frequenz-Komponenten für multiplexierte Signale zeigt, bei denen die Modulations-Frequenzen so ausgewählt sind, dass die Sätze von Grundwellen, ersten Harmonischen und zweiten Harmonischen an einer Überlappung gehindert sind. Die [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) zeigen die Komponenten für Systeme mit fünf beziehungsweise sechs Modulations-Frequenzen;

[0035] [Fig. 11](#), die die [Fig. 11A](#) und [Fig. 11B](#) umfasst, Frequenz-Komponenten für multiplexierte Signale gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt, wobei die Modulations-Frequenzen so ausgewählt sind, dass sie einen gleichen Abstand aufweisen, und wobei sich die Sätze von ersten Harmonischen und zweiten Harmonischen ohne Überlappung der Komponenten-Signale innerhalb der zwei Sätze überlappen, wobei die [Fig. 11A](#) und [Fig. 11B](#) die Komponenten für Systeme mit fünf beziehungsweise sechs Modulations-Frequenzen zeigen;

[0036] [Fig. 12](#) Frequenz-Komponenten für ein multiplexiertes Signals zeigt, das sich aus fünf Licht-Quellen gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ergibt, wobei die Modulations-Frequenzen einen gleichförmigen Abstand beginnend bei $6\Delta f$ haben, mit der Ausnahme, dass eine Modulations-Frequenz bei $9\Delta f$ übersprungen wird;

[0037] [Fig. 13](#) Frequenz-Komponenten für ein multiplexiertes Signal zeigt, das sich aus sechs Licht-Quellen gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ergibt, wobei die Modulations-Frequenzen einen gleichförmigen Abstand beginnend bei $7\Delta f$ haben, mit der Ausnahme, dass eine Modulations-Frequenz bei $12\Delta f$ übersprungen wird;

[0038] [Fig. 14](#), die die [Fig. 14A](#) und [Fig. 14B](#) umfasst, Frequenz-Komponenten für ein multiplexiertes Signal zeigt, das sich aus sechs Licht-Quellen gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ergibt, wobei die Modulations-Frequenz-Komponenten bei Δf -Vielfachen von $5 \frac{2}{3}$, 7, 8, 9, 10 und $12\frac{1}{2}$ ausgewählt sind, wobei aus Gründen der Klarheit [Fig. 14A](#) die Grundfrequenz-Komponenten isoliert;

[0039] [Fig. 15](#), die die [Fig. 15A](#) und [Fig. 15B](#) umfasst, Frequenz-Komponenten für ein multiplexiertes Signal zeigt, das sich aus sechs Licht-Quellen gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ergibt, wobei die Modulations-Frequenz-Komponenten bei Δf -Vielfachen von 3, 4, 5, 7, 11 und 13 ausgewählt sind, wobei aus Gründen der Klarheit die [Fig. 15A](#) die Grundfrequenz-Komponenten isoliert;

[0040] [Fig. 16](#) eine weggeschnittene Ansicht einer Hydrophon-Ausführungsform zeigt, die sich innerhalb eines Kabels befindet;

[0041] [Fig. 17](#) eine Querschnittsansicht des Kabels nach [Fig. 16](#) an einem von dem Hydrophon entfernten Ort zeigt;

[0042] [Fig. 18](#) mechanische Halterungs-Merkmale zeigt, die um den Sensor des Hydrophon herum verwendet werden, um diesen gegen ein Brechen zu schützen, der anderenfalls bei einem Biegen des Kabels auftreten würde;

[0043] [Fig. 19](#) eine auseinandergezogene Ansicht des Sensors zeigt, wobei ein Telemetrie-Gehäuse, ein Bezugs-Dorn und zwei Abtast-Dorne sowie die Lichtleitfasern gezeigt sind, die diese miteinander verbinden;

[0044] [Fig. 20](#), die die [Fig. 20A](#), [Fig. 20B](#) und [Fig. 20C](#) umfasst, schematische Darstellungen der Führung der Lichtleitfaser innerhalb des Sensors zeigt. In den [Fig. 20A](#), [Fig. 20B](#) und [Fig. 20C](#) wirkt der Sensor als ein Mach-Zehnder-Interferometer, ein Michelson-Interferometer beziehungsweise ein Fabry-Perot-Interferometer;

[0045] [Fig. 21](#) eine perspektivische Ansicht des Bezugs-Dorns unter Einschluss seiner halbkugelförmigen Endkappen zeigt;

[0046] [Fig. 22](#) eine Querschnittsansicht einer halbkugelförmigen Endkappe zeigt; und

[0047] [Fig. 23](#) eine flexible Zwischenverbindung zeigt, die zur Verbindung von zwei halbkugelförmigen Endkappen verwendet wird.

Ausführliche Beschreibung der bevorzugten Ausführungsform

[0048] Ein System **100** zur Messung akustischer Wellen **102** gemäß der bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist in [Fig. 1](#) gezeigt. Das System **100** umfasst ein akustischen Anordnungs-Kabel **104**, das an einem Herabführungs-Kabel **106** angebracht ist, das auf einer ersten Trommel **108** auf einem ersten Lastwagen **110** gehalten ist. Das Herabführungs-Kabel **106** läuft von der ersten Trommel **108** zu einer Haspel **112**, die ebenfalls auf dem ersten Lastwagen **110** befestigt ist, und einer Seilscheibe **114**, die auf einer Oberfläche **116** benachbart zu einem Bohrloch **118** angeordnet ist. Von der Seilscheibe **114** aus läuft das Herabführungs-Kabel **106** zu einer Seilscheibe **120**, die an einem Kran **122** befestigt ist. Das Herabführungs-Kabel **106** und das akustische Anordnungs-Kabel **104** erstrecken sich von dieser Seilscheibe **120** in das Bohrloch **118**. Das Bohrloch **118** umfasst ein erstes Bohrloch **124**, das in einer Erdschicht **126** ausgebildet ist.

[0049] Ein großes Metallrohr, das als (nicht gezeigte) Auskleidung bekannt ist, ist in das Bohrloch **124** eingesetzt. Das Herabführungs-Kabel **106** auf der Trommel **108** ist mit einer Empfänger-Verarbeitungs-Elektronik **128** verbunden, die in dem ersten Lastwagen **110** untergebracht ist.

[0050] Eine akustische Quelle **130** befindet sich in einem zweiten Bohrloch **132**. Diese akustische Quelle **130** ist an einem akustischen Quellen-Kabel **134** angebracht, das auf einer zweiten Trommel **136** auf einem zweiten Lastwagen **138** gehalten wird. Das akustische Quellen-Kabel **134** läuft von der zweiten Trommel **136** zu einer zweiten Haspel **140**, die ebenfalls auf dem zweiten Lastwagen **138** befestigt ist, und zu einer zweiten Seilscheibe **142**, die sich auf der Oberfläche **116** benachbart zu den zweiten Bohrloch **132** befindet. Von der zweiten Seilscheibe **142** läuft das akustische Quellen-Kabel **134** um eine zweite Seilscheibe **144** herum, die an einem zweiten Kran **136** befestigt ist. Das akustische Quellen-Kabel **134** erstreckt sich von dieser Seilscheibe **144** in das zweite Bohrloch **132**. Weiterhin befindet sich in dem zweiten Lastwagen **138** eine Quellen-Elektronik **148**, die der akustischen Quelle **130** zugeordnet ist. Die akustischen Wellen **102** gehen von der akustischen Quelle **130** in dem zweiten Bohrloch **132** aus und kommen an dem akustischen Anordnungs-Kabel **104** in dem ersten Bohrloch **124** an.

[0051] Eine perspektivische Ansicht eines Kabels **202**, das das Herabführungs-Kabel **106** und das akustische Anordnungs-Kabel **104** umfasst, ist in [Fig. 2](#) gezeigt. Eine Schnittstelle **204** verbindet das Herabführungs-Kabel **106** mit dem akustischen Anordnungs-Kabel **104**. Das akustische Anordnungs-Kabel **104** wird durch einen Gamma-Detektor **206** abgeschlossen, der in konventioneller Weise arbeitet, um ein elektrisches Signal in Abhängigkeit von dem Hindurchlaufen des Gamma-Detektors **206** durch jeden Abschnitt eines Rohres zu erzeugen, das die Auskleidung in dem Bohrloch **124** bildet. Der Gamma-Detektor **206** liefert ein Signal, das verarbeitet wird, um die Tiefe des Abschlusses des akustischen Anordnungs-Kabel **104** zu bestimmen.

[0052] Wie dies in [Fig. 3A](#) gezeigt ist, ist eine Anzahl von Laser-Quellen LS1, LS2, LS3, LS4, LS5, LS6 so angeordnet, dass sie optische Zuführungs-Leitungen F1-F6 speisen, die an einem optischen Abschluss-Element **302** angeschlossen sind. Das optische Abschluss-Element ergibt eine Verbindung mit dem Herabführungs-Kabel **106**, das mit einem akustischen Anordnungs-Kabel **104** verbunden ist. Das akustische Anordnungs-Kabel **104** nimmt eine Anzahl von Sensoren auf, die bei diesem Ausführungsbeispiel insgesamt 96 Sensoren sind, die mit S1-S96 bezeichnet sind. Das optische Abschluss-Element **302** ergibt weiterhin eine Verbindung zwischen dem Herabführungs-Kabel **106** und einer Anzahl (beispielsweise 16) von Rückführungs-Lichtleitfasern R1-R16, die mit optischen Detektoren D1-D16 gekoppelt sind. Die Ausgänge der optischen Detektoren D1-D16 sind elektrisch mit der Verarbeitungs-Elektronik **304** verbunden.

[0053] Jede Laser-Quelle LS1, LS2, LS3, LS4, LS5, LS6 umfasst einen jeweiligen Laser LS1, LS2, LS3, LS4, LS5, LS6 und einen Modulator M1, M2, M3, M4, M5, M6. Jeder der Laser L1-L6 erzeugt einen Lichtstrahl mit einer unterschiedlichen optischen Wellenlänge. Die sechs Lichtstrahlen, die von diesen Lasern L1-L6 erzeugt werden, werden an jeweilige Modulatoren M1-M6 gelenkt. Vorzugsweise umfassen diese Modulatoren M1-M6 Phasen-Modulatoren, die jeweils durch eine unterschiedliche Modulations-Frequenz gekennzeichnet sind. Entsprechend geben die Laser-Quellen LS1, LS2, LS3, LS4, LS5, LS6 sechs optische oder Lichtsignale ab, die jeweils unterschiedliche optische Wellenlängen haben, und die jeweils mit einer getrennten Modulations-Frequenz moduliert sind.

[0054] [Fig. 3B](#) zeigt eine Ausführungsform, die 192 Sensoren S1-S192 umfasst, die in zwei getrennten akustischen Anordnungs-Kabeln **104a**, **104b** enthalten sind, die an zwei getrennten Herabführungs-Kabeln **106a**, **106b** angebracht sind. Die zwei getrennten akustischen Anordnungs-Kabel **104a**, **104b** und die Herabführungs-Kabel **106a**, **106b** könnten in zwei getrennte Bohrlöcher **124** eingesetzt sein. Die Anordnung mit 192 Sensoren wird weiter unten ausführlicher erläutert.

[0055] Die Anzahl von Zuführungs-Leitungen F1-F6 ist mit einer Anzahl von Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 (die in [Fig. 4A-Fig. 4H](#) gezeigt sind) an dem optischen Abschluss-Element **302** verbunden, um die von den Laser-Quellen LS1-LS6 abgegebenen optischen Signale an die Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen zu übertragen. Diese Verteilungs-Zuführungs-Leitungen DF1-DF6 laufen durch das Herabführungs-Kabel **106** und in das akustische Anordnungs-Kabel **104**.

[0056] [Fig. 4](#), die die [Fig. 4A-Fig. 4H](#) umfasst, zeigt die 96 Sensoren S1-S96 in einem einzigen akustischen Anordnungs-Kabel **104** ähnlich dem, wie es in [Fig. 3A](#) gezeigt ist. Diese **96** Sensoren S1-S96 sind in acht Sensor-Gruppen von jeweils zwölf Sensoren unterteilt. Eine erste Sensor-Gruppe, die Gruppe **401**, ist in [Fig. 4A](#) gezeigt. Der optische Pfad von der ersten Sensor-Gruppe **401** zu den Laser-Quellen LS1, LS2, LS3, LS4, LS5, LS6 und an die Verarbeitungs-Elektronik **304** ist kürzer als der für irgendeine der anderen Sensor-Gruppen **402-408**. Sieben zusätzliche Sensor-Gruppen **402-408** sind in den [Fig. 4A-Fig. 4H](#) gezeigt. Jede Sensor-Gruppe **401-408** hat zumindest einen Sensor, der mit jeder der sechs Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 gekoppelt ist. Beispielsweise sind in der ersten Sensor-Gruppe **401** die Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 mit jeweiligen Standard-1 × 2-Eingangskopplern **420** verbunden, die ihrerseits mit jeweiligen

Sensoren S1-S12 verbunden sind. In ähnlicher Weise sind in der zweiten Sensor-Gruppe **402** die Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 mit jeweiligen Sensoren S12-S24 über zusätzliche Standard-1 × 2-Eingangskoppler **420** verbunden.

[0057] Alle die Sensoren S1-S12 in der Gruppe **401** sind mit zwei Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1, RF2 gekoppelt. In ähnlicher Weise weist jede der Sensor-Gruppen **402-408** zwei der Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF2-RF16 auf, die ausschließlich für ihre Verwendung bestimmt sind. Beispielsweise sind die Sensoren S7-S24 alle mit zwei der Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF16 gekoppelt, nämlich den dritten und vierten Lichtleitfaser-Leitungen RF3, RF4. Als ein weiteres Beispiel sind die Sensoren S85-S96 mit den letzten zwei Lichtleitfaser-Leitungen RF15, RF16 gekoppelt. Bei dieser Ausführungsform nutzen keine benachbarten Sensoren S1-S96 eine gemeinsame Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitung RF1-RF16.

[0058] Die Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF16 sind mit Rückführungs-Lichtleitfasern R1-R16 verbunden. Die Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF16 und die Rückführungs-Lichtleitfasern R1-R16 lenken die optischen Ausgangssignale der akustischen Sensoren S1-S96 an die optischen Detektoren D1-D16.

[0059] In [Fig. 5](#) umfassen die akustischen Sensoren S1-S96 ein Interferometer **502**, das gegenüber akustischen Drücken, Druck-Änderungen und Druck-Schwingungen empfindlich ist. Das Interferometer **502** ist in [Fig. 5](#) als ein Mach-Zehnder-Interferometer gezeigt. Dieses Interferometer **502** schließt eine Sensor-Eingangs-Leitung **504** ein, die mit einem ersten Koppler **506** verbunden ist. Ein Bezugs-Arm **508** und ein Test- oder Mess-Arm **510** sind an diesem ersten Koppler **506** angeschlossen. Der Bezugs-Arm **508** und der Test-Arm **510** sind Lichtleitfasern. Die Lichtleitfasern **508**, **510** sind mit einem zweiten Koppler **512** verbunden, der mit einer Sensor-Ausgangs-Leitung **514** verbunden ist. Der Eingangs-Koppler **420** und der Ausgangs-Koppler **430** sind mit der Sensor-Eingangs-Leitung **504** beziehungsweise mit der Sensor-Ausgangs-Leitung **514** verbunden.

[0060] Das optische Signal, das von den Laser-Quellen LS1-LS6 ausgeht, wird in die Sensor-Eingangs-Leitung **504** des Interferometers **502** über den Eingangs-Koppler **420** eingekoppelt. Das Signal wird von dem ersten Koppler **506** auf zwei Strahlen aufgeteilt. Ein Bezugs-Strahl breitet sich durch den Bezugs-Arm **508** aus, und ein Test-Strahl breitet sich durch den Test-Arm **510** aus. Die zwei Strahlen werden in eine einzige Lichtleitfaser **514**, die Sensor-Ausgangs-Leitung, an dem zweiten Koppler **506** des Interferometers **504** gekoppelt. Der Bezugs-Strahl und der Test-Strahl ergeben eine Interferenz in dem zweiten Koppler **512**, um ein Ausgangssignal zu erzeugen, das an einem der optischen Detektoren D1-D16 detektiert wird.

[0061] Akustische Schwingungen, die auf eine der akustischen Sensoren S1-S96 auftreffen, bewirken eine Verformung der Lichtleitfaser, die den jeweiligen Test-Arm **510** bildet, das heißt eine Dehnung oder Zusammenziehung, wodurch andererseits die optische Pfadlänge des Test-Armes **510** geändert wird. Im Gegensatz hierzu ist der Bezugs-Arm **508** gegenüber den akustischen Schwingungen abgeschirmt. Somit ändert sich die optische Pfadlänge des Bezugs-Armes nicht. Weil sich die optische Pfadlänge des Test-Arms **510** ändert, während sich die optische Pfadlänge des Bezugs-Arms **508** nicht ändert, ändert sich die Phasen-Differenz zwischen den Strahlen, die sich in dem Test- und Bezugs-Armen ausbreiten, in Abhängigkeit von den akustischen Schwingungen. Die Änderungen der relativen Phase zwischen dem Test- und Bezugs-Armen **510**, **508** führen zu einer sich zeitlich ändernden Interferenz an dem zweiten Koppler **512**. Die sich zeitlich ändernde Interferenz wird zu einer sich zeitlich ändernden Lichtintensität des Signals, das von dem zweiten Koppler **512** abgegeben wird. Die sich zeitlich ändernde Lichtintensität wird durch einen der Detektoren detektiert (beispielsweise dem ersten Detektor D1).

[0062] [Fig. 6](#) zeigt eine Detektor-/Elektronik-Baugruppe **601** für die erste Ausführungsform des akustischen Mess-Systems **100**, das sechzehn Rückführungs-Lichtleitfasern R1-R16 aufweist, die mit den sechzehn optischen Detektoren D1-D16 gekoppelt sind. Die Detektor-/Elektronik-Baugruppe **601** schließt die optischen Detektoren D1-D16 und die Verarbeitungs-Elektronik **304** ein.

[0063] [Fig. 6](#) zeigt weiterhin schematisch eine optische Sensor-Anordnung **602**, und zeigt, wie die Detektor-/Elektronik-Baugruppe **601** mit der optischen Sensor-Anordnung und mit den Laser-Quellen LS1-LS6 verbunden ist. Wie sie hier definiert ist, umfasst die optische Sensor-Anordnung **602** eine Anzahl von optischen Sensoren, die miteinander unter Verwendung von Lichtleitfasern gekoppelt sind. Die optische Sensor-Anordnung **602**, die in [Fig. 6](#) gezeigt ist, schließt die Bezeichnung 6×16 ein, was sechs Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 und sechzehn Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF6 entspricht, die in den [Fig. 4A-Fig. 4H](#) gezeigt sind.

[0064] Jeder der optischen Detektoren D1-D16 ist als Teil der vier digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** enthalten. Die optischen Detektoren sind in vier Gruppen D1-D4, D5-D8, D9-D12 und D13-D16 aufgeteilt, wobei sich jede Gruppe in einem der vier digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** befindet.

[0065] Wie dies in [Fig. 6](#) gezeigt ist, sind die vier digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** elektrisch mit vier digitalen 24-Kanal-Signal-Prozessoren (DSPs) **606** verbunden. Jeder der 24-Kanal-DSPs **606** umfasst zwölf digitale Signal-Verarbeitungs-Chips. Entsprechend kann der Ausdruck „12-DSP-Verarbeitungs-Element“ **606** austauschbar mit digitalen 24-Kanal-Signal-Prozessoren verwendet werden.

[0066] Jeder der digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** ist mit einem der zwölf DSP-Verarbeitungs-Elemente **606** gepaart. Die vier 12-DSP-Verarbeitungs-Elemente sind mit einem PCI-Bus **608** (oder einem anderen geeigneten Bus) gekoppelt, der mit einer zentralen Prozessor-Einheit (CPU) **610** gekoppelt ist, wie zum Beispiel einem Intel Pentium II- oder Pentium III-Prozessor.

[0067] Die CPU **610** ist mit einer Festplatte **612** über einen SCSI-Bus **614** gekoppelt. Die zentrale Prozessor-Einheit **610** ist weiterhin mit einer Bediener-Konsole **616** und einem Aufzeichnungs- und Verarbeitungs-System **618** über zwei Ethernet-Leitungen **620**, **622** verbunden.

[0068] Jeder der digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** empfängt 24 Signale, weil jeder der vier Detektoren D1-D16 innerhalb eines der digitalen Empfänger/Demodulatoren sechs Signale von einer Gruppe von sechs Sensoren empfängt. Die sechs Signale, die an jedem der optischen Detektoren D1-D16 ankommen, stammen von den sechs Laser-Quellen LS1-LS6, und sie haben eine unterschiedliche optische Wellenlänge und sie haben unterschiedliche Modulations-Frequenzen. Bei der Bestrahlung durch die sechs Signale gibt jeder der optischen Detektoren D1-D16 ein elektrisches Signal ab, das Komponenten proportional zur Intensität des darauf einfallenden Lichtes bei jeder der Modulations-Frequenzen und bei Harmonischen der Modulations-Frequenzen hat. Das elektrische Signal von einem der optischen Detektoren, beispielsweise dem ersten Detektor D1, wird in die sechs Signale aufgeteilt, die von den sechs akustischen Sensoren erzeugt werden, beispielsweise den ersten sechs ungeraden Sensoren S1, S3, S5, S7, S9, S11 deren Ausgänge im optischen Detektor weitergeleitet werden. Die sechs Signale werden durch Trennen der Komponenten entsprechend den Modulations-Frequenzen unterschieden. Obwohl das auf dem Detektor D1 einfallende Licht sechs unterschiedliche optische Wellenlängen umfasst, ist es nicht erforderlich, die Signale optisch zu trennen. Die Differenz der optischen Wellenlängen wird dazu verwendet, die sechs Signale daran zu hindern, eine optische Interferenz miteinander zu bewirken.

[0069] Die Gesamtzahl der akustischen Sensor-Signale, die von der Detektor/Elektronik-Baugruppe **601** verarbeitet wird, die in der in [Fig. 6](#) gezeigten Ausführungsform verwendet wird, ist 96. Jeder der digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** empfängt vier optische Signale von vier der Rückführungs-Lichtleitfasern R1-R16. Der digitale 24-Kanal-Empfänger/Demodulator **604** wandelt jeden der vier Lichtstrahlen in sechs getrennte elektrische Kanäle um, was zu 24 elektrischen Kanälen führt. Weil die Detektor/Elektronik-Baugruppe **601** für die in [Fig. 6](#) gezeigte Ausführungsform vier digitale 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** aufweist, werden insgesamt 96 (4×24) elektrische Kanäle verwendet. Jeder der 96 elektrischen Kanäle enthält Information, die sich auf die akustischen Schwingungen an einem jeweiligen der 96 akustischen Sensoren S1-S96 bezieht.

[0070] Wie dies weiter oben erwähnt wurde, umfasst jeder der akustischen Sensoren S1-S96 ein Interferometer **502**, das die kohärente Licht-Quelle in zwei Wellen aufteilt, die auf getrennten Pfaden verlaufen, die schließlich konvergieren. Beim Konvergieren ergeben die zwei Wellen eine Interferenz miteinander derart, dass die Intensität I der Kombination durch $I = A + B \cos \theta$ gegeben ist, worin A und B Konstanten sind und θ die Phasen-Differenz zwischen den zwei Wellen bei der Konvergenz ist.

[0071] Um die sechs Sensor-Signale, die den sechs Lasern L1-L6 zugeordnet sind, und die über jede Rückführungs-Lichtleitfaser (beispielsweise RF1) übertragen werden, zu multiplexieren, wird der Interferometer-Phasenwinkel jedes der sechs Sensoren mit einer unterschiedlichen Frequenz ω_n moduliert. Die Interferometer-Phasenwinkel-Modulation kann als $\theta(t) = C_n \cos \omega_n t$, dargestellt werden, worin $n = 1, \dots, 6$ ist, und C_n die Amplitude der Phasenmodulation in Radian ist. Der Phasenwinkel des Interferometers wird durch sinusförmiges Ändern der Phase jedes Lasers L1-L6 moduliert. Dies wird durch den Modulator M1-M6 mit einer sinusförmigen Änderung der Spannung längs einer (nicht gezeigten) Lithium-Niobat-Segmentes des optischen Pfades erreicht. Eine Laser-Quellen-Phasenmodulation $\Phi = \Phi_0 \cos(\omega t)$, worin Φ_0 die Phasen-Amplitude in Radian ist, führt zu einer Laser-Frequenz-Modulation $f = f_c + \Delta f \sin(\omega t)$, worin f_c die optische Träger-Frequenz und $\Delta f = \Phi_0 \omega / 2\pi$ ist. Die Frequenzmodulation führt ihrerseits zu einer Modulation des Interferometer-Phasen-Winkels

$\varphi = 2\pi\Delta L\Delta f/c \sin(\omega t)$, worin ΔL die Pfadlängen-Besetzung zwischen den zwei Interferometer-Pfaden und c die Lichtgeschwindigkeit in der Lichtleitfaser ist.

[0072] Diese Modulation führt zu einer sich zeitlich ändernden Intensität für den Ausgang des n -ten Interferometers, die durch: $I_n(t) = A_n + B_n \cos[C_n \cos(\omega_n t) + \varphi_n(t)]$ gegeben ist, worin $\varphi_n(t)$ die sich zeitlich ändernde Phase ist, die durch das akustische Signal in dem n -ten optischen Sensor (und durch Signal-Rauschen) hervorgerufen wird. Diese Gleichung kann in Ausdrücken einer Sessel-Funktion erweitert werden, um folgendes zu ergeben:

$$I_n(t) = A + B_n \{ [J_0(C_n) + 2\sum_{k=1,\infty} (-1)^k J_{2k}(C_n) \cos(2k\omega_n t)] \cos(\varphi_n(t)) - [2\sum_{k=0,\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C_n) \cos((2k+1)\omega_n t)] \sin(\varphi_n(t)) \}.$$

[0073] Wie dies weiter oben erwähnt wurde, sind die N Laser L1-L6 so gewählt, dass sie ausreichend unterschiedliche optische Träger-Frequenzen haben, um eine optische Interferenz zu vermeiden. Somit ist die Gesamt-Intensität an dem Detektor, I_{tot} , der mit dieser speziellen Rückführungs-Lichtleitfaser (beispielsweise RF1) verbunden ist, durch $I_{tot}(t) = \sum_{n=1,6} I_n(t)$ gegeben. Die Licht-Intensitäten, die von jedem der sechzehn Detektoren D1-D16 erfasst werden, werden durch eine analoge Gleichung beschrieben.

[0074] Die vorstehenden Gleichungen zeigen, dass der Interferometer-Intensitäts-Ausgang Signale nicht nur bei den sechs Modulations-Frequenzen ω_n sondern auch bei $2\omega_n$, $3\omega_n$ usw. enthält. Das multiplexierte Intensitäts-Signal, das an einem vorgegebenen Detektor D1-D16 empfangen wird, kann vollständig durch eine Detektion der Signal-Komponenten bei ω_n und $2\omega_n$ unter Verwendung der folgenden Anwendung demultiplexiert werden.

[0075] Das Gesamt-Ausgangs-Signal I_{tot} kann mit einem Signal bei ω_n und einem Signal bei $2\omega_n$ gemischt werden, und die Mischergebnisse können in einem Tiefpassfilter gefiltert werden, um das Signal bei allen Harmonischen oberhalb der ersten Harmonischen zu beseitigen. Dies führt zu „direkten“ (I-) und „quadratur“ (Q-) Komponenten derart, dass: $I_n = B_n G J_1(C_n) \sin\varphi_n(C_n)$ und $Q_n = B_n H J_2(C_n) \cos\varphi_n(t)$ ist, worin G und H die Amplituden der Misch-Signale sind, die den ω_n beziehungsweise $2\omega_n$ -Komponenten des Signals entsprechen. Die Eigenschaften von Bessel-Funktionen sind derart, dass $J_1(x)$ und $J_2(x)$ gleich sind, wenn der Parameter $x \approx 2,6$ ist. Siehe beispielsweise „Handbook of Mathematical Functions“, 1974, herausgegeben von M. Abramowitz und I. Stegun. Wenn dann $G = H$ und $C_n = 2,6$ Radian gewählt wird, so ergibt sich der Phasenwinkel aus: $\varphi_n(t) = \arctan(I_n/Q_n)$.

[0076] Somit mischen zur Demodulation die digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** die von den optischen Detektoren D1-D16 abgegebenen elektrischen Signale mit sinusförmigen Schwingungsformen bei den sechs Frequenzen, mit denen der Ausgang der sechs Laser L1-L6 moduliert ist. Die digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** mischen außerdem die von den optischen Detektoren D1-D16 abgegebenen elektrischen Signale mit sinusförmigen Schwingungsformen, die das Doppelte dieser sechs Frequenzen haben. Entsprechend mischen die digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** die elektrischen Signale, die von den optischen Detektoren D1-D16 abgegeben werden, mit sinusförmigen Trägern mit Frequenzen von ω_1 , ω_2 , ω_3 , ω_4 , ω_5 , ω_6 und $2\omega_1$, $2\omega_2$, $2\omega_3$, $2\omega_4$, $2\omega_5$, und $2\omega_6$.

[0077] Wie dies weiter oben erwähnt wurde, führen die demodulierten Signale, die als Ergebnis dieses Mischens erzeugt werden, zu direkten (I) und Quadratur-(Q-) Komponenten. Diese Komponenten werden für jeden Kanal als Eingänge an eine (nicht gezeigte) Schaltung geliefert, die den Arkustangens der zwei Komponenten abgibt. Auf diese Weise wird eine polare Phase aus den demodulierten Signalen gewonnen. Diese polare Phase entspricht der Phasen-Differenz zwischen den optischen Strahlen in dem Test- und Bezugs-Armen **510**, **805**. Die zeitliche Ableitung der polaren Phase wird mit (nicht gezeigten) digitalen Schaltungen erzeugt, die zur Implementierung einer Differenzierung ausgebildet sind. Die Ableitung der Phase ist proportional zur Größe der akustischen Schwingungen, die von den Sensoren S1-S96 gemessen werden.

[0078] Die Ableitung der Phase, die von zwei Kanälen jedes digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulators **604** erzeugt wird, wird an ein Element der entsprechenden 12-DSP-Elemente **606** gesandt. Die 12-DSP-Elemente **606** filtern und dezimieren das demodulierte Signal herunter auf Standard-Abtastproben-Raten, die von konventionellen seismischen Daten-Aufzeichnungs-Geräten benötigt werden. Diese 12-DSP-Elemente **606** sind mit dem PCI-Bus **608** gekoppelt und verwenden den PCI-Bus zur Kommunikation mit der CPU **610**. Entsprechend wird die gefilterte und dezimierte Ableitung der Phase der CPU **610** zugeführt. Es sei bemerkt, dass jedes der 12-DSP-Elemente **606** die Phasen-Information von zwei akustischen Kanälen verarbeitet, deren Verarbeitung jeweils getrennt ausgeführt wird.

[0079] Die CPU **610** formatiert die Daten, die den akustischen Schwingungen entsprechen, derart, dass sie mit der Industrie-Norm (beispielsweise den SEG-D-Format) kompatibel sind. Beispielsweise stempelt die CPU **610** den akustischen Daten-Ausgang mit der Zeit der System-Ereignisse, wie zum Beispiel dem Beginn der Messung. Die CPU fügt weiterhin erforderliche Information hinzu, um die Daten gemäß dem Industrie-Standard-Format zu identifizieren.

[0080] Die CPU wickelt weiterhin Schnittstellen mit konventionellen seismischen Daten-Aufzeichnungs-Ausrüstungen ab. Die CPU **610** sendet die umformatierten akustischen Daten an seismische Daten-Aufzeichnungs-Ausrüstungen mit Industrie-Norm-Datenraten. In einzelnen werden die verarbeiteten und formatierten Signale, die von dem akustischen Sensoren S1-S96 und den optischen Detektoren D1-D16 erzeugt wurden, über den PCI-Bus **608** an die CPU **610** gesandt und an vom Kunden bereitgestellte seismische Verarbeitungs-Ausrüstungen über die Ethernet-Leitung **622** ausgegeben.

[0081] Die Haupt-CPU **610** ergibt zusätzlich eine System-Steuerung und Folge-Steuerung für die Betriebsweise der einzelnen Komponenten in dem akustischen Mess-System **100**.

[0082] Die CPU wickelt weiterhin Schnittstellen mit einer Bediener-Konsole **616** ab. Die Bediener-Konsole **616** ermöglicht eine manuelle System-Intervention und wird außerdem zur Anzeige des System-Status verwendet.

[0083] Die Detektor/Elektronik-Baugruppe **601** schließt zusätzlich ein Hilfs-Eingangs-/Ausgangs-Teilsystem **624** ein, das in Schnittstellen-Verbindung mit der zentralen Verarbeitungs-Einheit **610** über den PCI-Bus **608** steht. Dieses Hilfs-Eingangs-/Ausgangs-Teilsystem **624** ergibt eine Schnittstellen-Verbindung mit von dem Kunden gelieferten Ausrüstungen (CSE) **626**, um bis zu sechzehn akustische oder nicht-akustische Sensor-Eingänge für Zeit-Markierung oder Ereigniss-Triggerung zu liefern.

[0084] Die Detektor/Elektronik-Baugruppe **601** schließt zusätzlich eine globale Positionsbestimmungs-Mess-(GPS-)Elektronik-Karte **628** ein, die elektronisch mit einer Antenne **630** verbunden ist. Die GPS-Elektronik-Karte **628** tritt mit der CPU **610** über den PCI-Bus **608** in Schnittstellen-Verbindung. Die GPS-Elektronik-Karte **628** liefert genaue Zeiten für die Haupt-CPU **610**, um ein Zeitstempeln der System-Ereignisse zu ermöglichen.

[0085] Bei der in [Fig. 6](#) gezeigten Ausführungsform ist eine Frequenz-Synthesizer-Karte **632** in der Detektor/Elektronik-Baugruppe **601** enthalten. Die Frequenz-Synthesizer-Karte **632** empfängt einen Synchronisations-Impuls von zusätzlichen von Kunden bereitgestellten Ausrüstungen (CSE) **634**. Vorzugsweise empfängt die Frequenz-Synthesizer-Karte **632** einen Synchronisations-Impuls von der Quellen-Elektronik **148**, die der akustischen Quelle **130** in [Fig. 1](#) zugeordnet ist. Wie dies in [Fig. 1](#) gezeigt ist, ist die Elektronik **148**, die der akustischen Quelle **130** zugeordnet ist, in dem zweiten Lastwagen **138** benachbart zu dem zweiten Bohrloch **132** angeordnet.

[0086] Die Frequenz-Synthesizer-Karte **632** ist elektrisch mit einer Laser-Modul-Steuer/Treiber-Karte **636** verbunden, die mit dem Laser-Quellen LS1-LS6 verbunden ist, die beide vorzugsweise in einem Laser-Einschub **638** angeordnet sind. Zusätzlich ist die Frequenz-Synthesizer-Karte **630** elektrisch mit einem ISA-Bus **640** verbunden, der ebenfalls mit der zentralen Prozessor-Einheit **610** gekoppelt ist.

[0087] Wie dies vorstehend beschrieben wurde, schließen die Laser-Quellen LS1-LS6 Laser L1-L6 und Modulatoren M1-M6 ein, die Signale an die optischen Speise-Leitungen F1-F6 liefern, die mit den akustischen Sensoren S1-S96 gekoppelt sind. Die Frequenz-Synthesizer-Karte **632** liefert an die Modulatoren M1-M6 periodische Schwingungsformen, die sechs Modulations-Frequenzen haben, um die Ausgänge der sechs Laser L1-L6 zu modulieren. Die Frequenz-Synthesizer-Karte **632** versorgt die digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** außerdem mit globalen Synchronisations- und Zeitsteuer-Signalen, um sicherzustellen, dass die Modulatoren M1-M6 und der Demodulator phasenstarr sind. Im einzelnen liefert die Frequenz-Synthesizer-Karte **632** ein Synchronisations-Signal und ein Hochgeschwindigkeits-Takt-Signal an die digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604**. Unter Verwendung dieses Synchronisations-Signals und dieses Takt-Signals erzeugen die digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** digitale Darstellungen der sinusförmigen Träger bei den sechs Modulations-Frequenzen $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$ und mit dem Doppelten der Modulations-Frequenzen $2\omega_1, 2\omega_2, 2\omega_3, 2\omega_4, 2\omega_5, \text{ und } 2\omega_6$. Diese digitalen Träger werden von den digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** für das Mischen und die Demodulation verwendet, wie dies vorstehend beschrieben wurde.

[0088] Die Betriebsweise des vorstehend beschriebenen akustischen Mess-Systems **100** gemäß den [Fig. 1-Fig. 6](#) ist in [Fig. 7](#) in Form eines Ablaufdiagramms gezeigt. Ein erster Block **702** in einem Quellen-Ablaufdiagramm stellt das Trigger-Ereignis für den Betrieb des akustischen Mess-Systems **100** dar, wobei die akustische Quelle **130** einen Synchronisations-Impuls an das akustische Mess-System sendet (siehe [Fig. 1](#)). Bei einer alternativen bevorzugten Ausführungsform kann das akustische Mess-System **100** einen Synchronisations-Impuls an die akustische Quelle **130** senden, um die Quelle zu triggern. Die akustische Quelle **130** kann beispielsweise eine akustische Oberflächen-Quelle oder eine unterirdische akustische Quelle umfassen.

[0089] Das akustische Mess-System **100** empfängt den Synchronisations-Impuls, wie dies durch einen ersten Block **704** in einer Serie von Blöcken gezeigt ist, die den Schritten entsprechen, die von dem akustischen Mess-System **100** ausgeführt werden. Als Antwort auf den Empfang des Synchronisations-Impulses beginnt das akustische Mess-System **100** mit der Messung. Das heißt, dass das akustische Mess-System **100** mit der Messung des Pegels der akustischen Schwingungen an den Sensoren S1-S96 beginnt. Der Start der Messung ist durch einen Block **706** in [Fig. 7](#) dargestellt.

[0090] Wie dies in dem Quellen-Ablaufdiagramm gezeigt ist, beginnt die akustische Quelle **130** nach einer vorgegebenen Verzögerung (Block **708**) mit der Erzeugung akustischer Schwingungen **102**, wie dies im Block **710** gezeigt ist. Wie dies durch eine Block **712** dargestellt ist, setzt das akustische Mess-System **100** die Überwachung des Pegels der akustischen Schwingungen an den Sensoren S1-S96 fort, und beginnt mit der Messung der akustischen Schwingungen **102**, die von der akustische Quelle **130** emittiert werden, und die akustischen Sensoren erreichen. Eine ausführlichere Erläuterung der Schritte, die bei der Messung der akustischen Schwingung auftreten, sind in [Fig. 8](#) im Ablaufdiagramm-Format dargestellt, wie dies weiter unten ausführlicher erläutert wird.

[0091] Ein Block **714** stellt das Senden der Ergebnisse der Messungen des Pegels der Schwingungen an den akustischen Sensoren S1-S96 an das seismische Verarbeitungs-System als seismische Daten durch das Mess-System **100** dar. An einem Block **716** stoppt das System **100** die Messung der akustischen Daten. Eine Feststellung, wann die Messung von Daten zu stoppen ist, beruht in vorteilhafter Weise auf den Ablauf eines vorgegebenen Zeitintervalls seit dem Synchronisations-Impuls.

[0092] Der Prozess zur Messung akustischer Daten in dem Block **706** und dem Block **712** in [Fig. 7](#) ist mit weiteren Einzelheiten in [Fig. 8](#) gezeigt. Wie dies vorstehend erläutert wurde, beginnt die Messung von akustischen Schwingungen an den akustischen Sensoren S1-S96 unmittelbar nach dem Empfang des Synchronisations-Impulses, obwohl eine Verzögerung zwischen der Zeit, in der der Synchronisations-Impuls empfangen wird, und dem Beginn der Erzeugung akustischer Wellen **102** durch die akustische Quelle **130** existiert. Dies ermöglicht es dem seismischen Verarbeitungs-System, Daten, die das akustische Hintergrund-Rauschen anzeigen, vor dem Empfang der akustischen Wellen von der akustischen Quelle zu empfangen.

[0093] In [Fig. 8](#) zeigt ein erster Block **802**, dass Dauer-Wellen-Licht von jeder der Laser-Quellen LS1-LS6 emittiert wird. Das Licht von jeder Quelle wird in der vorstehend beschriebenen Weise moduliert. Im einzelnen ist das Licht von jeder der Laser-Quellen LS1-LS6 mit einer unterschiedlichen Modulations-Frequenz moduliert.

[0094] Ein Block **804** stellt den nächsten Schritt dar, in dem die Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 das Licht von den Laser-Quellen LS1-LS6 an die optischen Sensoren S1-S96 ausbreiten. Wie dies vorstehend erläutert wurde, wird das Licht in den jeweiligen Test-Armen **508** der optischen Sensoren S1-S96 in veränderlicher Weise verzögert, wenn akustische Schwingungen **102** auf die Sensoren auftreffen (siehe Block **806**). Das Licht in dem Bezugs-Arm **510** jedes Sensors S1-S96 wird nicht in veränderlicher Weise verzögert. Jeder der akustischen Sensoren S1-S96 kombiniert das Licht von den zwei Armen **508**, **510** in dem Ausgangs-Koppler **512**.

[0095] Ein Block **808** stellt die Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF16 dar, die das von den optischen Sensoren S1-S96 abgegebene Licht an die Lichtleitfaser-Empfänger **604** übertragen, das heißt die digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604**. Die Lichtleitfaser-Empfänger, die die optischen Detektoren D1-D16 einschließen, wandeln die auf die optischen Detektoren auftreffenden optischen Signale in elektrische Signale um, wie dies in Block **810** gezeigt, ist. Wie dies in einem Block **812** gezeigt ist, wandelt die Verarbeitungselektronik **304** das von den optischen Detektoren D1-D16 abgegebene elektrische Signal in ein SEG-D-Format um, ein Standard-Format, dass von der Society of Exploration Geophysicists festgelegt wurde. Das SEG-D-Format ist konventionell und in der Technik gut bekannt.

[0096] Die vorstehend beschriebene Ausführungsform ist insbesondere gut für unterirdische geophysikalische Erkundungen geeignet, wie sie für die Feststellung des Vorhandenseins von „an Ort und Stelle befindlichen“ Öl-Reserven verwendet werden. Die akustischen Sensoren S1-S96, die in dem akustischen Anordnungs-Kabel **104** enthalten sind, können in das Bohrloch einer Öl-Quelle abgesenkt werden. Die akustischen Sensoren S1-S96 können auch für seismische Land-Anwendungen und in Meeresboden-Kabeln verwendet werden.

[0097] Wie er hier verwendet wird, ist der Ausdruck „Bohrloch“ als ein Schacht definiert, der sich zum Boden einer Bohrung **118** erstreckt, und eine „Bohrung“ ist lediglich ein Loch, das durch Bohren und Entfernen von Erde aus dem Untergrund gegraben wird, in vielen Fällen für den Zweck des Zuganges an Öl oder Wasser.

Kabel

[0098] Das in [Fig. 2](#) gezeigte Kabel **202** ist so bemessen, dass es in ein Bohrloch **118**, wie zum Beispiel ein Öl-Bohrloch passt. Wenn das Kabel **202** klein genug ist, kann das Kabel in das Produktions-Rohr oder in den Spalt zwischen dem Produktions-Rohr in der Auskleidung eingesetzt werden. Das Kabel muss jedoch kleiner als zumindest der Innen-Durchmesser des Produktions-Rohres sein.

[0099] Wie dies vorstehend beschrieben wurde, bezieht sich der Ausdruck „Auskleidung“ auf ein großes Metall-Rohr, das typischerweise in ein Bohrloch eingesetzt ist. „Produktions-Rohre“ sind kleinere Rohre, die in die Auskleidung eingesetzt sind und einen Zugang an den Boden des Bohrloches **118** ermöglichen.

[0100] Der Standard-Durchmesser für Produktions-Rohre beträgt 50,8 mm (zwei Zoll) in den vereinigten Staaten und 32 mm (1,25 Zoll) in der Nordsee. Entsprechend muss, um in das Produktions-Rohr oder in die Lücken zwischen den Produktions-Rohr zu passen, das Kabel **202** einen Durchmesser haben, der kleiner als 50,8 mm (zwei Zoll) zur Verwendung in den vereinigten Staaten und kleiner als 32 mm (1,25 Zoll) zur Verwendung in der Nordsee ist.

[0101] Konventionelle elektronische akustische Sensor-Anordnungen reichen von 63,5 mm (2,5 Zoll) bis 152 mm (6 Zoll) im Durchmesser, was erfordert, dass alle die Produktions-Rohre aus der Auskleidung entfernt werden, um eine die Anordnung enthaltende Sonde in das Bohrloch **118** hinein einzusetzen. Nachdem die Sonde entfernt wurde, muss das Produktions-Rohr erneut in die Auskleidung eingesetzt werden. Das Verfahren zum Entfernen und zum Wiedereinsetzen ist sowohl kostspielig, zeitraubend als auch unbequem.

[0102] Entsprechend hat das Kabel **202**, unter Einschluss des Herabführungs-Kabels **106**, der Schnittstelle **204** und des akustischen Anordnungs-Kabels **104** einen Außen-Durchmesser, der kleiner als 50,8 mm (zwei Zoll) ist. Der Durchmesser des Kabels **202** ist vorzugsweise kleiner 32 mm (1,25 Zoll). Stärker bevorzugt ist der Durchmesser des Kabels **202** kleiner als 27,9 mm (1,1 Zoll). Weiterhin ändert sich der Durchmesser des akustischen Anordnungs-Kabels **104** vorzugsweise um nicht mehr als $\pm 0,25$ mm ($\pm 0,01$ Zoll).

[0103] Wie dies vorstehend gezeigt wurde, schließt das Kabel **202** ein Herabführungs-Kabel **106** ein, das mit einem akustischen Anordnungs-Kabel **104** verbunden ist. Das Herabführungs-Kabel **106** enthält keinerlei Sensoren S1-S96. Vorzugsweise hat das Herabführungs-Kabel **106** eine Länge, die aus einem Bereich zwischen 305 m (1.000 Fuß) und 6.100 m (20.000 Fuß) ausgewählt ist. Bei einer speziellen Ausführungsform ist das Herabführungs-Kabel **106** angenähert 3.050 m (10.000 Fuß) lang.

[0104] Wie dies weiter oben beschrieben wurde, enthält das akustische Anordnungs-Kabel **104** die akustischen Sensoren S1-S96. Vorzugsweise sind diese akustischen Sensoren S1-S96 gleichmäßig über das akustische Anordnungs-Kabel **104** mit Abständen verteilt. Beispielsweise weist bei einer speziellen Ausführungsform jeder der akustischen Sensoren S1-S96 einen Abstand von 1,52 m (5 Fuß) in dem akustischen Anordnungs-Kabel **104** auf. Der Abstand kann sich jedoch um $\pm 6,4$ mm ($\pm 0,25$ Zoll) oder um $\pm 0,5\%$ in Axial-Richtung ändern.

[0105] Der Abstand ist bei der vorliegenden Erfindung jedoch nicht auf die Abstände von 1,52 m (5 Fuß) beschränkt, sondern der Abstand kann größer oder kleiner als 1,52 m (5 Fuß) sein. Beispielsweise können in einer Anwendung die akustischen Sensoren S1-S96 vorzugsweise in einem Abstand von 1,52 m (5 Fuß) bis 30,5 m (100 Fuß) in dem akustischen Anordnungs-Kabel **104** angeordnet sein. Ein engerer Abstand ergibt eine bessere Auflösung der akustischen Signale. Ein größerer Abstand ergibt eine größere Überdeckung des akustischen Signals auf Kosten der Auflösung. Obwohl ein gleichförmiger Abstand vorzuziehen ist, muss der Abstand nicht zwischen jedem der Sensoren S1-S96 gleich sein. Die vorstehend beschriebenen Abstände gelten

immer noch für den Fall, bei dem die Sensoren S1-S96 nicht durch den gleichen Abstand getrennt sind.

[0106] Die Länge des aktiven Teils des akustischen Anordnungs-Kabels **104** ändert sich entsprechend dem Abstand zwischen dem akustischen Anordnungs-Sensoren S1-S96. Der aktive Teil des Anordnungs-Kabels **104** ist die Apertur der Anordnung. Vorzugsweise weist das akustische Anordnung-Kabel **104** eine Länge auf, die aus dem Bereich zwischen 61 m (200 Fuß) und 305 m (1.000 Fuß) ausgewählt ist. Vorzugsweise beträgt die Länge des akustischen Anordnungs-Kabels **104** angenähert 152 m (500 Fuß). Durch Anordnen der Sensoren in einem größeren Abstand kann die Apertur auf bis zu 3.050 m (10.000 Fuß) vergrößert werden.

[0107] Vorzugsweise ist das Kabel **202** haltbar genug, um die Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 und die Rückführungs-Lichtleitfasern RF1-RF16 und die akustischen Sensoren S1-S96 gegen die rauen Umgebungs-Bedingungen Bohrloch-abwärts zu schützen. Wie er hier verwendet wird, ist der Ausdruck „Bohrloch-abwärts“ als abwärts in dem Bohrloch definiert. Die Bohrloch-abwärts-Umgebung schließt hohe Temperaturen und hohe Drücke ein, und sie kann außerdem korrosive Flüssigkeiten einschließen, wie sie sich typischerweise in einer Ölbohrungs-Umgebung finden. In manchen Fällen wird das Kabel **202** in ein Rohr abgesenkt, wie zum Beispiel das Produktions-Rohr oder die Auskleidung in dem Bohrloch, wobei der Druck in einem Bereich des Rohres an der Oberseite des Bohrloches (das heißt an der Oberfläche **116**) höher als der Umgebungs-Druck an der Oberseite des Bohrloches (das heißt an der Oberfläche **116**, jedoch außerhalb der Bohrung ist). Das Kabel **202** kann durch einen Fett-Injektions-Kopf abgesenkt werden, der in Lage ist, eine Druck-Differenz zwischen dem Umgebungs-Druck an der Oberseite der Bohrung und dem Druck innerhalb des Gebietes des Rohres an der Oberseite der Bohrung aufrecht zu erhalten. In dem Fall, in dem das Kabel **202** über eine Fett-Injektions-Kopf abgesenkt wird, ist ein Kabel **202** mit einem gleichförmigen Durchmesser erforderlich.

Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen

[0108] Wie dies in den **Fig. 3** und **Fig. 4A-Fig. 4H** gezeigt ist, koppeln die Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 das Licht von den Laser-Quellen LS1-LS6 in die optischen Sensoren S1-S96 über die Eingangs-Koppler **420** ein. In jeder Sensor-Gruppe **401-408** wird ein bestimmter Bruchteil des Lichtes von den Laser-Quellen LS1-LS6 an einen der Sensoren S1-S96 in dieser Gruppe gekoppelt. Die Menge an Licht, die in jeden Sensor S1-S96 eingekoppelt wird, ist vorzugsweise so gewählt, dass Unterschiede in dem Pegel des optischen Signals, das an jeden Sensor geliefert wird, verringert werden, und dass insbesondere die Änderungen des Leistungs-Pegels der optischen Signale, die den verschiedenen optischen Detektoren D1-D16 zugeführt werden, verringert werden. Eine Konstruktion für Sensor-Anordnungen, die es ermöglicht, das die Signal-Pegel der optischen Signale, die von den Sensor-Gruppen **401-408** an ihre zugehörigen Detektoren D1-D16 zurückgeliefert werden, in ihrer Größe ähnlich sind, ist in dem verwandten Patent mit dem Titel „Architecture for Large Optical Fiber Array Using Standard 1 × 2 Couplers“, US-Patent US 6249622 B1 (Hodgson et al) beschrieben.

[0109] Obwohl sechs Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 Lichtstrahlen übertragen, die von sechs Laser-Quellen L1-L6 emittiert werden, wie dies in den **Fig. 3** und **Fig. 4A-Fig. 4H** gezeigt ist, ist die Anzahl von Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen, die verwendet werden können, nicht auf sechs beschränkt. Vielmehr kann die Anzahl der Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6, die verwendet wird, von zwei bis zwölf oder mehr reichen. Vorzugsweise entspricht jedoch die Anzahl von Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 der Anzahl von Laser-Quellen LS1-LS6.

[0110] In ähnlicher Weise koppelt bei der in den **Fig. 4A-Fig. 4H** gezeigten Ausführungsform jede der Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 Licht in einen der Sensoren S1-S96 in jeder der Sensor-Gruppen **401-408** ein. Die vorliegende Erfindung ist nicht auf diese Anordnung beschränkt.

Akustische Sensoren

[0111] Die akustischen Sensoren S1-S96, die bei der in den **Fig. 1-Fig. 5** gezeigten Ausführungsform verwendet werden, sind „optische“ Sensoren, und insbesondere „vollständig optische“ Sensoren.

[0112] Wie er hier verwendet wird, bezieht sich der Ausdruck „optische“ Einrichtungen auf Licht oder die Verwendung von Licht, das einer elektromagnetischen Strahlung in dem Wellenbereich entspricht, der sich von dem Vakuum-Ultraviolett bei ungefähr 40 Nanometern durch das sichtbare Spektrum zu dem fernen Infrarot-Bereich bei einer Wellenlänge von 1 Millimeter erstreckt. Insbesondere arbeiten die optischen Sensoren in der vorliegenden Erfindung in dem Bereich von sichtbaren oder Infrarot-Wellenlängen. Insbesondere arbeiten

die optischen Sensoren in dem Infrarot-Bereich bei ungefähr 1319 Nanometer.

[0113] Wie er hier verwendet wird, bedeutet der Ausdruck „vollständig optisch“, dass der sich im Bohrloch nach unten erstreckende Teil der akustischen Sensor-Anordnung keinerlei Elektronik einschließt. Insbesondere sind die akustischen Sensoren S1-S96 elektrisch passive Geräte; die erfordern keine elektrischen Komponenten oder elektrische Verbindungen zu den anderen Komponenten. Insbesondere beruhen die akustischen Sensoren S1-S96 nicht auf irgendwelchen Halbleiter-basierten Elektroniken, die gegenüber Temperatur äußerst empfindlich sind. Halbleiter-basierte Elektroniken, wie zum Beispiel Transistoren, sind im allgemeinen nicht bei den hohen Temperaturen brauchbar, die in der Umgebung in der Tiefe des Bohrloches vorherrschen, beispielsweise bei 3.050 m (10.000 Fuß) unterhalb der Erdoberfläche. Beispielsweise haben einige Vorverstärker, die zum Überleben bei hohen Temperaturen ausgelegt sind, eine kurze Lebensdauer und halten lediglich eine Stunde unter harten Bedingungen. Im Gegensatz hierzu erfordert die vorstehend beschriebenen Ausführungsform keine Vorverstärker in dem Bohrloch.

[0114] Jeder der akustischen Sensoren S1-S96 umfasst bei der bevorzugten Ausführungsform einen Sensor, der einen optische Strahl als Eingang empfängt und ein optisches Signal als Ausgang liefert, das Information enthält, die dem Pegel der akustischen Schwingung entspricht, die auf dem Sensor auftrifft. Besonders bevorzugt sind die bei der vorliegenden Erfindung verwendeten Sensoren S1-S96 faseroptische Sensoren, bei denen ein Lichtstrahl in ein Ende einer Lichtleitfaser eingeleitet wird, der Lichtstrahl in irgendeiner Weise geändert wird, während er sich in der Lichtleitfaser befindet, und dieser geänderte Strahl an einem anderen Ende der Lichtleitfaser abgegeben wird. Wie er hier verwendet wird, ist der Ausdruck „faseroptischer Sensor“ als ein Sensor zur Überwachung irgendeiner physikalischen Eigenschaft definiert, und dieser Sensor umfasst einen Längenabschnitt einer Lichtleitfaser, in der sich Licht befindet, wobei die Lichtleitfaser als ein Wandler wirkt, der irgendein Attribut des Lichtes bei der Beaufschlagung mit der Änderung in der physikalischen Eigenschaft ändert, die gemessen wird.

[0115] Vorzugsweise sind die akustischen Sensoren S1-S96 optische Interferometer. Besonders bevorzugt sind die Sensoren S1-S96 Mach-Zehnder-Interferometer. Obwohl die akustischen Sensoren S1-S96, wie sie in [Fig. 5](#) gezeigt sind, Mach-Zehnder-Interferometer umfassen, sind die akustischen Sensoren der vorliegenden Erfindung nicht hierauf beschränkt, sondern sie können andere Interferometer sowie andere Arten von optischen Sensoren umfassen, unter Einschluss von anderen Sensoren, als Lichtleitfaser-Sensoren. Andere Interferometer können beispielsweise Michelson-Interferometer, Fabry-Perot-Interferometer oder Sagnac-Interferometer einschließen.

[0116] Gemäß der vorliegenden Erfindung müssen die akustischen Sensoren S1-S96 in der Lage sein, am Boden eines Bohrloches zu arbeiten. Insbesondere müssen die Sensoren S1-S96 in der Lage sein, in einer Tiefe in dem Bereich von zwischen 305 m und 6.100 m (1.000 und 20.000 Fuß) unterhalb der Erdoberfläche zu funktionieren und ein zurückgewinnbares Signal zu erzeugen. insbesondere beträgt diese Tiefe ungefähr 3.050 m (10.000 Fuß).

[0117] Im einzelnen müssen die Sensoren S1-S96 in der Lage sein, in dem akustischen Anordnungs-Kabel **104** zu funktionieren, während die Temperatur, die das akustische Anordnungs-Kabel umgibt, in dem Bereich zwischen 100°C und 150°C liegt.

[0118] Zusätzlich müssen die Sensoren S1-S96 in der Lage sein, in dem akustischen Anordnungs-Kabel **104** zu arbeiten, während der Druck auf das akustische Anordnungs-Kabel in dem Bereich von 38 MPa (5.500 englische Pfund pro Quadratzoll (p.s.i.)) liegt.

[0119] Die akustischen Sensoren S1-S96 müssen in der Lage sein, in dem akustischen Anordnungs-Kabel **104** zu funktionieren, wenn das akustische Anordnungs-Kabel in Wasser eingetaucht ist. Entsprechend können die optischen Sensoren S1-S96 ein Hydrophon umfassen. Alternativ kann der optische Sensor S1-S96 ein Geophon oder eine Kombination eines Hydrophons und eines Geophons umfassen, beispielsweise ein Hydrophon und drei Geophone. Ein Geophon ist ein Vektor-Sensor. Entsprechend besteht die bevorzugte Anordnung darin, drei Geophone miteinander zu verwenden, möglicherweise in Kombination mit einem Hydrophon.

[0120] Ein Hydrophon misst Drücke, Druck-Änderungen oder beides. Ein Hydrophon misst typischerweise einen Druck oder Druck-Änderungen in dem Tonfrequenz- oder seismischen Bereich, der zumindest 1 Hz bis 30kHz entspricht. Ein Geophon misst eine Bewegung, Verschiebung, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung. Das Geophon misst typischerweise eine Bewegung, Verschiebung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung in dem Tonfrequenz oder seismischen Bereich, der zumindest 0,1 Hz bis 10 kHz entspricht. Eine bevor-

zugte Hydrophon-Konstruktion wird weiter unten beschrieben.

[0121] Obwohl 96 akustische Sensoren S1-S96 in den **Fig. 3** und **Fig. 4A-Fig. 4H** gezeigt sind, ist die Anzahl von Sensoren, die verwendet werden können, nicht auf 96 beschränkt. Wie dies weiter oben beschrieben wurde, kann die Anzahl der Sensoren auf 192 verdoppelt werden. Allgemeiner kann die Anzahl der akustischen Sensoren S1-S96 von 2 bis mehr 200 reichen. Wenn auch eine Zeit-Multiplexierung verwendet wird, so kann die Anzahl der akustischen Sensoren S1-S96 um das 10 bis 100 fache vergrößert werden. Entsprechend kann die Anzahl von akustischen Sensoren S1-S96 von 2 bis 20.000 oder mehr reichen. Vorzugsweise entspricht jedoch Anzahl der akustischen Sensoren S1-S96 dem Produkt der Anzahl von Laser-Quellen LS1-LS6 und der Anzahl von optischen Detektoren D1-D16, was auch dem Produkt der Anzahl der Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF16 und der Anzahl der Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF16 entspricht.

Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen

[0122] Wie dies in den **Fig. 3** und **Fig. 4A-Fig. 4H** gezeigt ist, koppeln die Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF16 das Licht von den akustischen Sensoren S1-S96 an die optischen Detektoren D1-D16 über Ausgangs-Koppler **420**. In jeder Sensor-Gruppe **401-408** wird ein bestimmter Bruchteil des Lichtes von den akustischen Sensoren S1-S96 an einen der optischen Detektoren D1-D16 gekoppelt. Die Menge an Licht, die in jeden Sensor S1-S96 eingekoppelt wird, ist vorzugsweise so gewählt, dass die Differenzen des Leistungs-Pegels der optischen Signale, die an die verschiedenen optischen Detektoren D1-D16 geliefert werden, verringert werden. Insbesondere sind die Kopplungs-Verhältnisse der Eingangs-Koppler **420** und der Ausgangs-Koppler **430** so ausgewählt, dass Änderungen der zurückgelieferten optischen Signal-Pegel an den Detektoren D1-D16 verringert sind. Wie dies weiter oben erläutert wurde, ist eine Konstruktion für Sensor-Anordnungen, die es ermöglicht, dass die Signal-Pegel der optischen Signale, die von den Sensor-Gruppen **401-408** an ihre zugehörigen Detektoren D1-D16 zurückgeliefert werden, in ihrer Amplitude ähnlich sind, wie in der vorstehend genannten US-Patentanmeldung Nr. 09/107,399 beschrieben.

[0123] Die in den **Fig. 3** und **Fig. 4A-Fig. 4H** gezeigte Ausführungsform schließt acht Sensor-Gruppen ein, von denen zwei benachbarten Sensoren weder eine gemeinsame Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitung noch eine gemeinsame Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitung haben. Die vorliegende Erfindung ist nicht auf diese Anordnung beschränkt. Beispielsweise können sechzehn Sensor-Gruppen so konfiguriert sein, dass jeder Sensor-Gruppe eine der Rückführungs-Lichtleitfasern RF1-RF16 ausschließlich zugeordnet ist, wie dies in dem US-Patent 6,249,622 B1 (Hodgson et al) beschrieben ist.

[0124] Gemäß der vorliegenden Erfindung müssen die Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF16 sowie die Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 in der Lage sein, in der Tiefe eines Bohrloches zu arbeiten, und sie müssen daher in der Lage sein, bei einer Tiefe in dem Bereich zwischen 1.500 und 6.100 m (5.000 und 20.000 Fuß) unterhalb der Erdoberfläche funktionieren und ein zurückgewinnbares Signal erzeugen können.

[0125] Wie dies vorstehend beschrieben wurde, sind die Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF16 sowie die Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 in dem Kabel **202** enthalten. Dieses Kabel **202** dient teilweise zum Schutz der akustischen Anordnung gegenüber den rauen Umgebungen in der Tiefe des Bohrloches. Insbesondere müssen die Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen sowie die Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen in der Lage sein, in dem Kabel zu arbeiten, während die das Kabel umgebende Temperatur im Bereich zwischen 100°C und 150°C liegt. Zusätzlich müssen die Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen und die Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen in der Lage sein, in dem Kabel zu funktionieren, während der Druck auf das Kabel bis zu 38 MPa (5.500 psi) beträgt.

[0126] Die Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF16 sowie die Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 müssen in der Lage sein, in dem Kabel zu arbeiten, wenn das Kabel in Wasser eingetaucht ist.

[0127] Obwohl sechzehn Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen in den **Fig. 4A-Fig. 4H** gezeigt sind, ist die Anzahl der Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen, die verwendet werden können, nicht auf sechzehn beschränkt. Beispielsweise kann die Anzahl der Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen auf 32 verdoppelt werden, wie dies vorstehend beschrieben wurde. Allgemein kann die Anzahl der Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen, die verwendet wird, von 2 bis mehr als 32 reichen.

[0128] Bei der in den [Fig. 1-Fig. 5](#) gezeigten Ausführungsform geben die optischen Detektoren D1-D16 ein elektrisches Signal ab, dessen Amplitude proportional zu der Intensität des einfallenden Lichtes ist. Im Einzelnen geben diese optischen Detektoren D1-D16 eine Spannung oder einen Strom in Abhängigkeit von der Intensität des einfallenden Lichtes ab. Bei einer Ausführungsform geben die optischen Detektoren D1-D16 einen Strom ab, der von der Intensität des einfallenden Lichtes abhängt, und es wird ein Transimpedanz-Verstärker verwendet, um den Ausgangsstrom in eine Spannung umzuwandeln.

[0129] Wie dies in den [Fig. 3](#) und [Fig. 4A-Fig. 4H](#) gezeigt ist, lenkt jede der Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF16 Licht auf einen der optischen Detektoren D1-D16. Bei einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfasst jeder der optischen Detektoren D1-D16 einen Polarisations-Diversity-Empfänger, um sicherzustellen, dass das stärkste optische Interferenz-Signal gewählt und verarbeitet wird. Bei dieser Ausführungsform schließt jeder der optischen Detektoren D1-D16 drei Foto-Detektoren, wie zum Beispiel Foto-Dioden, ein, die einen Teil des Lichtes von dem auf den optischen Detektor einfallenden Strahl messen. Insbesondere messen die drei Foto-Detektoren drei unterschiedliche Polarisationen. Die Verarbeitungselektronik **304** tastet nachfolgend das von jedem der drei Foto-Detektoren stammende Signal ab und wählt den Foto-Detektor, der das stärkste Signal ergibt, für jeden akustischen Kanal aus. Ein Polarisations-Diversity-Empfänger, der drei derartige Foto-Dioden verwendet, ist in dem US-Patent 5,852,507 auf den Namen von Hall beschrieben.

[0130] Obwohl sechzehn optische Detektoren D1-D16 in [Fig. 3](#) gezeigt sind, ist die Anzahl der optischen Detektoren, die verwendet werden können, nicht auf sechzehn beschränkt. Beispielsweise kann die Anzahl der optischen Detektoren D1-D16 auf 32 verdoppelt werden, wie dies vorstehend erläutert wurde. Allgemein kann die Anzahl der verwendeten optischen Detektoren D1-D16 von 2 bis zu mehr als 32 reichen. Vorzugsweise entspricht jedoch die Anzahl der optischen Detektoren D1-D16 der Anzahl der Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen.

Digitale 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren (Lichtleitfaser-Empfänger)

[0131] Die digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604**, die alternativ als Lichtleitfaser-Empfänger bezeichnet werden, sind in der vorstehend beschriebenen [Fig. 6](#) sowie in den [Fig. 9A-Fig. 9B](#) gezeigt.

[0132] Die [Fig. 9A-Fig. 9B](#) zeigen die Detektor/Elektronik-Baugruppe **601**, den Laser-Einschub **638** und die akustische Sensor-Anordnung **602** für eine zweite Ausführungsform des akustischen Mess-Systems **100** gemäß der vorliegenden Erfindung, das 192 akustische Sensoren S1-S192 (nicht gezeigt) und sechs Laser-Quellen LS1-LS6 hat.

[0133] Ein derartiges System **100** mit 192 akustischen Sensoren S1-S192 ist in der vorstehend beschriebenen [Fig. 3B](#) gezeigt. Das System **100** in [Fig. 3B](#) umfasst 192 Sensoren S1-S192, die in zwei getrennten akustischen Anordnungs-Kabeln **104** enthalten sind, die an zwei getrennten Herabführungs-Kabeln **106** angebracht sind.

[0134] Die Laser-Quellen LS1, LS2, LS3, LS4, LS5, LS6 speisen zwölf optische Zuführungs-Leitungen F1-F12, die an optische Koppler C1-C6 angeschlossen sind. Ein erster Satz von sechs optischen Zuführungs-Leitungen F1-F6 erstreckt sich von den optischen Kopplern C1-C6 bis zu einem ersten Abschluss **306a**, der mit einem ersten Kabel **202** verbunden ist. Das erste Kabel **202a** umfasst ein erstes Herabführungs-Kabel **106a** und ein erstes akustisches Anordnungs-Kabel **104a**. Das erste akustische Anordnungs-Kabel **104a** enthält einen ersten Satz von 96 akustischen Sensoren S1-S96. Ein zweiter Satz von sechs optischen Zuführungs-Leitungen F7-F12 erstreckt sich von optischen Kopplern C1-C6 zu einem zweiten Abschluss **306b**, der mit einem zweiten Kabel **202b** verbunden ist. Dieses zweite Kabel **202b** umfasst ein zweites Herabführungs-Kabel **106b** und ein zweites akustisches Anordnungs-Kabel **104b**. Das zweite akustische Anordnungs-Kabel **104b** enthält einen zweiten Satz von 96 akustischen Sensoren, die mit S97-S192 bezeichnet sind.

[0135] Ein erste Abschluss **306a** ergibt weiterhin eine Verbindung zwischen dem ersten Herabführungs-Kabel **106a** und **16** Rückführungs-Lichtleitfasern R1-R16, die mit sechzehn optischen Detektoren D1-D16 gekoppelt sind. Der zweite Abschluss **306b** ergibt weiterhin eine Verbindung zwischen dem zweiten Herabführungs-Kabel **106b** und sechzehn zusätzlichen Rückführungs-Lichtleitfasern, die mit R17-R32 bezeichnet sind und die mit sechzehn zusätzlichen optischen Detektoren D17-D32 gekoppelt sind. Ein derartiges System **100** hat

sechs Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6 (nicht gezeigt) und 32 Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF32 (nicht gezeigt) in jedem Kabel **202a**, **202b**. Die Ausgänge der 32 optischen Detektoren D1-D32 sind elektrisch in einer Verarbeitungs-Elektronik **304** verbunden.

[0136] In einer alternativen Ausführungsform, die 192 akustische Sensoren S1-S192 umfasst, können die 192 Sensoren S1-S192 in einem einzigen akustischen Anordnungs-Kabel **104** enthalten sein, das an einem Herabführungs-Kabel **106** angebracht ist. Ein derartiges System **100** hat sechs Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen DF1-DF6, 32 Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF32 und 32 optische Detektoren D1-D32.

[0137] Es kann entweder ein System **100** mit einem einzigen Kabel **202** oder ein System mit zwei Kabeln **202a**, **202b** in Verbindung mit 192 Sensoren S1-S192 und der Detektor/Elektronik-Baugruppe **601** verwendet werden, die in den [Fig. 9A-Fig. 9B](#) gezeigt ist. Wie dies weiter oben erläutert wurde, können die 192 Sensoren in einem einzigen Kabel **202** enthalten sein, oder ein erster Satz von Sensoren S1-S96 kann in einem ersten Kabel enthalten sein, und ein zweiter Satz von Sensoren S97-S192 kann in einem zweiten Kabel enthalten sein.

[0138] [Fig. 9B](#) zeigt eine optische Sensor-Anordnung **602**, die faseroptische Sensoren umfasst. Die optische Sensor-Anordnung **602** wird als eine $2 \times (6 \times 16)$ -Anordnung bezeichnet, weil verschiedene Konfigurationen zur Aufnahme von 192 Sensoren S1-S192 verwendet werden können.

[0139] In [Fig. 9B](#) sind die 32 Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF32 in acht Gruppen mit jeweils vier Lichtleitfasern aufgeteilt. Jede Gruppe ist mit einem der digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** über vier der Rückführungs-Lichtleitfasern R1-R32 verbunden. Die digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** umfassen Schaltungen, die auf Leiterplatten ausgebildet sind, und die nachfolgend als digitale 24-Kanal-Empfänger/Demodulator-Karten oder Lichtleitfaser-Empfänger-Karten bezeichnet werden. Jede Lichtleitfaser-Empfänger-Karte **604** erhält vier der Rückführungs-Lichtleitfasern R1-R32 und enthält entsprechend vier der optischen Detektoren D1-D32, um Licht von den vier Rückführungs-Lichtleitfasern zu messen. Jede der Rückführungs-Lichtleitfasern R1-R32 enthält den Ausgang von sechs der akustischen Sensoren S1-S192. Die sechs Ausgänge sind mit unterschiedlichen Frequenzen moduliert, wie dies vorstehend beschrieben wurde.

[0140] Die optischen Detektoren D1-D32 in den Lichtleitfaser-Empfänger-Karten **604** umfassen Polarisations-Diversity-Empfänger, wie dies vorstehend beschrieben wurden. Polarisations-Diversity-Empfänger sind in der Technik bekannt, und ein derartiger Polarisations-Diversity-Empfänger, wie er in dem US-Patent 5,852,507 auf den Namen von Hall beschrieben wurde, wurde oben genannt. Bei dieser Ausführungsform, die einen Polarisations-Diversity-Empfänger enthält, schließt jeder der optischen Detektoren D1-D32 drei Foto-Detektoren, wie zum Beispiel Foto-Dioden ein, die einen jeweiligen Teil des Lichtes von dem auf den optischen Detektor auftreffenden Lichtes gemäß der Polarisation des Lichtes messen. Die Verarbeitungs-Elektronik **304** tastet nachfolgend das von jedem der Foto-Detektoren stammende Signal ab und wählt den Foto-Detektor-Ausgang, der das stärkste Signal für jeden akustischen Kanal ergibt. Der Ausgang dieses Foto-Detektors wird dann verwendet, bis das akustische Mess-System **100** recalibriert wird.

[0141] Der Ausgang der Foto-Detektoren wird an einen Transimpedanz-Verstärker gelenkt, und über einen Analog-/Digital-Wandler von dem Analog- auf das Digital-Format umgewandelt. Dieses nunmehr in digitaler Form vorliegende Ausgangssignal wird mit einem sinusförmigen Signal mit der gleichen Modulations-Frequenz gemischt, mit der der Ausgang der sechs Laser L1-L6 moduliert wurde, nämlich $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$ und ω_6 , was zu sechs Signalen führt, die hier mit I1, I2, I3, I4, I5 und I6 bezeichnet sind. Der digitalisierte Ausgang von dem Foto-Detektor wird weiterhin mit einem sinusförmigen Signal mit dem zweifachen Wert der Modulations-Frequenz gemischt, mit dem der Ausgang der sechs Laser L1-L6 moduliert wurde, nämlich $2\omega_1, 2\omega_2, 2\omega_3, 2\omega_4, 2\omega_5$ und $2\omega_6$, was zu sechs Signalen führt, die hier mit Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 und Q6 bezeichnet sind. Diese resultierenden Signale durchlaufen einzeln Schaltungen, die eine Dezimierung ergeben, und Schaltungen, die eine Verstärkung ergeben.

[0142] Für jeden der optischen Detektoren D1-D32 werden zwölf Signale erzeugt. Sechs Signale werden durch Mischen mit den Frequenzen, mit denen die sechs Laser-Quellen LS1-LS6 moduliert sind, erzeugt, beispielsweise I1-I6. Sechs Signale werden durch Mischen mit dem zweifachen Wert der Frequenzen erzeugt, mit denen die sechs Laser-Quellen moduliert sind, beispielsweise Q1-Q6. Weil jede Lichtleitfaser-Empfänger-Karte **604** vier der optischen Detektoren D1-D32 enthält, die jeweils Licht von sechs Laser-Quellen LS1-LS6 empfangen, erzeugt jede Lichtleitfaser-Empfänger-Karte 48 resultierende Signale. Ein Satz von 24, die von der Demodulation mit den Frequenzen $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$ abgeleitet werden, sind hier mit I1-I24

bezeichnet, und der andere Satz von 24, die aus der Demodulation mit den Frequenzen $2\omega_1, 2\omega_2, 2\omega_3, 2\omega_4, 2\omega_5$ und $2\omega_6$ abgeleitet sind, wird hier mit Q1-Q24 bezeichnet. Die acht Lichtleitfaser-Empfänger-Karten **604**, die in der Detektor/Elektronik-Baugruppe **601** nach [Fig. 9A-Fig. 9B](#) gezeigt sind, erzeugen insgesamt **384** derartige resultierende Signale, die hier mit I1-I192 und Q1-Q192 bezeichnet sind.

[0143] Vorzugsweise sind die Amplituden der Signale, die sich aus dem Mischen mit sinusförmigen Signalen, die die Modulations-Frequenzen $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$, und ω_6 haben, gleich den Amplituden der entsprechenden Signale, die sich aus dem Mischen mit sinusförmigen Signalen ergeben, die die Frequenzen $2\omega_1, 2\omega_2, 2\omega_3, 2\omega_4, 2\omega_5$ und $2\omega_6$ haben; das heißt vorzugsweise $|I1| = |Q1|, |I2| = |Q2|, |I3| = |Q3| \dots |I192| = |Q192|$. Wie vorstehend beschrieben wurde, durchlaufen die gemischten Signale I1-I192 sowie Q1-Q192 jeweils getrennt getrennte Schaltungen, die eine Verstärkung ergeben können. Auf diese Weise können die Signale so eingestellt werden, dass sie eine gleiche Amplitude haben, das heißt $|I1|$ kann so eingestellt werden, dass es gleich $|Q1|$ ist, $|I2|$ kann so eingestellt werden, dass es gleich $|Q2|$ ist,, und $|I192|$ kann so eingestellt werden, dass es gleich $|Q192|$ ist.

[0144] Jede Lichtleitfaser-Empfänger-Karte **604** enthält zwei Demultiplexer. Ein Demultiplexer ist ausschließlich dazu bestimmt, die Signale, die sich aus dem Mischen mit einem sinusförmigen Signal mit den Frequenzen $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$, und ω_6 ergeben, beispielsweise I1-I24, der andere Demultiplexer ist ausschließlich dazu bestimmt, die Signale auszuwählen, die sich aus dem Mischen mit einem sinusförmigen Signal mit den Frequenzen $2\omega_1, 2\omega_2, 2\omega_3, 2\omega_4, 2\omega_5$ und $2\omega_6$, beispielsweise Q1-Q24, ergeben. Die Demultiplexer sind sequenziell die 24 resultierenden Signale, beispielsweise I1-I24 und Q1-Q24, und paaren die Signale miteinander. In einer Sequenz wird dann jedes Paar von resultierenden Signalen, das heißt I1 und Q1 und I2 und Q2, ... I24 und Q24 dann als Eingang an Schaltungen geliefert, die den Arkustangens des Verhältnisses der zwei eingegebenen Signale berechnen, beispielsweise $\tan^{-1}[I1/Q1], \tan^{-1}[I2/Q2], \tan^{-1}[I24/Q24]$. Diese Schaltung gibt die jeweiligen Phasen-Winkel $\phi_1, \phi_2, \dots \phi_{24}$ aus. Jeder Phasen-Winkel ϕ_1 - ϕ_{24} und so weiter entspricht dem Ausgang eines der akustischen Sensoren S1-S24, und so weiter. Diese Phasen-Winkel, $\phi_1, \phi_2, \dots \phi_{24}$ werden dann als Eingänge an Schaltungen geliefert, die Phasen-Winkel bezüglich der Zeit differenzieren, um $d\phi_1/dt, d\phi_2/dt, \dots d\phi_{24}/dt$ zu erzeugen.

[0145] Bei der bevorzugten Ausführungsform gibt die Arkustangens-Schaltung ein 16-Bit-Wort aus, das der Phase entspricht. Die Schaltung, die eine Differenzierung ausführt, empfängt das 16-Bit-Wort und gibt ein 32-Bit-Wort aus. Dieses 32-Bit-Wort umfasst zwei 16-Bit-Wörter, die der differenzierten Phase für zwei Kanäle entsprechen, beispielsweise $d\phi_1/dt$ und $d\phi_2/dt$, die ein 32-Bit-Wort gepackt sind. Somit werden in jedem der digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** die Ergebnisse von zwei Kanälen innerhalb des digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulators zusammen in ein Wort gepackt, und das Wort wird von dem Empfänger/Demodulator abgegeben.

[0146] Gemäß den [Fig. 9A](#) und [Fig. 9B](#) wird jedes von den acht digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** abgegebene 32-Bit-Wort einem der 8-DSP-Elemente **606** über den lokalen Bus **902** des digitalen Signal-Prozessor-Clusters und die zugehörigen Verbindungsstrecken-Ports zugeführt. Dieses 32-Bit-Wort wird in zwei 16-Bit-Wörter in den 12-DSP-Elementen **606** entpackt. Weil zwei der Kanäle zusammengepackt sind, kann der Ausgang des digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulators **604** als Eingang für die 12-DSP-Elemente **606** dienen.

[0147] Obwohl acht Lichtleitfaser-Empfänger-Karten (das heißt digitale 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren) **604** in [Fig. 9B](#) gezeigt sind, ist die Anzahl der Lichtleitfaser-Empfänger, die verwendet werden können, nicht auf acht beschränkt. Beispielsweise kann die Anzahl der Lichtleitfaser-Empfänger-Karten auf vier reduziert werden. Allgemeiner kann die Anzahl der Lichtleitfaser-Empfänger **604**, die verwendet werden, von eins bis mehr als acht reichen. Vorzugsweise entspricht jedoch die Anzahl der Lichtleitfaser-Empfänger-Karten **604** der Anzahl von Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF32 und der Anzahl der 12-DSP-Karten **606**.

[0148] Zusätzlich ist, obwohl jeder Lichtleitfaser-Empfänger **604** nach [Fig. 9A](#) 24 Kanäle enthält, wobei jeder Kanal dem Ausgang eines der akustischen Sensoren S1-S192 entspricht, die Anzahl der Kanäle, die verwendet werden können, nicht auf 24 beschränkt.

12-DSP-Karten

[0149] Wie dies weiter oben erläutert wurde, empfangen die acht 12-DSP-Elemente **606** 32-Bit-Wörter, die von den acht digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** abgegeben werden. Jedes einzelne der 12-DSP-Elemente **606** ist mit einem der acht digitalen 24-Kanal-Empfänger/Demodulatoren **604** über den ört-

lichen Bus **902** des digitalen Signal-Prozessor-Clusters und zugehörige Verbindungsstrecken-Ports verbunden.

[0150] Jedes von einem der 12-DSP-Elemente **606** empfangene 32-Bit-Wort wird in zwei 16-Bit-Komponenten-Worte in den 12-DSP-Elementen **606** entpackt. Jedes 16-Bit-Wort entspricht dem Ausgang eines der akustischen Sensoren S1-S192.

[0151] Die 12-DSP-Elemente **606** dezimieren das ankommende Signal, wobei die Datenstrom-Rate der von den 12-DSP-Elementen empfangenen Signale auf eine Rate verringert wird, die mit der Abtast-Rate besser kompatibel ist, die bei konventionellen seismischen Aufzeichnungs-Ausrüstungen die Norm ist. Das Wort „dezimieren“ wird hier entsprechend seiner üblichen Verwendung in der Technik so verwendet, dass es eine Neu-Abtastung des Signals mit einer niedrigen Rate bedeutet, um die ursprüngliche Abtast-Rate für eine Sequenz auf eine niedrigere Rate zu reduzieren. Im Einzelnen empfangen bei der bevorzugten Ausführungsform die 12-DSP-Elemente **606** Signale von den Lichtleitfaser-Empfängern mit einer Rate von 512.000 Abtast-Proben pro Sekunde, und sie geben ein Signal an die CPU **610** mit einer Rate von 500, 1.000, 2.000 oder 4.000 Abtast-Proben pro Sekunde ab.

[0152] Im einzelnen wandeln die 12-DSP-Elemente **606**, die 16-Bit-Worte, die durch das Entpacken der zwei Komponenten aus den 32-Bit-Worten gewonnen wurden, von 16-Bit-Festkomma-Worten auf 32-Bit-Gleitkomma-Worte um. Diese 32-Bit-Worte werden durch ein mehrstufiges Filtern mit endlichem Ansprechverhalten (FIR) geleitet, das als Tiefpassfilter dient. Dieses Filter hat eine symmetrische Impuls-Antwort und führt keine Phasen-Verzerrungen ein, oder es führt lediglich eine lineare Phasen-Verzerrung über die Frequenzen hinweg ein. Die 32-Bit-Gleitkomma-Worte werden in 32-Bit-Festkomma-Worte umgewandelt und dann einem RAM (Speicher mit wahlfreiem Zugriff) Puffer zugeführt, bevor sie an die CPU **610** gesandt werden. Jedes dieser Worte entspricht dem Ausgang eines der akustischen Sensoren S1-S196.

[0153] Die 12-DSP-Elemente **606** in der in [Fig. 9A](#) gezeigten Ausführungsform haben Schnittstellen, die den Analog-Devices SHARC (Super Harvard Architektur) 2106x, beispielsweise 21060, 21061, 21062 oder 21065 DSP eigen sind.

[0154] Wie dies weiter oben beschrieben wurde, koppelt jedes der 12-DSP-Elemente **606** ein jeweiliges Ausgangs-Signal an die CPU **610** über den PCI-Bus **608**. Der PCI-Bus **608** ist ein generischer Bus, der in herkömmlicher Weise in persönlichen Computern verwendet wird. Damit ist eine große Vielzahl von Hardware ohne Weiteres verfügbar, die mit einem PCI-Bus **608** in Schnittstellen-Verbindung steht. Entsprechend können, wenn Verbesserungen an der Hardware gemacht werden und die Elektronik schneller wird, Komponenten in der Detektor/Elektronik-Baugruppe **601** sehr einfach durch diese schnelleren PCI-kompatiblen Elektroniken ersetzt werden.

[0155] Obwohl acht DSP-Karten **606** in [Fig. 9A](#) gezeigt sind, ist die Anzahl der 12-DSP-Karten, die verwendet werden können, nicht auf acht beschränkt. Beispielsweise kann die Anzahl der 12-DSP-Karten **606** auf vier reduziert werden. Allgemeiner kann die Anzahl der 12-DSP-Karten **606**, die verwendet werden, von eins bis mehr als sechzehn reichen. Vorzugsweise entspricht jedoch die Anzahl der 12-DSP-Karten **606** der Anzahl von Lichtleitfaser-Empfänger-Karten **604** und Rückführungs-Lichtleitfaser-Leitungen RF1-RF32.

[0156] Zusätzlich ist, obwohl jede der 12-DSP-Karten **606** gemäß [Fig. 9A](#) 12 Ausgänge enthält, wobei jeder Ausgang den Ausgang von zwei der akustischen Sensoren S1-S192 entspricht, die Anzahl der Ausgänge, die verwendet werden kann, nicht auf zwölf beschränkt. Die Anzahl der verwendeten Ausgänge kann von 2 bis mehr als 24 reichen. Vorzugsweise entspricht jedoch die Anzahl der DSP-Ausgänge einer Hälfte der Anzahl der Empfänger/Demodulator-Kanäle.

CPU

[0157] Die CPU **610** empfängt die 32-Bit-Festkomma-Worte, die den Ausgang eines der akustischen Sensoren S1-S192 entsprechen, von dem RAM-Puffer in den 12-DSP-Karten **606**. Die CPU **610** schneidet die 32-Worte herunter auf 24-Bit ab. Die CPU **610** ergibt weiterhin irgendeine erforderliche Skalierung, um den SEG-D-Format zu gehorchen.

[0158] Zusätzlich ergibt die CPU **610** zur Erfüllung des SEG-D-Formates eine Zeit-Information. Im einzelnen gibt die CPU **610** das absolute Maß der Zeit ab, zu der die Verarbeitungs-Elektroniken **304** das Synchronisations-Signal von der akustischen Quelle **130** empfangen haben. Dieses absolute Maß der Zeit wird von der

GPS-Elektronik **628** zu der Zeit gewonnen, zu der die Verarbeitungs-Elektronik **304** das Synchronisations-Signal empfängt. Die GPS-Karte kann eine Genauigkeit von 1 Teil pro Millionen (ppm) für Zeit-Stempel-Ereignisse liefern. Die CPU **610** schließt weiterhin ein Maß der Zeit ein, wenn die zwischen dem Zeitpunkt des Empfangs des Synchronisations-Signals durch die Verarbeitungs-Elektronik **304** und dem Beginn der Abtastung des akustischen Systems **100** liegt, das heißt der Messung der akustischen Schwingung. Die CPU **610** ergibt weiterhin die zeitliche Trennung zwischen den Abtastproben.

[0159] Die [Fig. 6](#) und [Fig. 9A](#) zeigen, dass die CPU **610** Ausgangs-Signale an das Aufzeichnungs- und Verarbeitungs-System **618** über den Ethernet-Bus **622** liefert. Das von der CPU **610** abgegebene Signal entspricht der gefilterten differenzierten Phase und schließt weiterhin die vorstehend beschriebene Zeitsteuer-Information ein. Dieser Ausgang erfüllt die Anforderungen an konventionelle seismische Daten, und insbesondere des SEG-D-Formates. Entsprechend sind die Phasen-Daten, das heißt die Änderungs-Geschwindigkeit der Phase, die von der CPU **610** abgegeben werden, durch konventionelle seismische Daten-Aufzeichnungs- und Verarbeitungs-Ausrüstungen lesbar, die beispielsweise die Phasen- und Zeitsteuer-Information verwenden können, um die Amplitude der akustischen Wellen **102** an den Sensoren S1-S192 zu bestimmen.

[0160] Die in den [Fig. 6](#), [Fig. 9A](#) und [Fig. 9B](#) gezeigte Verarbeitungs-Elektronik kann Daten mit einer Abtast-Rate von 500 Hertz (Hz), 1 Kilohertz (kHz), 2 kHz und 4 kHz nach Wahl des Benutzers abgeben. Die Ausgangsdaten-Auflösung ist 24 Bit. Konventionelle Systeme ergeben nicht die Fähigkeiten, Abtast-Raten von beispielsweise 2 und 4 kHz auszuwählen.

[0161] Obwohl die Verarbeitungs-Elektronik **304** nach den [Fig. 6](#), [Fig. 9A](#) und [Fig. 9B](#) Ausgangs-Signale in SEG-D-Formate liefert ist die Erfindung nicht hierauf beschränkt. Es können andere Datenformate verwendet werden, beispielsweise SEG-Y oder Einfach-Präzisions-(32-Bit-)ASCII. Vorzugsweise stimmen derartige Datenformate mit konventionellen Formaten überein.

[0162] Die in [Fig. 9A](#) gezeigte CPU-Karte **610** ist elektrisch mit einer Maus **904**, einer Tastatur **906**, einer SVGA-Karte **908** für die Anzeige und mit einem Festplatten-Laufwerk **612** verbunden. Die CPU-Karte **610** hat außerdem einen Com 1 **910** und einen Com 2 **912**. Wie dies vorstehend beschrieben wurde, ist die CPU-Karte **610** mit einer Bedien-Konsole **616** über Ethernet **620** gekoppelt.

[0163] Bei der in [Fig. 9A](#) gezeigten Ausführungsform ist die CPU mit den 12-DSP-Karten **606**, der 16-Kanal-A/D-Hilfs-Eingangs/Ausgangs-Karte **624** (die in [Fig. 6](#) als AUX-I/O bezeichnet ist) und der GPS-Karte **628** über den PCI-Bus **608** gekoppelt. Die CPU-Karte **610** ist mit der Frequenz-Synthesizer-Karte **632** über den ISA-Bus **640** gekoppelt. Die CPU **610** verwaltet den Betrieb und die Wechselwirkung dieser Karten.

[0164] Der PCI-Bus **608** sowie der ISA-Bus **640** sind generische Busse, wie sie üblicherweise in persönlichen Computern verwendet werden. Damit steht eine große Vielzahl von Hardware ohne Weiteres zur Verfügung, die in Schnittstellen-Verbindung mit diesen Bus-Leitungen **608**, **640** und insbesondere mit dem PCI-Bus treten kann. Entsprechend können, wenn Verbesserungen an der Hardware durchgeführt werden und die Elektronik schneller wird, Komponenten der Verarbeitungs-Elektronik **304** sehr einfach durch diese schnelleren PCI-(oder ISA-)kompatiblen Elektroniken ersetzt werden.

Laser-Quellen

[0165] Bei einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung erzeugen die Laser L1-L6 eine optische Strahlung bei einer nominellen Wellenlänge von 1319 Nanometer (nm), was einer optischen Frequenz von ungefähr 227 Terrahertz (THz) in der Lichtleitfaser entspricht. Die Frequenzen können um ungefähr 0,5 bis 3 Gigahertz (GHz) getrennt sein, und sie werden durch jeweilige Träger zwischen ungefähr 2 Megahertz (MHz) und 7 MHz moduliert.

[0166] Die Laser L1-L6 können Nd:YAG-Laser umfassen, die alle mit Ausnahme der optischen Frequenz identisch sind, mit der sie betrieben werden. Die Temperaturen der Laser L1-L6 werden vorzugsweise so eingestellt, dass jeder Laser eine eindeutige optische Betriebsfrequenz/Wellenlänge hat. Der Betrieb bei unterschiedlichen optische Frequenzen vermeidet eine optische Interferenz zwischen den optische Signalen von unterschiedlichen Quellen in der gleichen Lichtleitfaser.

[0167] Obwohl Nd:YAG-Laser, die mit einer Nenn-Wellenlänge von 1319 nm arbeiten, vorstehend als für die Verwendung als Laser L1-L6 als geeignet beschrieben wurden, ist die Erfindung nicht hierauf beschränkt. Vielmehr können andere Laser und andere Wellenlängen gemäß der vorliegenden Erfindung verwendet werden.

Zusätzlich können andere Modulations-Frequenzen verwendet werden. Die Auswahl geeigneter Modulations-Frequenzen wird weiter unten ausführlicher erläutert.

[0168] Weiterhin ist, obwohl sechs Laser-Quellen, die mit sechs Modulations-Frequenzen moduliert sind, die in **Fig. 3** gezeigt sind, ist die Anzahl der Laser-Quellen, die verwendet werden können, nicht auf sechs beschränkt. Die Anzahl der verwendeten Laser-Quellen kann von einer bis mehr als 12 Quellen reichen.

[0169] Weiterhin können anstelle der Verwendung von Laser-Quellen LS1-LS6 zum Einkoppeln von Licht in die akustischen Sensoren S1-S192 auch andere optische Quellen verwendet werden. Die optische Quelle kann eine kohärente Quelle, wie zum Beispiel eine Laser-Diode oder eine inkohärente Quelle, wie zum Beispiel eine Leuchtdiode (LED) oder eine Lichtleitfaser-Quelle sein.

Frequenz-Synthesizer-Karte

[0170] Die Frequenz-Synthesizer-Karte **632** liefert Schwingungsformen an die Laser-Quellen LS1-LS6, um die Frequenzen zu bestimmen, mit denen die Ausgänge der Laser L1-L6 moduliert werden. Die Frequenz-Synthesizer-Karte **632** liefert weiterhin einen Takt, eine Synchronisation und eine Zeitsteuerung an die Lichtleitfaser-Empfänger **604** zur Synchronisation des Systems **100** und durch phasenstarren Verriegelung der Demulatoren **604** auf die Modulatoren M1-M6.

[0171] Bei der in den **Fig. 6**, **Fig. 9A** und **Fig. 9B** gezeigten Ausführungsform erzeugt der Frequenz-Synthesizer sechs periodische Schwingungsformen mit sechs unterschiedlichen Frequenzen $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$. Die Frequenz-Synthesizer-Karte sendet die Schwingungsformen bei den sechs Frequenzen $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$ an die Laser-Modulations-Steuertreiber-Karte **636** in dem Laser-Einschub über eine elektrische Leitung **914**. Die Frequenz-Synthesizer-Karte **630** sendet weiterhin die kritischen Zeitsteuer- und Synchronisations-Signale an jede der Lichtleitfaser-Empfänger-Karten **604**. Die Frequenz-Synthesizer-Karte **630** sendet diese Signale an die Lichtleitfaser-Empfänger-Karten **604** über eine Vielzahl von abgeschirmten Signal-Leitungen **916**.

[0172] Wie dies weiter oben erläutert wurde, sendet die Frequenz-Synthesizer-Karte **630** das Synchronisations-Signal und das Takt-Signal an die Lichtleitfaser-Empfänger-Karten **604**, und aus diesen zwei Signalen erzeugen die Lichtleitfaser-Empfänger-Karten **604** digitale Träger bei den sechs Modulationsfrequenzen $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$ und dem Doppelten der sechs Modulationsfrequenzen $2\omega_1, 2\omega_2, 2\omega_3, 2\omega_4, 2\omega_5, 2\omega_6$ zum Mischen und zur Demodulation.

[0173] Obwohl sechs Frequenzen durch die Frequenz-Synthesizer-Karte **630** nach den **Fig. 6**, **Fig. 9A** und **Fig. 9B** erzeugt werden, ist die Anzahl der erzeugten Frequenzen nicht auf sechs beschränkt. Die Anzahl der verwendeten Frequenzen kann von 2 bis mehr als 12 reichen. Vorzugsweise entspricht die Anzahl der Frequenzen der Anzahl von Laser-Quellen LS1-LS6.

Auswahl der Modulations-Frequenzen

[0174] Wie dies weiter oben erwähnt wurde, können die Signale von sechs Sensoren, beispielsweise S1-S6, in einer einzigen Rückführungs-Lichtleitfaser, beispielsweise RF1, unter Verwendung der Frequenz-Multiplexierung multiplexiert werden. Aufgrund der nichtlinearen Eigenart des Interferometers sind diese Modulations-Ergebnisse in dem Signal-Ausgang von dem Interferometer nicht nur mit den sechs Modulationsfrequenzen $f_n (= \omega_n/2\pi)$ moduliert, worin $n = 1, \dots, 6$ ist, sondern auch mit $2f_n, 3f_n, 4f_n$ usw. Die f_n -Frequenzen werden als die „Modulationsfrequenzen“ oder „Grundfrequenzen“ bezeichnet, und die höheren Vielfachen von f_n werden als die „Harmonischen“ oder „Oberwellen“ bezeichnet, so dass die $2f_n$ -Signale die „ersten Harmonischen“ oder „Harmonischen erster Ordnung“ sind, die $3f_n$ -Signale die „zweiten Harmonischen“ oder „Harmonischen der zweiten Ordnung“ sind, usw. Die Gruppe von N Grundfrequenzen wird als der „Grundfrequenz-Satz“ bezeichnet. In ähnlicher Weise wird die Gruppe N ersten harmonischen Frequenzen als der „erste harmonische Frequenz-Satz“ bezeichnet, usw. für höhere Harmonische.

[0175] Wie dies weiter oben bemerkt wurde, kann das multiplexierte Intensitäts-Signal, das von einem vorgegebenen Detektor empfangen wird, durch die Detektion der Signale bei f_n und $2f_n$ demultiplexiert werden. Damit die vorstehende Demodulations-Technik arbeitet, müssen jedoch die f_n - und $2f_n$ -Komponenten des multiplexierten Signals im Frequenz-Raum isoliert sein. Das heißt, der Satz von f_n -Modulationsfrequenzen muss so ausgewählt werden, dass sich keine der f_n - oder $2f_n$ -Komponenten (das heißt die „Information enthaltenden Komponenten“) mit irgendeiner anderen Frequenzkomponente überlappt, unter Einschluss irgendeiner der höheren Harmonischen. Irgendeine Information enthaltende Komponente, die im Frequenz-Raum überlappt ist,

kann nicht eindeutig demoduliert werden. Wie dies nachstehend klarer wird, macht diese Beschränkung die Auswahl der Modulationsfrequenzen schwierig.

[0176] Jede Frequenzkomponente in dem multiplexierten Ausgang enthält ein Signal über eine Bandbreite, die um die Frequenz zentriert ist. Die Größe der Bandbreite hängt von der Frequenz-Charakteristik des von dem Sensor empfangenen Signals und möglicherweise von dem Frequenzgang des Sensors selbst ab. Sobald die Betriebs-Bandbreite der Frequenzkomponenten bekannt ist, müssen die verschiedenen f_n -Werte mit einem ausreichenden Abstand ausgewählt werden, um sicherzustellen, dass keine Überlappung auftritt. Der minimal erforderliche Abstand zum Vermeiden einer Überlappung zwischen benachbarten Komponenten wird als Δf bezeichnet.

[0177] Die [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) zeigen eine Lösung zur Auswahl von Frequenzen derart, dass eine Interferenz mit Informationen führenden Komponenten vermieden wird. Die Darstellung zeigt das multiplexierte Signal-Frequenz-Spektrum, das akustische Information enthält, die gleichzeitig von einem einzigen Detektor von einer Vielzahl von akustischen Sensoren empfangen wird. Die Zahlen stellen Frequenz-Werte in Vielfachen von Δf dar. Somit entsprechen, wenn $\Delta f = 0,5$ MHz ist, die mit 9, 10, 11, 12 und 13 bezeichneten Positionen tatsächlichen Frequenzen von 4,5 MHz, 5,0 MHz, 5,5 MHz, 6,0 MHz bzw. 6,5 MHz. Je größer die Auswahl von Δf ist, desto größer ist der mögliche dynamische Bereich des Systems. Daher wird in der Praxis Δf so groß wie möglich ausgewählt.

[0178] Das multiplexierte Signal ist als eine Serie von geschoßförmigen Komponenten gezeigt, die entlang des Spektrums verteilt sind. Die Breite jeder Komponente zeigt die Frequenz-Bandbreite für diese Komponente des Signals. Der Frequenz-Wert, der einer bestimmten Komponente zugeordnet ist, zeigt die Frequenz an der Mitte der Komponente an. Komponenten, die den Buchstaben „F“ enthalten, stellen Grundfrequenzen dar. Komponenten die eine Zahl enthalten, stellen harmonische Frequenzen dar, wobei die Zahl die Ordnung der Harmonischen darstellt. Somit enthalten die Harmonischen erster Ordnung eine „1“, die Harmonischen zweiter Ordnung enthalten eine „2“ usw. Harmonische, die höher als die zweite Ordnung sind, sind aus Gründe der Klarheit aus den [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) fortgelassen.

[0179] Die [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) zeigen multiplexierte Signal-Spektren für zwei Systeme, bei denen sich die Grundfrequenzen, die ersten Harmonischen und die zweiten Harmonischen nicht überlappen. Das mit fünf Licht-Quellen arbeitende System nach [Fig. 10A](#) verwendet gleichförmig mit einem Abstand versehene Modulationsfrequenzen bei $9\Delta f$ bis $13\Delta f$. Der Abstand zwischen benachbarten Grundfrequenzen ist so ausgewählt, dass er gleich Δf ist, dem kleinsten zulässigen Abstand. [Fig. 10B](#) zeigt das analoge System mit sechs Licht-Quellen unter Verwendung von Modulationsfrequenzen bei $11\Delta f$ bis $16\Delta f$. Diese Lösung stellt sicher, dass die Grundfrequenz-Komponenten durch keine der Harmonischen gestört werden, und dass die erste Harmonische nicht durch die Grundfrequenzen oder durch die zweiten oder höhere Harmonische gestört wird. Weil es keine Überlappung irgendwelcher der Information übertragenden Signale gibt, ist eine vollständige Demodulation des ausgesandten Signals möglich. Diese Lösung verwendet jedoch große Teile des Frequenz-Spektrums nicht. Beispielsweise zeigt die [Fig. 10A](#), dass das System mit fünf Licht-Quellen die Frequenzen bei Δf -Vielfachen von 0 bis 8, 14-17, 19, 21, 23 oder 25 nicht verwendet. Die höchste Information enthaltende Frequenz ist in den [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) als eine gestrichelte vertikale Linie dargestellt. Um die zur Verarbeitung des empfangenen Signals erforderliche Elektronik zu vereinfachen, ist es vorzuziehen, diese Frequenz so niedrig wie möglich auszuwählen. Die [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) zeigen, dass bei Fehlen überlappender Sätze die Verarbeitung für Systeme mit fünf Licht-Quellen und sechs Licht-Quellen so ausgelegt sein muss, dass sie Frequenzen von zumindest $26\Delta f$ bzw. $32\Delta f$ verarbeitet.

[0180] Das Problem des ungenutzten Frequenz-Raumes, der mit der Lösung nach den [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) verbunden ist, wird verstärkt, wenn die Anzahl der Licht-Quellen ansteigt. Für ein System mit N Licht-Quellen kann die niedrigste Grund-Frequenz f_1 nicht unterhalb von $(2N - 1)\Delta f$ gewählt werden, und das Verarbeitungs-System muss die größte erste harmonische Frequenz, $2f_N$, von $(6N - 4)\Delta f$ verarbeiten. Beispielsweise könnte ein System mit 12 Licht-Quellen nicht besser arbeiten als mit $f_1 = 23\Delta f$ und $2f_{12} = 68\Delta f$.

[0181] Die [Fig. 11A](#) und [Fig. 11B](#) zeigen zwei Ausführungsformen gemäß einem Gesichtspunkt der vorliegenden Erfindung. Die Ausführungsformen behalten einen gleiche Abstände aufweisenden Satz von Grundfrequenzen beginnend mit einer niedrigeren Frequenz, als dies bei der nicht-überlappenden Lösung nach den [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) zulässig war.

[0182] Ein Vergleich der [Fig. 10A](#) und [Fig. 11A](#) zeigt, dass für das System mit fünf Licht-Quellen die Ausführungsform nach [Fig. 11A](#) die niedrigste Grundfrequenz von $9\Delta f$ auf $7\Delta f$ verringert, während die höchste erste

harmonische Frequenz von $26\Delta f$ auf $22\Delta f$ verringert ist. Dieses Absenken der Frequenzen bewirkt, dass der Beginn des Satzes von zweiten Harmonischen (bei $21\Delta f$) eine niedrigere Frequenz aufweist, als die maximale Frequenz des Satzes der ersten Harmonischen (bei $22\Delta f$). Das Überlappen von Sätzen verschachtelt die einzelnen Frequenzkomponenten in einer derartigen Weise, dass sich hiermit keine Interferenz der Information übertragenden Komponenten ergibt. Insbesondere ist die keine Information übertragende Komponente $3f_1$ bei $21\Delta f$ in harmloser Weise zwischen den Informationen übertragenden Komponenten $2f_4$ und $2f_5$ bei $20\Delta f$ beziehungsweise $22\Delta f$ geschachtelt.

[0183] In ähnlicher Weise zeigt ein Vergleich der [Fig. 10B](#) und [Fig. 11B](#), dass für das System mit sechs Licht-Quellen der Ausführungsform nach [Fig. 11B](#) die niedrigste Grundfrequenz von $11\Delta f$ auf $9\Delta f$ verkleinert ist, während die höchste erste harmonische Frequenz von $32\Delta f$ auf $28\Delta f$ verringert ist. Wie bei dem System mit fünf Licht-Quellen ist die niedrigste zweite harmonische Frequenz zwischen den zwei höchsten harmonischen Frequenzen eingeschachtelt, so dass keine Information übertragenden Komponenten gestört werden.

[0184] Die in den [Fig. 11A](#) und [Fig. 11B](#) gezeigten Ausführungsformen können auf irgendein multiplexiertes System verallgemeinert werden, das drei oder mehr Licht-Quellen verwendet. Für ein System mit N Licht-Quellen, bei denen $N \geq 3$ ist, schließt eine Ausführungsform einen gleichen Abstand aufweisende Grundfrequenzen ein, die bei $f_1 = (2N - 3)\Delta f$ beginnen. Für die verbleibenden Modulationsfrequenzen ergibt dies für $1 > n \geq N$, $f_n = f_{n-1} + \Delta f$.

[0185] Diese Klasse von Ausführungsformen führt zu einer höchsten ersten harmonischen Frequenz bei $2f_N = (6N - 8)\Delta f$. Wenn diese Werte mit den entsprechenden vorstehenden Werten verglichen werden, so zeigt dies, dass diese Ausführungsformen die niedrigste Grundfrequenz und $2\Delta f$ und die höchste erste harmonische Frequenz um $4\Delta f$ gegenüber der besten nicht-überlappenden Lösung verringern. Die Tabelle I zeigt die Auswahl der Modulationsfrequenzen, die diesen Ausführungsformen für Werte von N zugeordnet sind, die von 3 bis 9 reichen.

Tabelle 1

N	Modulationsfrequenzen (Vielfache von Δf)
3	3, 4, 5
4	5, 6, 7, 8
5	7, 8, 9, 10, 11
6	9, 10, 11, 12, 13, 14
7	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17
8	13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20
9	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23

[0186] Die [Fig. 12](#) und [Fig. 13](#) zeigen zwei Ausführungsformen, die eine Lücke von $2\Delta f$ in einem im übrigen einen gleichförmigen Abstand (mit Intervallen von Δf) aufweisenden Satz von Grundfrequenzen verwenden.

[0187] [Fig. 12](#) zeigt eine Ausführungsform mit fünf Licht-Quellen mit Grundfrequenzen, die von $6\Delta f$ bis $11\Delta f$ reichen, wobei ein zwischenliegender Teil bei $9\Delta f$ übersprungen wird. Diese Auswahl der Grundfrequenzen ermöglicht es dem Satz von ersten Harmonischen, bis herunter nahe zu an den Grundfrequenz-Satz verschoben zu werden. Dies ermöglicht weiterhin, dass der zweite harmonische Satz im Wesentlichen den ersten harmonischen Satz überlappt. Diese zweiten harmonischen Komponenten sind jedoch derart verschachtelt, dass sie keine Interferenz mit irgendeiner der ersten harmonischen Komponenten ergeben.

[0188] Der Vergleich der [Fig. 10A](#) und [Fig. 12](#) zeigt, dass diese Ausführungsform mit fünf Licht-Quellen die niedrigste Grundfrequenz von $9\Delta f$ auf $6\Delta f$ gegenüber der besten nicht-überlappenden Lösung verringert, während die höchste erste harmonische Frequenz von $26\Delta f$ auf $22\Delta f$ verringert ist.

[0189] Die in [Fig. 12](#) gezeigte Ausführungsform kann auf irgendein multiplexiertes System unter Verwendung von fünf oder mehr Licht-Quellen verallgemeinert werden. Für ein System mit N Licht-Quellen, bei dem $N \geq 5$ ist, schließt eine Ausführungsform einen gleichen Abstand aufweisende Grundfrequenzen beginnend mit $f_1 = (2N - 4)\Delta f$ ein, mit der Ausnahme des Überspringens der Frequenz bei $3(N - 2)\Delta f$. Dies ergibt die folgenden Modulationsfrequenzen: $f_1 = (2N - 4)\Delta f$; $f_{N1} = f_{N-2} + 2\Delta f$; $f_N = (3N - 4)\Delta f$, und für $1 < n < N - 1$, $f_n = f_{n1} + \Delta f$.

[0190] Diese Klasse von Ausführungsformen führt zu einer höchsten ersten harmonischen Frequenz bei $2f_N = (6N - 8)\Delta f$. Die Tabelle II zeigt die Auswahl der Modulationsfrequenzen, die dieser Ausführungsform für N von 5 bis 11 zugeordnet sind.

Tabelle II

N	Modulationsfrequenzen (Vielfache von Δf)
5	6, 7, 8, 10, 11
6	8, 9, 10, 11, 13, 14
7	10, 11, 12, 13, 14, 16, 17
8	12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20
9	14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23
10	16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26
11	18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29

[0191] [Fig. 13](#) zeigt eine Ausführungsform mit sechs Licht-Quellen mit Grundfrequenzen, die von $7\Delta f$ bis $13\Delta f$ reichen, wobei eine zwischenliegende Position bei $12\Delta f$ übersprungen wird. Diese Auswahl der Grundfrequenzen ermöglicht es, dass der Satz von ersten Harmonischen nach unten verschoben wird, bis er gegen den Satz von Grundfrequenzen anliegt. Die Komponenten der zweiten Harmonischen überlappen im Wesentlichen die ersten harmonischen Komponenten, sind jedoch so verschachtelt, dass sie keine Störung mit irgendeiner der Information übertragenden Komponenten ergeben.

[0192] Ein Vergleich der [Fig. 10B](#) und [Fig. 13](#) zeigt, dass diese Ausführungsform mit sechs Licht-Quellen die niedrigste Grund-Frequenz von $11\Delta f$ auf $7\Delta f$ gegenüber der besten nicht-Überlappenden Lösung verringert, während die erste harmonische Frequenz von $32\Delta f$ auf $26\Delta f$ verringert ist.

[0193] Die in [Fig. 13](#) gezeigte Ausführungsform kann auf irgendein multiplexiertes System verallgemeinert werden, das vier Licht-Quellen oder sechs oder mehr Licht-Quellen verwendet. Für ein System mit N Licht-Quellen, wobei $N \geq 4$ ist, $N \neq 5$ ist, schließt eine Ausführungsform unter gleichen Abständen verteilte Grundfrequenzen beginnend bei $f_1 = (2N - 5)\Delta f$, ein, mit der Ausnahme des Überspringens der Position bei $3(N - 2)\Delta f$. Dies ergibt die folgenden Modulationsfrequenzen: $f_1 = (2N - 5)\Delta f$; $f_N = f_{N-1} + 2\Delta f$, und für $1 < n < N$, $f_n = f_{n-1} + \Delta f$.

[0194] Diese Klasse von Ausführungsformen führt zu einer höchsten ersten harmonischen Frequenz bei $2f_N = (6N - 10)\Delta f$. Die Tabelle III zeigt die Auswahl von Modulationsfrequenzen, die dieser Ausführungsform für N im Bereich von 4 bis 11 zugeordnet sind.

Tabelle III

N	Modulationsfrequenzen (Vielfache von Δf)
4	3, 4, 5, 7
6	7, 8, 9, 10, 11, 13
7	9, 10, 11, 12, 13, 14, 16
8	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19
9	13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22
10	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25
11	17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28

[0195] Die [Fig. 14A](#) und [Fig. 14B](#) zeigen eine Ausführungsform mit sechs Licht-Quellen, die zwei Lücken mit ungleichförmiger Größe verwendet. Diese Ausführungsform verwendet Grundfrequenzen, die aus Gründen der Klarheit in [Fig. 14A](#) getrennt dargestellt sind, mit Δf -Vielfachen von $5\frac{2}{3}$, 7, 8, 9, 10 und $12\frac{1}{2}$. Wie dies in [Fig. 14B](#) gezeigt ist, führt diese Ausführungsform zu einer Überlappung zwischen den Sätzen von Grundfrequenzen und ersten Harmonischen, wobei die niedrigste erste harmonische Frequenz (bei $11\frac{1}{3}\Delta f$) zwischen den zwei höchsten Grundfrequenzen (bei $10\Delta f$ und $12\frac{1}{2}\Delta f$) eingeschachtelt ist. Der Satz von dritten

Harmonischen überlappt ebenso wie der Satz von zweiten Harmonischen den ersten Satz von Harmonischen. Wie dies erforderlich ist, vermeidet die Verschachtelung der höheren Harmonischen eine Interferenz mit irgendeiner der Information übertragenden Komponenten.

[0196] Die [Fig. 15A](#) und [Fig. 15B](#) zeigen eine Ausführungsform mit sechs Licht-Quellen, die drei Lücken verwendet. Diese Ausführungsform verwendet Grundfrequenzen, die isoliert aus Gründen der Klarheit in [Fig. 15A](#) gezeigt sind, bei Δf -Vielfachen von 3, 4, 5, 7, 11 und 13. Wie dies in [Fig. 15B](#) gezeigt ist, führt diese Ausführungsform dazu, dass die Sätze von ersten, zweiten und dritten Harmonischen alle den Grundfrequenz-Satz überlappen. Der Satz von ersten Harmonischen wird durch höhere Harmonische überlappt, die sich bis zum Satz vom siebten Harmonischen erstrecken. Obwohl [Fig. 15B](#) zeigt, dass sich eine erhebliche Überlappung zwischen unterschiedlichen Signal-Komponenten ergibt (die durch Bänder über anderen Bändern gezeigt sind), ergibt keine der Überlappungen eine Interferenz mit Information übertragenden Komponenten.

[0197] Die in den [Fig. 15A](#) und [Fig. 15B](#) gezeigte Ausführungsform kann auf irgendein multiplexiertes System verallgemeinert werden, das vier oder mehr Lichtquellen verwendet. Für ein System mit N Lichtquellen, wobei $N \geq 4$ ist, schließt eine Ausführungsform Grundfrequenzen bei Vielfachen von Δf ein, die gleich 3 und 4 sind, gefolgt von den nächsten $N - 2$ aufeinander folgenden Primzahlen, beginnend mit 5. Somit können die Modulationsfrequenzen wie folgt geschrieben werden:

$f_1 = 3\Delta f$; $f_2 = 4\Delta f$; und für $2 < n \leq N$, $f_n = X_n \Delta f$ worin X_n die $(n - 2)$ te aufeinanderfolgende Primzahl beginnend mit 5 ist. Die Tabelle IV zeigt die Auswahl von Modulationsfrequenzen, die dieser Ausführungsform für unterschiedliche Werte von N zugeordnet sind.

Tabelle IV

N	Modulationsfrequenzen (Vielfache von Δf)
4	3, 4, 5, 7
5	3, 4, 5, 7, 11
6	3, 4, 5, 7, 11, 13
7	3, 4, 5, 7, 11, 13, 17
8	3, 4, 5, 7, 11, 13, 17, 19
9	3, 4, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23
10	3, 4, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29

[0198] Obwohl die vorstehend erläuterten Ausführungsformen möglicherweise die Modulationsfrequenzen mit ganzzahligen Werten für den minimalen Parameter des Abstandes, Δf , liefern, ist es für den Fachmann zu erkennen, dass die Erfindung durch Wählen von Frequenzen in der Praxis ausgeführt werden könnte, die geringfügig von diesen ganzzahligen Werten abweichen. Das Ausmaß der zulässigen Eichung hängt von den relativen Größen der Komponenten-Bandbreiten und Δf ab. Weiterhin zeigen die [Fig. 10A](#) bis [Fig. 15B](#) Beispiele von Systemen mit Komponenten-Bandbreiten, die exakt gleich Δf sind. Dieser Gesichtspunkt der Figuren ist stilistisch. Die vorstehend beschriebenen Ausführungsformen schließen Systeme ein, für die die Komponenten-Bandbreiten schmäler als Δf sind.

Hochdruck-Hochtemperatur-Hydrophon

[0199] Bei bevorzugten Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung arbeitet die Hydrophon-Sensor-Anordnung bei Temperaturen von zumindest 35 MPa (5.000 psi) und bei Temperaturen von zumindest 130°C. Besonders bevorzugt arbeitet die Hydrophon-Sensor-Anordnung bei Drücken von zumindest 35 MPa (5.000 psi) und bei Temperaturen von zumindest 150°C. Am meisten bevorzugt arbeitet die Hydrophon-Sensor-Anordnung bei Drücken von zumindest 35 MPa (5.000 psi) und bei Temperaturen von zumindest 180°C.

[0200] Der kleine Außendurchmesser der Hydrophon-Sensor-Anordnung der vorliegenden Erfindung ist besonders vorteilhaft. Bei bevorzugten Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung beträgt der Außendurchmesser der Sensor-Anordnung nicht mehr als 38 mm (1,5 Zoll). Bei besonders bevorzugten Ausführungsformen beträgt der Außendurchmesser der Sensor-Anordnung nicht mehr als ungefähr 35 mm (1,375 Zoll). Bei anderen bevorzugten Ausführungsformen liegt der Außendurchmesser der Sensor-Anordnung zwischen ungefähr 35 mm (1,375 Zoll) und ungefähr 38 mm (1,5 Zoll). Bei weiteren bevorzugten Ausführungsformen beträgt der Außendurchmesser der Sensor-Anordnung nicht mehr als ungefähr 35 mm (1,0 Zoll). Der kleine Au-

ßendurchmesser der Sensor-Anordnung ermöglicht es, dass das Hydrophon in die Bohrloch-Auskleidung eines Bohrloches eingesetzt wird, ohne dass das Produktions-Rohr entfernt wird. Die Sensor-Anordnung kann weiterhin in einen Längen-Abschnitt des Produktions-Rohres eingesetzt werden.

[0201] Der Außendurchmesser der Hydrophon-Sensor-Anordnung der vorliegenden Erfindung ist im Wesentlichen gleichförmig $\pm 0,5$ mm ($\pm 0,020$ Zoll) über die Länge der Anordnung. Der gleichförmige Außendurchmesser ermöglicht es, dass die Anordnung in einem konventionellen Fett-Einspritzkopf einer Öl-Bohrung unter Druck eingesetzt werden kann, so dass die Druck-Steuerung der Öl-Bohrung aufrecht erhalten werden kann. Die äußere Abdeckung der Anordnung passt eng in den Injektions-Kopf und wird durch das unter Druck stehende Fett geschmiert, so dass die Anordnung in das Bohrloch ohne Aufheben des Druckes in dem Bohrloch abgesenkt werden kann. Der Fachmann wird erkennen, dass ein gestapeltes Pass-Stück in vorteilhafter Weise an dem Bohrungs-Kopf angewandt wird, um den kleineren gleichförmigen Außen-Durchmesser des Herabführungs-Kabels zu erreichen.

[0202] Die allgemeine Konstruktion einer bevorzugten Hydrophon-Ausführungsform **1000** ist in [Fig. 16](#) gezeigt, wobei diese Ausführungsform in der Lage ist, unter extremen Bedingungen zu arbeiten, wie zum Beispiel Temperaturen bis zu ungefähr 220°C und Drücken von 69 MPa (10.000 psi) oder sogar bis zu 103-138 MPa (15.000-20.000 psi). Das Hydrophon kann auch in befriedigender Weise unter weniger extremen Bedingungen arbeiten, wie zum Beispiel bei Temperaturen von zumindest 150°C und Drücken von 55 MPa (8.000 psi) oder Temperaturen von zumindest 130°C und Drücken von zumindest 41 MPa (6.000 psi). Sensoren **1002** sind unter periodischen Intervallen entlang eines Durchmesser von 25 mm (1,0 Zoll) bis 38 mm (1,5 Zoll) beispielsweise 32 mm (1,25 Zoll) aufweisenden Kabels **1004** angeordnet, wobei ein derartiger Sensor **1002** in [Fig. 16](#) gezeigt ist. Alternativ kann das Kabel **1004** einen Durchmesser zwischen 25 mm und 51 mm (0,9 Zoll und 2,0 Zoll) haben. Bei einer bevorzugten Ausführungsform weisen die Sensoren einen Abstand von nahezu exakt 1,5 m (5 Fuß) voneinander mit einer Toleranz von 6,4 mm (1/4 Zoll) auf. Das Kabel **1004** schließt eine Außenhülle **1008** ein, die ein Füllelement **1012** umgibt, das sich um die Sensoren **1002** herum erstreckt. In den von den Sensoren **1002** entfernten Teilen des Kabels **1004** umgibt die Außenhülle **1008** ein Kern-Element **1016**, das eine Vielzahl von ringförmigen Strängen **1020** umgibt, die um ein zentrales Festigkeits-Element **1024** herum angeordnet sind. Diese Beziehungen sind klarer aus der Querschnitts-Ansicht des Kabels **1004** gemäß [Fig. 17](#) zu erkennen.

[0203] Das zentrale Festigkeits-Element **1024** befindet sich entlang der Mitte des Kabels **1004** und ergibt eine Zugfestigkeit für das Kabel **1004** mit Ausnahme an den Stellen, an denen sich die Sensoren **1002** befinden. Das Festigkeits-Element **1024** schließt eine Kunststoff-Hülle **1028** ein, die 6-8 Bündel **1030** umgeben, wobei jedes Bündel 15-20 Stahlstränge **1034** mit einem Durchmesser von ungefähr 0,4 mm (0,015 Zoll) hat. Der Gesamtdurchmesser des Festigkeits-Elementes **1024** kann 5,54 mm (7/32 Zoll) sein. Die rohrförmigen Stränge **1020** können beispielsweise einen Durchmesser von 0,084 Zoll haben und aus Hytrel™ 5556, Hytrel™ 7246 oder Hytrel™ 8238 von der Firma DuPont sein (die Schmelzpunkte und Viat-Erweichungspunkte von 203°C , 180°C ; 218°C , 207°C beziehungsweise 223°C , 212°C haben) bestehen. Die rohrförmigen Stränge **1020** umgeben Leiter oder Lichtleitfasern, oder die rohrförmigen Stränge können lediglich leer sein (Füllstränge), um eine strukturelle Integrität für das Hydrophon **1000** zu schaffen. Bei einer speziellen Ausführungsform werden 12 rohrförmige Stränge **1020** verwendet, wobei zwei Stränge Kupfer-Leiter tragen, vier Stränge jeweils sechs Lichtleitfasern tragen und die sechs verbleibenden Stränge Füllstränge sind. Eine derartige Anordnung ist zur Verwendung in einer 6×16 -Anordnung geeignet, bei der zwei Lichtleitfasern als Reserve bestimmt sind. Die Kupfer-Leiter können zur Lieferung elektrischer Leistung an ein Gerät am distalen Ende des Kabels **1004** verwendet werden, beispielsweise ein Gamma-Werkzeug für Mess-Zwecke.

[0204] Das Kern-Element **1016** erstreckt sich entlang der Länge des Kabels **1004** mit Ausnahme des Bereiches in und um die Sensoren **1002** herum. Das Kern-Element **1016** kann in vorteilhafter Weise Furon (0611-950 von der Furon Company) sein. In dem Gebiet jedes Sensors **1002** ist das Füll-Element **1012** vorzugsweise Polyurethan (beispielsweise PRC **1547** von Courtaulds Aerospace), das sich bis zu einem Durchmesser von 25,4 mm (1,0 Zoll) erstreckt, um die Komponenten zusammenzuhalten, die die Sensoren **1002** bilden. Daher wird das Füll-Element **1012** um die Sensoren **1002** herum geformt, nachdem die Sensoren in dem Kabel **1004** angeordnet wurden. Die Außenhülle **1008** kann 2,5 mm (0,1 Zoll) starkes Hytrel™ 5556, Hytrel™ 7246 oder Hytrel™ 8238 sein und erstreckt sich um die gesamte Länge des Kabels **1004**. (Ein Hochtemperatur-Teflon-basiertes Material wie zum Beispiel Tefzel, kann anstelle der genannten Hytrel™-Materialien verwendet werden). Die Außenhülle **1008**, das Füll-Element und das Kern-Element **1016** wirken als Schutzschichten, um das Hydrophon **1000** (unter Einschluss von dessen Bezugs-Dorn und dessen Mess-Dorn, wie dies weiter unten erläutert wird) gegenüber einer korrosiven Umgebung zu schützen. Der Außendurchmesser des Hydrophons **1000** beträgt vorzugsweise weniger als ungefähr 38 mm (1,5 Zoll) und weiter bevorzugt beträgt er

weniger als ungefähr 25 mm (1,0 Zoll).

[0205] Wie dies in [Fig. 16](#) zu erkennen ist, ist das Festigkeits-Element **1024** mit einem Flansch **1040** verbunden, der axiale Kräfte von dem Festigkeits-Element **1024** auf einen Zugentlastungs-Mechanismus überträgt, wie zum Beispiel eine Vielzahl von Zugentlastungs-Drähten **1050** (wie dies weiter anhand der [Fig. 18](#) erläutert wird) und dann zu einem zweiten Flansch **1040**. Auf diese Weise werden das Hydrophon **1000** (und insbesondere der Bezugs-Dorn, der Mess-Dorn, die Bezugs-Lichtleitfaser und die Mess-Lichtleitfaser, die weiter unten erläutert werden) im Wesentlichen gegenüber axialen Kräften isoliert. Das Festigkeits-Element **1024** ist in vorteilhafter Weise von einer Feder **1060** in der Nähe des Punktes umgeben, an denen das Festigkeits-Element **1024** mit dem Flansch **1040** durch einen üblichen Hochdruck-Verpressungs-Prozess verbunden ist. Die rohrförmigen Stränge **1020** durchlaufen ebenfalls in vorteilhafter Weise die Feder **1060**, obwohl die Stränge **1020** in diesem Teil der [Fig. 16](#) aus Gründen der Klarheit nicht gezeigt sind.

[0206] Wie dies in [Fig. 18](#) gezeigt ist, befinden sich die Flansche **1040** in der Nähe jeweiliger Enden des Hydrophons **1000**. Die Flansche **1040** können eine Vielzahl von erhöhten Bereichen **1064** einschließen, um die herum die Zugentlastungs-Drähte **1050** gewickelt sind, und zwischen denen sich (in [Fig. 18](#) nicht gezeigte) Nuten befinden, die die rohrförmige Stränge **1020** aufnehmen. Eine Anzahl von einer Länge von 1,0 Zoll aufweisenden Feder-Elementen **1080** (die weiter unten erläutert werden) halten die Zugentlastungs-Drähte **1050**. Die Zugentlastungs-Drähte **1050** sind vorzugsweise miteinander überkreuzt, wie dies in [Fig. 18](#) gezeigt ist, um eine „Käfig“ zu bilden, der verhindert, dass das Kabel **1004** übermäßig verdreht wird, was Schäden an den Sensoren **1020** hervorrufen könnte. Die Zugentlastungs-Drähte **1050** sind zumindest 2/3 der Strecke um den Sensor **1002** in der radialen Richtung erstreckt, während sie sich von einem Flansch **1040** zu dem anderen Flansch erstrecken. Bei dieser Anordnung überkreuzen sich Zugentlastungs-Drähte **1050** zwischen den Feder-Elementen **1080**, statt über den Feder-Elementen **1080**. Die Flansche **1040** als solche haben vorzugsweise keine scharfen Kanten oder Merkmale, um eine Gefahr einer Beschädigung der rohrförmigen Stränge **1020** oder der darin enthaltenen Leiter oder optischen Lichtleitfasern zu verringern. Aus dem gleichen Grund können die Zugentlastungs-Drähte **1050** mit Teflon beschichtet sein. Das Hydrophon **1000** ist vorzugsweise so konstruiert, dass es flexibel genug ist, damit es um einen Krümmungsradius von weniger als ungefähr vier Fuß gebogen werden kann.

[0207] Wie dies in [Fig. 19](#) gezeigt ist, schließt der Sensor **1002** ein Telemetrie-Gehäuse **1104**, einen Bezugs-Dorn **1110** und zumindest einen, jedoch vorzugsweise zwei Mess-Dorne **1120**, **1122** ein, die alle Ende-zu-Ende (koaxial) ausgerichtet sind, um das Profil des Kabels **1004** zu verringern. Dies steht im Gegensatz zu üblichen bekannten Konfigurationen der Anordnung des Bezugs-Dorns innerhalb des Mess-Dorns. Unter Verwendung von zwei Mess-Dornen **1120**, **1122** anstelle von lediglich einem Dorn kann eine verbesserte Empfindlichkeit ergeben, weil, wenn alle anderen Dinge gleich sind, die Verwendung von zwei Mess-Dornen die Verwendung von mehr Mess-Lichtleitfasern ermöglicht. Das Telemetrie-Gehäuse **1104** hat eine darin ausgebildete Bohrung **1128** zur Aufnahme einer Verteilungs-Lichtleitfaser (Bus) **1130**, die ein optisches Eingangssignal **1132** überträgt, das von einer optischen Quelle erzeugt wird. Zusammen können die Sensoren **1102** entlang des Kabels **1004** in vorteilhafter Weise eine Sensor-Anordnung ergeben, wie zum Beispiel die optische 6 × 16-Anordnung, die in dem US-Patent US 6,249,622 B1 (Hodgon et al) mit dem Titel „Arcitecture for large optical fiber array using standard 1 × 2 couplers“ beschrieben ist. Die Verteilungs-Lichtleitfaser **1130** ist mit einem Eingangstelemetrie-Koppler **1150** (siehe [Fig. 20A](#)) verspleißt, der sich in vorteilhafter Weise innerhalb des Telemetrie-Gehäuses **1104** befindet. Eine zweite Bohrung **1134** in dem Telemetrie-Gehäuse **1104** ermöglicht den Durchgang der Verteilungs-Lichtleitfaser **1130** aus dem Telemetrie-Gehäuse **1104**, nachdem ein Teil des optischen Eingangssignals von dem Koppler **1150** abgezapft wurde. Wenn der Sensor **1002** einen Teil einer Anordnung bildet, kann die Verteilungs-Lichtleitfaser **1130** in vorteilhafter Weise mit anderen Sensoren an weiteren Stellen entlang des Anordnungs-Kabels **1004** gekoppelt sein.

[0208] Das Telemetrie-Gehäuse **1104** nimmt im übrigen einen Ausgangstelemetrie-Koppler **1154** auf, der mit einer Rückführungs-Lichtleitfaser (Bus) **1160** gekoppelt ist. Die Rückführungs-Lichtleitfaser **1160** tritt in das Telemetrie-Gehäuse **1104** über eine dritte Bohrung **1164** ein. Wenn die Rückführungs-Lichtleitfaser **1160** in das Telemetrie-Gehäuse **1104** eintritt, überträgt die Lichtleitfaser **1160** bereits optische Ausgangssignale von den Sensoren, die sich distal von dem Sensor **1002** befinden, sofern nicht der Sensor **1002** der am weitesten distal liegende Sensor auf einer Rückführungs-Lichtleitfaser ist. Ein perturbiertes optisches Ausgangssignal **1168** von dem Sensor **1002** wird von dem Ausgangstelemetrie-Koppler **1154** auf die Rückführungs-Lichtleitfaser **1160** gekoppelt. Die Rückführungs-Lichtleitfaser **1160** verläuft dann durch eine vierte Bohrung **1172** in dem Telemetrie-Gehäuse **1104** und kann mit anderen Sensoren entlang des Kabels **1004** gekoppelt werden, bevor sie in Richtung auf die Signal-Verarbeitungs-Elektronik gelenkt wird.

[0209] Nunmehr wird die optische Architektur, die sich auf den Bezugs-Dorn **1110** und die Mess-Dorne **1120**, **1122** bezieht, beschrieben. Das optische Eingangs-Signal, das von dem Telemetrie-Eingangs-Koppler **1150** abgezapft wird, wird entlang einer optischen Eingangs-Lichtleitfaser **1180** gelenkt, die durch eine Bohrung **1184** in dem Telemetrie-Gehäuse **1104** und eine Bohrung **1188** in den Bezugs-Dorn **1110** hindurch läuft. Wie dies in [Fig. 20A](#) gezeigt ist, ist die optische Eingangs-Lichtleitfaser **1180** mit einem Hydrophon-Eingangs-Koppler **1192** verbunden. Der Hydrophon-Eingangs-Koppler **1192** befindet sich in dem Bezugs-Dorn **1110** und lenkt einen Bruchteil des optischen Eingangs-Signals auf eine Bezugs-Lichtleitfaser **1196**. Ein weiterer Bruchteil des optischen Eingangs-Signals wird auf eine Mess-Lichtleitfaser **1198** gelenkt.

[0210] Die Bezugs-Lichtleitfaser **1196** und die Mess-Lichtleitfaser **1198** wirken als ein Bezugs-Arm beziehungsweise einem Mess-Arm eines Interferometers, der in [Fig. 20A](#) in Form eines Mach-Zehnder-Interferometers gezeigt ist. Die Bezugs-Lichtleitfaser **1196** verläßt eine Bohrung **1202** in den Bezugs-Dorn **1110** und bildet 8 „Schichten“ um den Bezugs-Dorn (das heißt die Bezugs-Lichtleitfaser ist 8 mal in einer eng-gepackten Weise um den Bezugs-Dorn **1110** gewickelt, so dass jede Schleife der Lichtleitfaser auf dem Dorn in Kontakt mit einer benachbarten Schleife der Bezugs-Lichtleitfaser steht), bevor sie erneut in den Bezugs-Dorn **1110** durch eine weitere Bohrung **1206** eintritt. Die Mess-Lichtleitfaser **1198** läuft aus einer Bohrung **1210** in den Bezugs-Dorn **1110** heraus und bildet eine Schicht um den Mess-Dorn **1120**, bevor sie zu dem Mess-Dorn **1122** gelenkt wird, wo die Mess-Lichtleitfaser 4 Schichten bildet. Die Mess-Lichtleitfaser **1198** wird dann zurück auf den Mess-Dorn **1120** gelenkt, wo die Mess-Lichtleitfaser drei zusätzliche Schichten bildet, so dass die Mess-Lichtleitfaser insgesamt 4 Schichten auf dem Mess-Dorn **1120** bildet. An diesem Punkt tritt die Mess-Lichtleitfaser **1198** in eine Bohrung **1214** in den Bezugs-Dorn **1110** ein. Die Bezugs-Lichtleitfaser **1196** und die Mess-Lichtleitfaser **1198** sind mit einem Hydrophon-Ausgangs-Koppler **1218** (siehe [Fig. 20A](#)) verspleißt, der sich in dem Bezugs-Dorn **1110** befindet. Licht, das sich zu dem Koppler **1218** von den zwei Armen ausbreitet, ergibt eine Interferenz an dem Koppler **1218**. Im einzelnen empfängt der Hydrophon-Ausgangs-Koppler **1218** ein optisches Signal von dem Bezugs-Arm (Bezugs-Lichtleitfaser **1196**) und ein optisches Signal von dem Mess-Arm (Mess-Lichtleitfaser **1198**) und erzeugt ein optisches Ausgangs-Signal, das auf eine Ausgangs-Lichtleitfaser **1222** gelenkt wird. Die Ausgangs-Lichtleitfaser **1222** läuft durch eine Bohrung **1226** in dem Bezugs-Dorn **1110** hindurch und in eine Bohrung **1230** in dem Telemetrie-Gehäuse **1104**. Die Ausgangs-Lichtleitfaser **1222** überträgt das geänderte optische Ausgangs-Signal und ist mit dem Telemetrie-Ausgangs-Koppler **1154** verspleißt, wie dies weiter oben beschrieben wurde.

[0211] Die Mess-Lichtleitfaser **1198** ist unter Spannung um die Mess-Dorne **1120**, **1122** gewickelt. Die Mess-Dorne **1120**, **1122** verformen sich in Abhängigkeit von akustische Signalen (sie dehnen sich aus und ziehen sich zusammen), derart, dass die Spannung in der Mess-Lichtleitfaser **1198**, die die Mess-Dorne umgibt, modifiziert wird, wodurch die Gesamtlänge der Mess-Lichtleitfaser **1198** geändert wird. Die Länge der Mess-Lichtleitfaser **1198** und somit die optische Pfad-Länge für optische Strahlung, die die Mess-Lichtleitfaser **1198** durchläuft, wird geändert, was andererseits die Phasen-Differenz zwischen der optischen Strahlung, die sich in der Bezugs-Lichtleitfaser **1196** ausbreitet, und der optischen Strahlung, die sich in der Mess-Lichtleitfaser **1198** ausbreitet, beeinflusst.

[0212] Auf diese Weise wirkt der Sensor **1002** als ein Mach-Zehnder-Interferometer, das Änderungen des akustischen Druckes aufzeichnet. Obwohl eine bevorzugte Sensor-Architektur von 8 Schichten einer Lichtleitfaser, die um den Bezugs-Dorn **1110** gewickelt wurde, und vier Schichten der Lichtleitfaser um jeden der Mess-Dorne **1120** und **1122** beschrieben wurde, ist die Verwendung einer anderen Anzahl von Schichten möglich. Eine Vergrößerung der Anzahl von Schichten und der Mess-Dorne führt zu einer größeren Empfindlichkeit, vergrößert jedoch auch die Kosten. Der hier beschriebene Sensor **1002** hat in vorteilhafter Weise einen hohen Skalierungsfaktor von -140 dB gegenüber Radianten/MikroPascal.

[0213] Eine andere Interferometer-Konfiguration beispielsweise Michelson oder Fabry-Perot ist ebenfalls möglich. [Fig. 20B](#) zeigt eine alternative Konfiguration, die als ein Michelson-Interferometer wirkt. Der Hydrophon-Eingangs-Koppler **1192** und der Hydrophon-Ausgangs-Koppler **1218** sind durch einen einzigen Hydrophon-Koppler **1199** ersetzt, der beide Funktionen ausführt. An dem Ende der Bezugs-Lichtleitfaser **1196** und an dem Ende der Mess-Lichtleitfaser **1198** sind jeweilige Reflektoren **1200a** und **1200b** angeordnet, wodurch eine optische Interferenz in den Hydrophon-Koppler **1199** ermöglicht wird. Der Hydrophon-Koppler **1199** dieser Michelson-Konfiguration ist vorzugsweise innerhalb des Bezugs-Dorns **1110** angeordnet.

[0214] [Fig. 20C](#) zeigt eine weitere alternative Konfiguration, die als ein Fabry-Perot-Interferometer arbeitet. Bei dieser Konstruktion gibt es keine Bezugs-Lichtleitfaser **1196** oder einen Bezugs-Dorn **1110**. An der Ausgangs-Seite des Telemetrie-Eingangs-Kopplers **1150** befindet sich ein Teil-Reflektor **1201a**. In ähnlicher Weise befindet sich ein Teil-Reflektor **1201b** an der Eingangs-Seite des Telemetrie-Ausgangs-Kopplers **1164**. Die

Teil-Reflektoren **1201a**, **1201b** bilden das Fabry-Perot-Interferometer und sind vorzugsweise Lichtleitfaser-Bragg-Gitter. Bei dieser Konfiguration befinden sich Telemetrie-Eingangs-Koppler **1150**, der Telemetrie-Ausgangs-Koppler **1154** und die Teil-Reflektoren **1201a**, **1201b** in vorteilhafter Weise innerhalb des Telemetrie-Gehäuse **1104**.

[0215] Das Telemetrie-Gehäuse **1104**, der Bezugs-Dorn **110** und die Mess-Dorne **1120**, **1122** schließen vorzugsweise jeweilige Hauptkörper **1260a**, **1260b**, **1260c**, **1260d** mit einer Länge von 100 mm (3,9 Zoll) und einem Durchmesser von ungefähr 12mm (0,48 Zoll) sowie jeweilige Paare von Endkappen **1264a**, **1266a**; **1264b**, **1266b**; **1264c**, **1266c**; **1264d**, **1266d** (die weiter unten ausführlicher erläutert sind) ein, wie dies in [Fig. 19](#) gezeigt ist. [Fig. 21](#) zeigt den Bezugs-Dorn **1110** mit weiteren Einzelheiten. Wie dies in [Fig. 19](#) angegeben ist, treten die verschiedenen Lichtleitfasern durch Bohrungen ein und aus, die in den Endkappen **1264a**, **1266a**; **1264b**, **1266b** angeordnet sind. Lichtleitfasern verlaufen nicht durch irgendwelche der Endkappen in den Mess-Dornen **1120** und **1122**. Die Endkappen **1264a**, **1266a**; **1264b**, **1266b**; **1264c**, **1266c**; **1264d**, **1266d** (die weiter unten ausführlicher erläutert werden) weisen vorzugsweise eine konvex geformten halbkugelförmigen Umriss auf, um dazu beizutragen, dass sie hohen Drücken widerstehen, und sie haben vorzugsweise Durchmesser, die geringfügig größer als der Durchmesser ihrer jeweiligen Haupt-Körper **1260a**, **1260b**, **1260c**, **1260d** sind, so dass die Schichten der Lichtleitfasern auf eine Umwicklung um den Haupt-Körper herum beschränkt sind. Das Telemetrie-Gehäuse **1104** weist vorzugsweise eine metallische Konstruktion auf, wie zum Beispiel aus Stahl, und es weist vorzugsweise metallische Endkappen **1264a**, **1266a** auf.

[0216] Der Bezugs-Dorn **1110** ergibt einen stabilen Bezug, gegen den optische Pfadlängen-Änderungen in dem Mess-Arm bestimmt werden können, das heißt der Bezugs-Dorn ist im Wesentlichen unempfindlich gegenüber akustischen Signalen, um die Wirkung der akustischen Signale auf die Bezugs-Lichtleitfaser **1196** zu verringern. Um eine Verformung des Bezugs-Dorns **1110** in Abhängigkeit von Druck-Änderungen zu verringern, besteht der Bezugs-Dorn unter Einschluss seiner Endkappen **1264b**, **1266b** vorzugsweise aus Metall, wie zum Beispiel Stahl. Andererseits werden die Wände des Bezugs-Dorns **1110** vorzugsweise dünn gehalten, beispielsweise auf ungefähr 1 mm (0,05 Zoll), um das Profil des Bauteils zu verringern, was in dem Sinne wirkt, dass ein gewisses Ansprechen auf Drücke von dem Bezugs-Dorn **1110** zugelassen wird (das heißt eine gewisse Biegung des Bezugs-Dornes) in Abhängigkeit von akustischen Signalen. Um dies zu kompensieren und um die Empfindlichkeit des Bezugs-Dorns **1110** gegenüber akustischen Signalen zu verringern, kann eine Abdeckung **1270** in vorteilhafter Weise über die Bezugs-Lichtleitfaser **1196** aufgebracht werden (wie dies im weggebrochenen Teil in [Fig. 21](#) gezeigt ist), wobei sich die Abdeckung **1270** in vorteilhafter Weise zwischen den Endkappen **1264b**, **1266b** erstreckt und mit diesem versiegelt ist. Ein Luft-Hohlraum, beispielsweise mit 0,1 MPa (1 Atmosphäre) kann zwischen der Abdeckung **1270** und der Bezugs-Lichtleitfaser **1196** gebildet werden, um als Druck-Puffer zu wirken. Der Aussendurchmesser (O.D.) der Abdeckung **1270** kann ungefähr 13 mm (0,53 Zoll) betragen. Ein Klebemittel, wie zum Beispiel Torrseal™ kann zur Abdichtung der Abdeckung **1270** verwendet werden, wobei zugelassen wird, dass das Klebemittel über die Endkappen **1264b**, **1266b** sowie über die Teile der Bezugs-Lichtleitfaser **1196** fließt, die sich ungefähr 6 mm von jedem Ende des Haupt-Körpers **1260b** aus erstrecken. Die Abdeckung **1270** isoliert somit die Bezugs-Lichtleitfaser **1196** gegenüber Umgebungs-Drücken, wodurch die Stabilität des Bezugs-Dorns **1110** in einer interferometrischen Bezugs-Quelle verbessert wird. Der Bezugs-Dorn **1110** kann teilweise vergossen sein, um die Hydrophon-Eingangs- und Ausgangs-Koppler **1192**, **1218** an ihrem Platz zu halten, oder alternativ kann ein Klebemittel verwendet werden.

[0217] Die Mess-Dorne **1120**, **1122** bestehen aus einem Hochtemperatur-Material, das, wenn es einem hohen Druck ausgesetzt ist, steif genug ist, damit die Dome nicht aufgrund einer Verformung brechen. Andererseits sind die Dorne **1120**, **1122** flexible genug, damit sie sich in Abhängigkeit von akustischen Drücken biegen (einer Beanspruchung ausgesetzt werden), ohne dass sie unter dem hydrostatischen Druck ausgebeult werden. Weiterhin hat dieses Hochtemperatur-Material eine Steifigkeit, die bei Temperaturen über 200°C relativ stabil bleibt. Zwei Kunststoffe, die für diesen Zweck geeignet sind, sind Torlon™ (insbesondere Torlon™ 5030) und Celazole™. An diesen zwei wird Celazole™ bevorzugt, weil es bis zu höheren Temperaturen stabil ist, und weil seine geringfügig niedrigere Steifigkeit zu einer größeren Sensor-Empfindlichkeit führt. Weiterhin weist Celazole™ unter einer hydrostatischen Belastung ein geringeres Kriechen auf. Das letztere Merkmal ist im Kontext von Interferometern wichtig, weil Änderungen, die so klein sind, wie einige wenige Zehntel eines Prozentes, hinsichtlich der Länge der Mess-Lichtleitfaser **1198** das Steuer-Betriebsverhalten des Hydrophon-Sensors **1002** erheblich verschlechtern können. Sowohl Torlon™ als auch Celazole™ weisen Vorteile gegenüber bekannten Materialien auf, die dünnwandiges Aluminium und Polycarbonat einschließen. Polycarbonat ist im allgemeinen nicht für eine Betrieb bei Temperaturen oberhalb von 105°C geeignet. Torlon™ als auch Celazole™ sind jedoch für eine Betrieb bei Drücken von zumindest 69 MPa (10.000 psi) oder sogar 103-138 MPa (15.000-20.000 psi) und Temperaturen von zumindest 220°C geeignet.

[0218] Torlon™ 5030 ist ein Polyamidimid und hat eine Zugfestigkeit von 165 MPa (24.000 psi), ein Zugkraft-Elastizitäts-Modul von 8.270 MPa (1.200.000 psi), eine Dehnung von 4%, eine Biege-Festigkeit von 248 MPa (36.000 psi), ein Biege-Elastizitäts-Modul 6.890 MPa (1.000.000 psi), eine Druckfestigkeit (10% Verformung) von 262 MPa (38.000 psi), ein Druck-Elastizitäts-Modul von 4.140 MPa (600.000 psi), wobei alles dies bei 23°C (73°F) gemessen wird. Weiterhin hat Torlon™ 5030 einen Koeffizienten der linearen Dehnung von 1,8 m/m/°C ($1,0 \times 10^{-5}$ in/in/°F), eine Wärme-Auslenkungs-Temperatur bei 1,8 MPa (264 psi) von 282°C (539°F) und eine maximale Dauer-Betriebs-Temperatur in Luft von 260°C (500°F). (Alle Werte sind angenähert).

[0219] Celazole™ PBI (Polybenzimidazol) hat eine Zugfestigkeit von 1659 MPa (23.000 psi), ein Zugkraft-Elastizitäts-Modul von 5.860 MPa (850.000 psi), eine Dehnung von 3%, eine Biege-Festigkeit von 221 MPa (32.000 psi), ein Biege-Elastizitäts-Modul 6.550 MPa (950.000 psi), eine Druckfestigkeit (10% Verformung) von 345 MPa (50.000 psi), ein Druck-Elastizitäts-Modul von 6.210 MPa (900.000 psi), wobei alles dies bei 23°C (73°F) gemessen wird. Weiterhin hat Celazole™ 5030 einen Koeffizienten der linearen Ausdehnung von 0,72 m/m/°C ($1,3 \times 10^{-5}$ in/in/°F), eine Wärme-Auslenkungs-Temperatur bei 1,8 MPa (264 psi) von 430°C (800°F) und eine maximale Dauer-Betriebs-Temperatur in Luft von 400°C (7500°F). (Alle Werte sind angenähert).

[0220] Die Endkappen **1264a, 1266a; 1264b, 1266b; 1264c, 1266c; 1264d, 1266d** sind in vorteilhafter Weise halbkugelförmig, so dass das Telemetrie-Gehäuse **1104**, der Bezugs-Dorn **1110** und die Mess-Dorne **1120, 1122** gleichförmiger gebogen werden, wenn sie einem Druck ausgesetzt werden, und sie können auf diese Weise höheren Drücken widerstehen, wie sie in den hier beschriebenen Bohrloch-Anwendungen auftreten, die hier leicht 21-28 MPa (3.000-4.000 psi) übersteigen können. Diese halbkugelförmige Konstruktion vermeidet, dass Belastungen in kleinen Bereichen konzentriert werden, und dies steht im Gegensatz zu bekannten Konstruktionen von zylindrischen Endkappen, die bei einem hydrostatischen Druck ausfallen.

[0221] Die Endkappen **1264a, 1266a; 1264b, 1266b; 1264c, 1266c; 1264d, 1266d** (die in [Fig. 19](#) und [Fig. 21](#) in ihrer zusammengebauten Konfiguration gezeigt sind) weisen in vorteilhafter Weise alle die gleiche Form auf, die durch die Querschnitts-Darstellung einer bevorzugten Endkappe **1264a** erläutert ist, die in [Fig. 22](#) gezeigt ist. Der Außendurchmesser (O.D.) der Endkappe **1264a** (der mit „C“ in [Fig. 22](#) bezeichnet ist), ist vorteilhafter Weise angenähert 12,1 mm (0,477 Zoll). Die Endkappe **1264a** hat eine Lippe **1280**, die einen O.D. von ungefähr 5,23 mm (0,206 Zoll) hat (der mit „B“ in [Fig. 22](#) bezeichnet ist) und einen I.D. von ungefähr 5,23 mm (0,206 Zoll) (mit „A“ in [Fig. 22](#) bezeichnet). Die Lippen **1280** der Endkappen **1264a, 1264b, 1264c, 1264d** sind so ausgewählt, dass sie in ihre jeweiligen Haupt-Körper **1260a, 1260b, 1260c, 1260d** gleiten und mit diesen zusammenpassen. Jede der Endkappen **1264a, 1266a; 1264b, 1266b; 1264c, 1266c; 1264d, 1266d** besteht vorzugsweise aus dem gleichen Material wie der entsprechende Haupt-Körper **1260a, 1260b, 1260c, 1260d**. Somit bestehen die Endkappen **1264a, 1266a, 1264b, 1266b** vorzugsweise aus Metall. Die Endkappen **1264c, 1266c, 1264d, 1266d** bestehen vorzugsweise entweder aus Torlon™ oder Celazole™, um an die Konstruktion ihrer jeweiligen Haupt-Körper **1260c** und **1260d** angepasst zu sein.

[0222] [Fig. 19](#) zeigt, dass es drei Paare von entgegengesetzt gerichteten Endkappen gibt: **1266a, 1264b; 1266b, 1264c; und 1266c, 1264d**. Jedes dieser Paare von Endkappen ist in vorteilhafter Weise von einem elastischen, biegsamen Material (in [Fig. 16, Fig. 18, Fig. 19, Fig. 21](#) und [Fig. 22](#) aus Gründe der Klarheit nicht gezeigt) umgeben, wie zum Beispiel Polyurethan (PRC **1547** wird bevorzugt), das eine flexible Zwischenverbindung bildet. Beispielsweise bildet Polyurethan eine flexible Zwischenverbindung **1296** (siehe [Fig. 23](#)), die die Endkappe **1266a** des Telemetrie-Gehäuses **1104** mit der Endkappe **1264b** des Bezugs-Dorns **1110** verbindet. Die Zwischenverbindung **1296** schließt darin ausgebildete Nuten **1300, 1304** zur Aufnahme der Lichtleitfasern **1180** und **1222** ein. In ähnlicher Weise verbindet eine weitere flexible (nicht gezeigte) Zwischenverbindung den Bezugs-Dorn **1110** mit dem Mess-Dorn **1120**, und noch eine weitere (nicht gezeigte) flexible Zwischenverbindung verbindet die Mess-Dorne **1120, 1122** miteinander. Jede dieser zusätzlichen Zwischenverbindungen hat darin ausgebildete Nuten zur Aufnahme der Mess-Lichtleitfaser **1198**, wodurch die Mess-Lichtleitfaser **1198** gegen Schäden geschützt wird.

[0223] Im Fall des Telemetrie-Gehäuses **1104** und des Bezugs-Dorns **1110** sind die Zwischenverbindungs-Nuten **1300, 1304** an beiden Enden der flexiblen Zwischenverbindung **1296** mit einer Bohrung in einer Endkappe ausgerichtet, beispielsweise kann die Nut **1300** zum Lenken der Eingangs-Lichtleitfaser **1180** von der Bohrung **1184** in dem Telemetrie-Gehäuse **1104** in die Bohrung **1188** in dem Bezugs-Dorn **1110** verwendet werden. In ähnlicher Weise kann die Nut **1304** zum Lenken der Ausgangs-Lichtleitfaser **1222** von der Bohrung **1226** in den Bezugs-Dorn **1110** zu der Bohrung **1230** in dem Telemetrie-Gehäuse **1104** verwendet werden. (Die Endkappen **1264c, 1266c, 1264d** der Mess-Dorne **1120, 1122** verwenden in vorteilhafter Weise (nicht gezeigte) Nuten anstelle von Bohrungen zur Aufnahme der Mess-Lichtleitfaser **1198**). Die Zwischenverbindung **1296**

ist dicker zwischen den Endkappen **1266a**, **1264b** als in der Nähe der Endkappen, als Ergebnis der halbkugelförmigen Formen der Endkappen, was dazu beiträgt, irgendwelche lokalisierten Kräfte zu verringern, die die Lichtleitfasern **1180**, **1222** brechen könnten. Weiterhin sind die Nuten **1300** und **1304** in vorteilhafter Weise auf eine unterschiedliche Tiefe geschnitten, so dass die Lichtleitfasern **1180** und **1222** in unterschiedlichen Ebenen liegen, das heißt die Lichtleitfasern **1180** und **1222** überkreuzen sich und sind ohne „Einklemmung“ benachbart zueinander angeordnet. Im einzelnen sind die jeweiligen Tiefen der zwei Nuten **1300**, **1304** so ausgelegt, dass sie um zumindest die Breite einer der Lichtleitfasern **1180**, **1222** verschieden sind. Beispielsweise kann die Nut **1300** um eine Lichtleitfaser-Breite tiefer als die Nut **1304** geschnitten sein, wobei die Eingangs-Lichtleitfaser **1180** (die das optische Eingangs-Signal überträgt) als erstes während des Zusammenbaus verlegt wird. Wenn sich die Eingangs-Lichtleitfaser **1180** an ihrem Platz befindet, kann die Ausgangs-Lichtleitfaser **1222** (die das geänderte optische Ausgangs-Signal überträgt) in die Nut **1304** eingelegt werden, so dass die Ausgangs-Lichtleitfaser **1222** die Eingangs-Lichtleitfaser **1180** überquert.

[0224] Die flexiblen Zwischenverbindungen, wie zum Beispiel die Zwischenverbindung **1296**, ermöglichen es, dass das Kabel **1004** in dem normalen Betriebsverlauf gebogen und ausgelenkt werden kann, beispielsweise während das Kabel **1004** aufgespult oder abgespult wird, ohne dass ein Brechen oder Schäden an irgendeiner der Lichtleitfasern auftreten. In gleicher Weise sind die Nuten **1300**, **1304** sowie die Nuten in den anderen (nicht gezeigten) Zwischenverbindungen mehrschichtig, so dass, wenn das Kabel **1004** gebogen wird, die Lichtleitfasern einander nicht beschädigen. Die Nuten **1300**, **1304** ermöglichen es den Lichtleitfasern **1180**, **1222**, mit einer gut kontrollierten Steigung über einen flexiblen Teil des Hydrophons **1000** hinweg gelenkt werden, nämlich die Zwischenverbindung **1296**. Die Nuten **1300**, **1304** stellen weiterhin sicher, dass die Lichtleitfasern **1180**, **1222** diese Steigung beibehalten, während sie in die Zwischenverbindung **1296** eintreten und diese verlassen. Bei einer bevorzugten Ausführungsform beträgt diese Steigung ungefähr 8,5 mm (1/3 Zoll), das heißt die Lichtleitfaser **1180** (**1222**, **1198**) führt eine vollständige Umdrehung um die Zwischenverbindung **1296** für alle 8,5 mm (1/3 Zoll) entlang der Länge der Zwischenverbindung aus. Die Lichtleitfaser **1180** (**1222**, **1298**) bildet vorzugsweise einen Winkel von zumindest 72 Grad mit der Achse des Kabels **1004** (oder des Hydrophons **1000**), wenn die Zwischenverbindung **1296** einen Durchmesser von 12 mm (0,48 Zoll) hat (oder einen kleineren Winkel für eine Zwischenverbindung mit kleinerem Durchmesser, und einen größeren Winkel für eine Zwischenverbindung mit größerem Winkel). Somit bildet die Lichtleitfaser **1180** (**1222**, **1198**) vorzugsweise einen Winkel θ mit der Längsachse des Hydrophons **1000** derart, dass das $\cos\theta$ -fache des Durchmessers des Hydrophons (oder der Zwischenverbindung **1296**) kleiner als ungefähr 0,18 ist. Die Zwischenverbindungen **1296** können in vorteilhafter Weise 25,4 mm (1,0 Zoll) lang sein, was drei vollständigen Umdrehungen der Lichtleitfaser **1180** (**1222**) entspricht.

[0225] Die Zwischenverbindungen können dadurch konstruiert werden, dass zwei Endkappen (beispielsweise **1266a**, **1264b**) genommen werden und diese so ausgerichtet werden, dass sie in entgegengesetzter Richtung aufeinander gerichtet sind, wie dies in den [Fig. 19](#) und [Fig. 23](#) gezeigt ist. Kurze (nicht gezeigte) Segmente eines Drahtes, wie zum Beispiel Kupfer-Drähte können dann in jede der Bohrungen **1184**, **1230** der Endkappe **1266a** und die Bohrungen **1188**, **1226** der Endkappe **1264b** eingesetzt werden. Während sich die Draht-Segmente an ihrem Platz befinden, kann eine (nicht gezeigte) Form zum Abformen von Polyurethan um das Paar von entgegengesetzt gerichteten Endkappen **1266a**, **1264b** herum verwendet werden, wobei während dieser Zeit die Draht-Segmente Polyurethan von den Bohrungen **1184**, **1230**, **1188**, **1226** fernhalten. Die Draht-Segmente können dann entfernt werden, und es können die Nuten **1300**, **1304** in das Polyurethan geschnitten werden, so dass die Nuten **1300**, **1304** in richtiger Weise mit ihren jeweiligen Bohrungen in den Endkappen **1266a**, **1264b** ausgerichtet sind.

[0226] Das Telemetrie-Gehäuse **1004** wird vorzugsweise zu Beginn mit zwei (nicht gezeigten) Teilen zusammengebaut, die den zwei Hälften eines Haupt-Körpers entsprechen, die gebildet würden, wenn der Haupt-Körper in Längsrichtung geschnitten wird. Als nächstes werden die Lichtleitfasern **1130**, **1160** geschnitten, durch ihre entsprechenden Paare von Bohrungen (**1128**, **1134** beziehungsweise **1164**, **1172**) in der Endkappe **1264a** hindurch geführt und mit den Kopplern **1150**, **1154** verspleißt. Die Koppler **1150**, **1154** können dann mit ihren entsprechenden Spleißen sowie den Lichtleitfasern **1130**, **1160** in eine der Hälften eingelegt werden. Die Lichtleitfasern **1180** und **1222** können dann ihrerseits durch die jeweiligen Bohrung **1184**, **1230** in die Zwischenverbindung **1296** geführt werden, im einzelnen durch die Endkappe **1266a** (siehe [Fig. 23](#)). Die Zwischenverbindung **1296** und die Endkappe **1264a** werden dann mit dem Haupt-Körper **1260a** mit einem Epoxid-Material verklebt, und die Lichtleitfasern **1130**, **1168** werden in ihren jeweiligen Bohrungen unter Verwendung von Epoxid-Material verklebt (das Epoxid-Material, das hier verwendet wird, kann ein mit Aluminium gefülltes Hochtemperatur-Epoxid-Material sein, wie zum Beispiel Cotronics **454B**). Die Zwischenverbindung **1296** wird dann in Polyurethan getaucht, um eine dünne Schicht **1308** zu bilden, die die Lichtleitfasern **1130**, **1160** einkapselt, um die Lichtleitfasern in einer festen Position zu halten (das heißt die Lichtleitfasern werden „hart-vergossen“). Das

Telemetrie-Gehäuse **1104** kann dann teilweise unter Verwendung von Epoxid-Material (oder es kann Kleber verwendet werden) vergossen werden, um die Koppler **1150**, **1154** und ihre entsprechenden Spleiße gegen eine Stoßbewegung und Schäden in Betrieb zu schützen. Die zwei Hälften können dann bei Umgebungs-Druck gegeneinander mit Epoxid-Material abgedichtet werden, um das Telemetrie-Gehäuse **1104** zu bilden, das dem hydrostatischen Druck widerstehen kann und die Koppler **1150**, **1154**, die darin angeordnet sind.

[0227] Der Bezugs-Dorn **1110** und die Mess-Dorne **1120**, **1122** werden in vorteilhafter Weise in einer gleichen Weise zusammengebaut, jedoch mit der Ausnahme, dass es nicht erforderlich ist, das Zusammenbau-Verfahren mit Hälften eines Haupt-Körpers zu beginnen. (Im Fall des Bezugs-Dornes **1110** können die Hydrophon-Koppler **1192**, **1218** in den Bezugs-Dorn durch eines seiner Enden hindurch eingesetzt werden, bevor der Bezugs-Dorn mit seinen Endkappen verschlossen wird. Die Mess-Dorne **1120**, **1122** nehmen andererseits keine optischen Komponenten auf). Die Bezugs-Lichtleitfaser **1196** und die Mess-Lichtleitfaser **1198** werden um den Bezugs-Dorn beziehungsweise den Mess-Dorn gewickelt. Der Bezugs-Dorn **1110** und die Mess-Dorne **1120**, **1122** werden in gleicher Weise bei Umgebungs-Druck abgedichtet, und sie können sehr hohen hydrostatischen Drücken widerstehen. In dem Fall des Bezugs-Dorns **1110** kann die Abdeckung **1270** über dem Bezugs-Dorn **1110** angeordnet werden, um als Druck-Puffer zu wirken, wie dies weiter oben erläutert wurde.

[0228] Sobald der Zusammenbau der Sensoren **1002** (siehe [Fig. 16](#) und [Fig. 19](#)) geschlossen ist, werden die Zwischenverbindungen **1296** des Sensors **1002** vorteilhafter Weise von den Feder-Elementen **1080** (siehe [Fig. 18](#)) für einen zusätzlichen Schutz gegen die Kräfte und Beanspruchungen umgeben, die während des Einsatzes und des Betriebs des Hydrophons **1000** auftreten können. Nach dem Zusammenbau der Flansche **1040** und ihrer zugehörigen Zugentlastungs-Drähte **1050** um den Sensor **1002** herum kann ein Material wie zum Beispiel Polyurethan (beispielsweise das PRC **1547** von Courtaulds Aerospace, das oben erläutert wurde) um den Sensor **1002**, die Feder-Elemente **1080**, die Feder **1060**, die Flansche **1040** und die Zugentlastungs-Drähte **1050** herum abgeformt werden, um das Füll-Element **1012** zu bilden, so dass das Hydrophon **1000** gut gegen die rauen chemischen und mechanischen Bedingungen abgeschirmt ist, die mit Bohrloch-Anwendungen verbunden sind. Als Ergebnis dieses Abform-Vorganges sind die Zwischenverbindungen **1296** gut mit Polyurethan umgeben, weil Polyurethan auch in vorteilhafter Weise zur Konstruktion der Zwischenverbindungen verwendet wird, wie dies vorstehend erläutert wurde. Auf diese Weise sind die Lichtleitfasern **1180**, **1230**, **1196**, **1198** in flexible Zwischenverbindungen **1296** eingebettet, die die erforderliche Steigung und Spannung haben, um die Biegungen zu überleben, die während der Installation und der Handhabung des Kabels **1004** auftreten.

[0229] Die hier beschriebenen Abform-Verfahren (in Verbindung mit beispielsweise der Zwischenverbindung **1296** oder des Hydrophons **1000**) können dadurch ausgeführt werden, dass eine Form um das einzubettende Objekt herum angeordnet wird und dann ein Vakuum an diesem Objekt angesaugt wird. Das Objekt kann auf 60°C (140°F) über 10 bis 15 Minuten aufgeheizt werden, bevor Polyurethan um dieses herum injiziert wird. Nach dem Injizieren von Polyurethan um das Objekt herum kann das Vakuum für 15-20 Minuten aufrecht erhalten werden, um das Polyurethan zu entgasen. Das Polyurethan kann dann über 14 Stunden bei 0,28-0,48 MPa (40-70 psi) und 60°C (140°F) gehärtet werden, bevor die Form entfernt wird.

[0230] Die Verwendung von Polyurethan in den verschiedenen hier beschriebenen Komponenten (beispielsweise das Füll-Element **1012** und die Zwischenverbindung **1296**) begrenzt die Verwendung des Hydrophons **1000** auf Temperaturen bis zu 150°C. Teflon oder Viton können jedoch anstelle des Polyurethans eingesetzt werden, und diese Materialien können bis zu 220°C verwendet werden. Die optischen Koppler und die Klebmittel, die hier beschrieben wurden, können bis zu Temperaturen von 200°C oder sogar 220°C arbeiten.

System-Betriebsverhalten

[0231] Das akustische Mess-System **100** der vorliegenden Erfindung kann viele akustische Sensoren S1-S192 einschließen. Die hier beschriebenen Ausführungsformen schließen 96 bzw. 192 Sensoren S1-S192 sowie 96 bzw. 192 Kanäle in der Verarbeitungs-Elektronik **304** zum Verarbeiten der Ausgangs-Signale der 96 oder 192 Sensoren ein. Das Vorhandensein einer großen Anzahl von Sensoren S1-S192 bietet eine erhebliche Verbesserung gegenüber bekannten Systemen. Beispielsweise vergrößert das Vorhandensein einer großen Anzahl von Sensoren S1-S192 die mögliche Auflösung von Messungen, wie zum Beispiel einer Quer-Bohrloch-Tomographie und verringert weiterhin dramatisch die Zeit, die erforderlich ist, um eine geologische Erkundung abzuschließen.

[0232] Das akustische Mess-System **100** der vorliegenden Erfindung bietet andere Vorteile gegenüber dem Stand der Technik. Die Tabelle V liefert eine Zusammenfassung des Betriebsverhaltens und der Spezifikationen des vorstehend beschriebenen akustischen Mess-Systems **100**, das 96 faseroptische Sensoren S1-S96

umfasst. Die akustische Mess-Anordnung **602** der vorliegenden Erfindung ist jedoch nicht auf 96 oder 192 Sensoren S1-S192 beschränkt, sondern kann bis zu 400 Sensoren einschließen.

[0233] Wie es weiter oben erläutert wurde, ist die akustische Anordnung **602b** klein genug, um in ein Produktions-Rohr zu passen. Das in [Fig. 2](#) gezeigte Kabel **202** kann in ein Produktions-Rohr mit einem Innendurchmesser von 2 Zoll und sogar in Produktions-Rohre mit einem Innendurchmesser von 32 mm (1,25 Zoll) eingesetzt werden. Das Kabel **202** in der vorstehend beschriebenen Ausführungsform mit 96 Sensoren hat einen Außendurchmesser von 1,22 Zoll und schließt eine Armierung ein. Somit kann die akustische Anordnung **602** in das Produktions-Rohr in der Auskleidung eines Bohrloches **118** eingesetzt werden, anstatt das es die Entfernung des Produktions-Rohres zum Einsetzen des Kabels in die Auskleidung erfordert.

[0234] Das akustische Mess-System **100** der vorliegenden Erfindung ist robust genug, um in der rauen Bohrloch-Umgebung zu arbeiten. Das Kabel **202** kann in ein Bohrloch **118** bis zu einer Tiefe von über 300 Metern (10.000 Fuß) eingesetzt werden, wo die Temperatur 150°C liegt, und der Druck 38 MPa (5.500 psi) liegt.

[0235] Das akustische Mess-System **100** der vorliegenden Erfindung hat eine ausreichende Bandbreite, um eine Echtzeit-Messung der akustischen Welle durchzuführen, unter Einschluss der Verarbeitung des Ausgangs-Signals der akustischen Sensoren S1-S192 und der Ausgabe der Daten in einem konventionellen seismischen Format. Weil die akustischen Sensoren optische Sensoren sind, beschränken sie die Bandbreite des Systems nicht. Vielmehr ist die Bandbreite durch die Bandbreite der Verarbeitungs-Elektronik **304** beschränkt. Die Verarbeitungs-Elektronik **304** ist jedoch schnell genug, um die durch eine akustische Quelle **130** erzeugte akustische Schwingung zu messen und eine Betrachtung der Ergebnisse kurz danach zu ermöglichen. Entsprechend kann, wenn die Daten in Echtzeit zu erfassen, zu verarbeiten und auszugeben sind, und dies in einem Format, die ein Geodät lesen kann, der Geodät die Erkundung auf der Grundlage der erzeugten Ergebnisse modifizieren. Wenn beispielsweise die Daten das mögliche Vorhandensein von Reserven an Ort und Stelle anzuzeigen zu scheinen, so könnte die akustische Quelle **130** und/oder die akustische Sensor-Anordnung **602** für eine weitere Untersuchung neu angeordnet werden.

[0236] Im Gegensatz hierzu verhindern Beschränkungen hinsichtlich der Geschwindigkeit und Bandbreite konventioneller akustischer Sensor-Anordnungen darin das Erreichen einer Echtzeit-Verarbeitung. Vielmehr werden, wenn Messungen durchgeführt werden, die Daten auf Magnetband aufgezeichnet und zu einem von dem Bohrloch **118** oder dem Bohr-Standort entfernten Ort zur Verarbeitung transportiert.

[0237] Zusätzlich dazu, das es schnell ist, hat das Sensor-System **100** der vorliegenden Erfindung ein niedriges akustisches Grund-Rauschen. Insbesondere ist das integrierte akustische Effektiv-Wert-Rauschen über die Detektions-Bandbreite 0,1 Mikrobar effektiv.

[0238] Das akustische Sensor-System **100** der vorliegenden Erfindung hat weiterhin einen weiten dynamischen Bereich. Große Spannungs-Ausgänge für kleine akustische Signale ermöglichen es, dass das System eine kleine Amplitude aufweisende akustische Wellen **102** misst und aufzeichnet. Gleichzeitig ist das System in der Lage eine große Amplitude aufweisende akustische Wellen **102** zu messen und aufzuzeichnen. Im einzelnen hat die vorstehend beschriebene Ausführungsform mit 96 Sensoren S1-S96 einen momentanen dynamischen Bereich von 132 Dezibel (dB) für das akustische Band, das von 1 Hz bis 400 Hz reicht, und einen momentanen dynamischen Bereich von 120 dB für das akustische Band, das von 401 Hz bis 1000 Hz reicht.

Tabelle V

Betriebsleistungs-Charakteristiken	Fähigkeiten	
Anzahl von akustischen Kanälen	96	Erweiterbar auf 192
Zuführungskabel-Länge	3000 m (10.000 Fuß)	
Anordnungs-Kabel-Länge	1.500 m (500 Fuß)	
Anordnungs-Kabel-Durchmesser	31 mm (1,22 Zoll)	Schließt Armierung ein
Betriebsdruck	Oberhalb von 38 MPa (5.500 psi)	
Betriebs-Temperatur	Oberhalb von 150°C	
Grundrauschen	0,1 mbar effektiv	
Momentaner dynamischer Bereich	132 dB	Minimum von 1 Hz bis 400 Hz
	120 dB	Minimum von 401 Hz bis 1.000 Hz
Verzerrung	-80 dB	
Übersprechen	-85 dB	
Akustischer Durchlass-Bereich	1 Hz bis 1.440 Hz	
Welligkeit	+/-0,2 dB	
Kanal-zu-Kanal	+/-0,34 dB	
Ausgangs-Daten-Abtastrate	4 kHz, 2kHz, 1 kHz und 500 kHz	Auswählbar
Ausgangs-Daten-Format	SEG-D Rev. 2	
Ausgangs-Daten-Auflösung	24 Bit	Festkomma
Hilfs-Kanäle	16	
Eingangs-Signal-Amplitude	10 VDC (0 bis Spitze)	
Maximale Eingangs-Frequenz	1,5 kHz	
Betriebsleistungs-Charakteristiken	Fähigkeiten	
Abtast-Rate	4 kHz	
Auflösung	16 Bits	
Externe Synchronisation	10 Millisekunden	Bidirektionale TTL oder Schließen von Schaltern
Elektronisches Gehäuse	48" x 19" x 17"; weniger als 250 lb	Wechselspannungs-Versorgung
GPS-Fähigkeit	Enthalten	1575 MHz-Antenne
Gamma-Werkzeug	Enthalten	

[0239] Das akustische Sensor-System **100** verringert ein Übersprechen zwischen Signalen einer unterschiedlichen Wellenlänge auf ein Minimum. Das Übersprechen des Systems mit 96 Sensoren S1-S96 liegt bei -85 dB.

[0240] Das akustische Sensor-System **100** macht weiterhin Verzerrungen zu einem Minimum. Die Verzerrung des Systems mit 96 Sensoren S1-S96 beträgt -80 dB.

[0241] Das akustische Sensor-System **100** hat einen akustischen Band-Pass zwischen 1 Hz und 1.440 Hz. Entsprechend werden Frequenz-Komponenten zwischen 1 Hz und 1440 Hz der akustischen Welle durch das System **100** gemessen.

[0242] Das akustische Sensor-System **100** gibt Daten in dem SED-D REV.2-Format ab, einem konventionellen Format, das den Normen entspricht, die von der Society of Exploration Geophysicists festgelegt wurden

und die in der Technik gut bekannt sind. Das akustische Sensor-System **100** kann weiterhin Daten mit einer Abtast-Rate von 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz und 4 kHz nach Auswahl des Benutzers ausgeben. Die Auflösung der Ausgangs-Daten beträgt 24 Bit.

[0243] Wie dies vorstehend beschrieben wurde, kann das System **100** Hilfs-Kanäle aufnehmen. Die vorstehend beschriebene Ausführungsform mit 96 Sensoren S1-S96 kann sechzehn unsymmetrische Hilfs-Kanäle oder acht Differenz-Hilfs-Kanäle annehmen. Diese Hilfs-Kanäle haben eine minimale Eingangs-Frequenz von 1,5 kHz. Diese Kanäle werden mit einer Rate von 4 kHz und einer Auflösung von 16 Bits abgetastet.

[0244] Das System **100** empfängt weiterhin einen externen Synchronisations-Impuls. Die vorstehend beschriebene Ausführungsform mit 96 Sensoren S1-S96 akzeptiert einen externen Synchronisations-Impuls mit einer Länge von 10 Millisekunden. Dieser Synchronisations-Impuls kann unter Verwendung von bidirektionalen TTL-Pegeln (das heißt mit aktiven zur Spannungsversorgung bzw. zur Erde gerichteten Widerständen) oder ein Schalter-Schließen (das heißt ein aktives Herunterziehen mit einem Widerstands-Aufwärts-Ziehen) erzeugt werden.

[0245] Wie dies vorstehend beschrieben wurde, umfasst das akustische Mess-System **100** vorzugsweise ein GPS-System **628**. Das akustische Mess-System **100** kann zusätzlich ein Gamma-Werkzeug umfassen. Gamma-Werkzeuge, die in der Technik bekannt sind, werden zur Messung der Tiefe des Kabels durch Zählen von Markern auf der Auskleidung verwendet, wie dies weiter oben erläutert wurde.

[0246] Ein zusätzlicher Vorteil, der sich bei dem akustischen Mess-System **100** der vorliegenden Erfindung ergibt, besteht darin, dass dieses System wesentlich weniger gegenüber Rohrwellen empfindlich ist, als konventionelle Systeme. Eine Rohrwellen entspricht, wie dies in der Technik gut bekannt ist, akustischen Wellen, die ein Bohrloch **124** herauf und herunter wandern, entweder durch die metallische Auskleidung oder durch Wasser in dem Bohrloch. Während der Daten-Erfassung wird das akustische Mess-System **100** der vorliegenden Erfindung in vorteilhafter Weise weniger durch Rohrwellen beeinflusst als konventionelle akustische Mess-Systeme.

[0247] Obwohl das akustische Mess-System **100** der vorliegenden Erfindung in der Bohrloch-Umgebung für den Zweck von geophysikalischen Erkundungen, die zur Lokalisierung von Öl-Reserven bestimmt sind, erläutert wurde, ist seine Verwendung nicht hierauf beschränkt. Diese akustische Mess-System **100** der vorliegenden Erfindung kann auch auf andere Weise verwendet werden, um akustische Schwingungen an einer Serie von entfernt angeordneten Stellen zu messen.

[0248] Die vorstehend beschriebenen Ausführungsformen sollen alle in jeder Hinsicht lediglich als erläuternd und nicht beschränkend betrachtet werden. Der Schutzzumfang der Erfindung ist daher in den folgenden Ansprüchen angegeben, und nicht in der vorstehenden Beschreibung.

Patentansprüche

1. System (**100**) zur Messung unterirdischer akustischer Wellen, die von einer akustischen Quelle (**130**) emittiert werden, wobei das System (**100**) Folgendes umfasst:
ein Kabel (**202, 1004**);
zumindest eine optische Quelle, die Licht emittiert;
eine Vielzahl von optischen Sensoren (**1002**), die das Licht empfangen und das Licht in Abhängigkeit von den akustischen Wellen (**102**) ändern;
zumindest einen optischer Detektor, der das geänderte Licht empfängt und ein elektrisches Signal als Ausgangssignal liefert; und
eine Elektronik (**601**), die das elektrische Signal verarbeitet und das Signal in ein seismisches akustisches Datenformat umwandelt,
und wobei jeder Sensor (**1002**) ein Interferometer ist,
dadurch gekennzeichnet, dass die Vielzahl von optischen Sensoren (**1002**) von dem Kabel (**202, 1004**) umgeben ist, und dass jeder Sensor (**1002**) einen Telemetrie-Behälter (**1104**), einen Bezugs-Dorn (**1110**) und zumindest einen Mess-Dorn (**1120, 1122**) einschließt, die alle Ende zu Ende koaxial angeordnet sind, um das Profil des Kabels (**202, 1004**) zu verringern, wobei der Telemetrie-Behälter (**1104**) einen Ausgangs-Telemetrie-Koppler (**1154**) und einen Eingangs-Telemetrie-Koppler (**1150**) aufnimmt.

2. System (**100**) nach Anspruch 1, bei dem die optische Quelle eine Laser-Quelle umfasst.

3. System (**100**) nach Anspruch 1, bei dem die zumindest eine optische Quelle eine Vielzahl von Laser-Quellen umfasst.
4. System (**100**) nach Anspruch 1, das zumindest eine Lichtleitfaser-Verteilungsleitung (**1130**) umfasst, die optisch mit der optischen Quelle und dem Sensor (**1002**) verbunden ist, um das von der optischen Quelle emittierte Licht auf die Sensoren (**1002**) zu verteilen.
5. System (**100**) nach Anspruch 1, das weiterhin zumindest eine Lichtleitfaser-Rückführungsleitung (**1160**) umfasst, die optisch mit der optischen Quelle und mit dem Sensor (**1002**) verbunden ist, um das von den Sensoren (**1002**) emittierte geänderte Licht an den zumindest einen optischen Detektor zu lenken.
6. System (**100**) nach Anspruch 1, das weiterhin einen Modulator umfasst, der zum Empfang und zur Modulation des von der zumindest einen optischen Quelle emittierten Lichtes mit zumindest einer Modulationsfrequenz ausgebildet ist.
7. System (**100**) nach Anspruch 6, bei dem die Elektronik (**601**) einen Demultiplexer (**604**) umfasst, der zum Empfang und zur Demultiplexierung des elektrischen Signals ausgebildet ist.
8. System (**100**) nach Anspruch 7, bei dem der Multiplexer (**604**) einen Mischer umfasst, der zum Empfang und zum Mischen des elektronischen Signals mit periodischen Schwingungsformen ausgebildet ist, die Frequenzen aufweisen, die den Modulationsfrequenzen und dem Zweifachen der Modulationsfrequenzen entsprechen, um das Signal zu demodulieren.
9. System (**100**) nach Anspruch 4, bei dem die Sensoren (**1002**) und die Lichtleitfaser-Verteilungsleitungen (**1130**, **1160**) in dem Kabel (**202**, **1004**) enthalten sind.
10. System (**100**) nach Anspruch 9, bei dem das Kabel (**202**, **1004**) einen Durchmesser von weniger als 51 mm (2 Zoll) hat.
11. System (**100**) nach Anspruch 9, bei dem das Kabel (**202**, **1004**) einen Durchmesser von weniger als 32 mm (1,25 Zoll) hat.
12. System (**100**) nach Anspruch 9, bei dem das Kabel (**202**, **1004**) ein Herabführungs-Kabel (**106**) aufweist, das keine Sensoren aufweist, jedoch die Verteilungs-(**1130**) und Rückführungs-(**1160**) Verteilungs-Lichtleitfaser-Leitungen enthält.
13. System (**100**) nach Anspruch 12, bei dem das Herabführungs-Kabel (**106**) zumindest 305 m (1000 Fuß) lang ist.
14. System (**100**) nach Anspruch 12, bei dem das Herabführungs-Kabel (**106**) zumindest 3050 m (10.000 Fuß) lang ist.
15. System (**100**) nach Anspruch 12, bei dem das Herabführungs-Kabel (**106**) zumindest 6100 m (20000 Fuß) lang ist.
16. System (**100**) nach Anspruch 4 oder 9, bei dem die Sensoren (**1002**) in einem akustischen Anordnungs-Kabel (**104**) enthalten sind.
17. System (**100**) nach Anspruch 16, bei dem das akustische Anordnungs-Kabel (**104**) seinen Durchmesser nicht um mehr als $\pm 0,25$ mm ($\pm 0,01$ Zoll) ändert.
18. System (**100**) nach Anspruch 16, bei dem die Sensoren (**1002**) mit angenähert gleichförmigem Abstand über das akustische Anordnungs-Kabel (**104**) verteilt sind.
19. System (**100**) nach Anspruch 18, bei dem die Sensoren (**1002**) einen gegenseitigen Abstand von ungefähr 1,52 m (5 Fuß) innerhalb des akustischen Anordnungs-Kabels (**104**) aufweisen.
20. System (**100**) nach Anspruch 18, bei dem die Sensoren (**1002**) gleichförmig in einem Abstand zwischen 1,52 m (5 Fuß) und 30,5 m (100 Fuß) in dem akustischen Anordnungs-Kabel (**104**) angeordnet sind.

21. System (100) nach Anspruch 19 oder Anspruch 20, bei dem das akustische Anordnungs-Kabel (104) eine Länge von zumindest 145 m (475 Fuß) aufweist.
22. System (100) nach Anspruch 19 oder 20, bei dem das akustische Anordnungs-Kabel (104) eine Länge von zumindest 290 m (950 Fuß) aufweist.
23. System (100) nach Anspruch 19 oder 20, bei dem das akustische Anordnungs-Kabel (104) eine Länge von zumindest 2900 m (9500 Fuß) aufweist.
24. System (100) nach Anspruch 20, bei dem das akustische Anordnungs-Kabel (104) eine Länge von zumindest 5800 m (19000 Fuß) aufweist.
25. System (100) nach Anspruch 1, bei dem das Kabel (202, 1004) einen gleichförmigen Außendurchmesser aufweist, der so bemessen ist, dass das Kabel (202, 1004) eine Öffnung eines Ölbohrungs-Rohres, einer Auskleidung oder eines Produktions-Rohres füllt, um auf diese Weise den Druck in dem Rohr, Gehäuse oder Produktions-Rohr aufrecht zu erhalten.
26. System (100) nach Anspruch 1, bei dem der optische Sensor (1002) ein Hydrophon (1000), ein Geophon, ein kombiniertes Hydrophon/Geophon, einen Lichtleitfaser-Sensor, ein Interferometer (5102), ein Mach-Zehnder-Interferometer oder ein Lichtleitfaser-Interferometer umfasst.
27. System (100) nach Anspruch 1, bei dem die Elektronik (601) eine zentrale Verarbeitungseinheit (CPU) (610) umfasst, die zum Umwandeln des elektrischen Signals in ein SEG-D- oder SEG-Y-Format programmiert ist.
28. Verfahren zur Messung unterirdischer akustischer Wellen (102), die von einer akustischen Quelle (130) emittiert werden, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:
 Erzeugen von zumindest einem optischen Lichtstrahl;
 Lenken des Lichtstrahls auf einen optischen Sensor (1002), der den Lichtstrahl in Abhängigkeit von den akustischen Wellen (102) ändert, wodurch Änderungen in dem Lichtstrahl erzeugt werden, wobei der optische Sensor (1002) ein Interferometer ist;
 Empfangen des geänderten Lichtstrahls und Abgabe eines elektrischen Signals; und
 Verarbeiten des elektrischen Signals und Umwandeln des Signals in Daten in einem seismischen Datenformat; gekennzeichnet durch die folgenden Schritte:
 Umgeben des optischen Sensors (1002) mit einem Kabel (202, 1004), wobei der optische Sensor (1002) einen Telemetrie-Behälter (1104), einen Bezugs-Dorn (1110) und zumindest einen Mess-Dorn (1120, 1122) einschließt, die alle Ende an Ende koaxial ausgerichtet sind, um das Profil des Kabels (202, 1004) zu verringern; wobei das Telemetrie-Gehäuse (1104) einen Ausgangs-Telemetrie-Koppler (1154) und einen Eingangs-Telemetrie-Koppler (1150) aufnimmt;
 Umschließen des optischen Sensors (1002), der den Lichtstrahl ändert, mit Zugentlastungsdrähten (1050) zur Verhinderung mechanischer Schäden an dem optischen Sensor (1002);
 Abformen eines Füllmaterials (1012) um den optischen Sensor (1002) und die Zugentlastungsdrähte (1050) herum, um eine Abschirmung gegenüber rauen chemischen und mechanischen Bedingungen zu schaffen.
29. Verfahren nach Anspruch 28, bei dem eine Vielzahl von optischen Strahlen erzeugt und auf mehr als einen optischen Sensor (1002) gelenkt wird, und ein elektrisches Signal abgegeben und verarbeitet wird, und wobei der Prozess eine Demultiplexierung einschließt.
30. Verfahren nach Anspruch 29, das die Modulation der optischen Lichtstrahlen mit einer Vielzahl von Modulationsfrequenzen umfasst.
31. Verfahren nach Anspruch 30, das weiterhin eine Demodulation des elektrischen Signals durch Mischen des elektrischen Signals mit periodischen Schwingungsformen umfasst, die Frequenzen aufweisen, die den Modulationsfrequenzen entsprechen.
32. Verfahren nach Anspruch 28, bei dem die Umwandlung die Umwandlung der erfassten Änderungen in ein SEG-D- oder SEG-Y-Format umfasst.

Es folgen 37 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

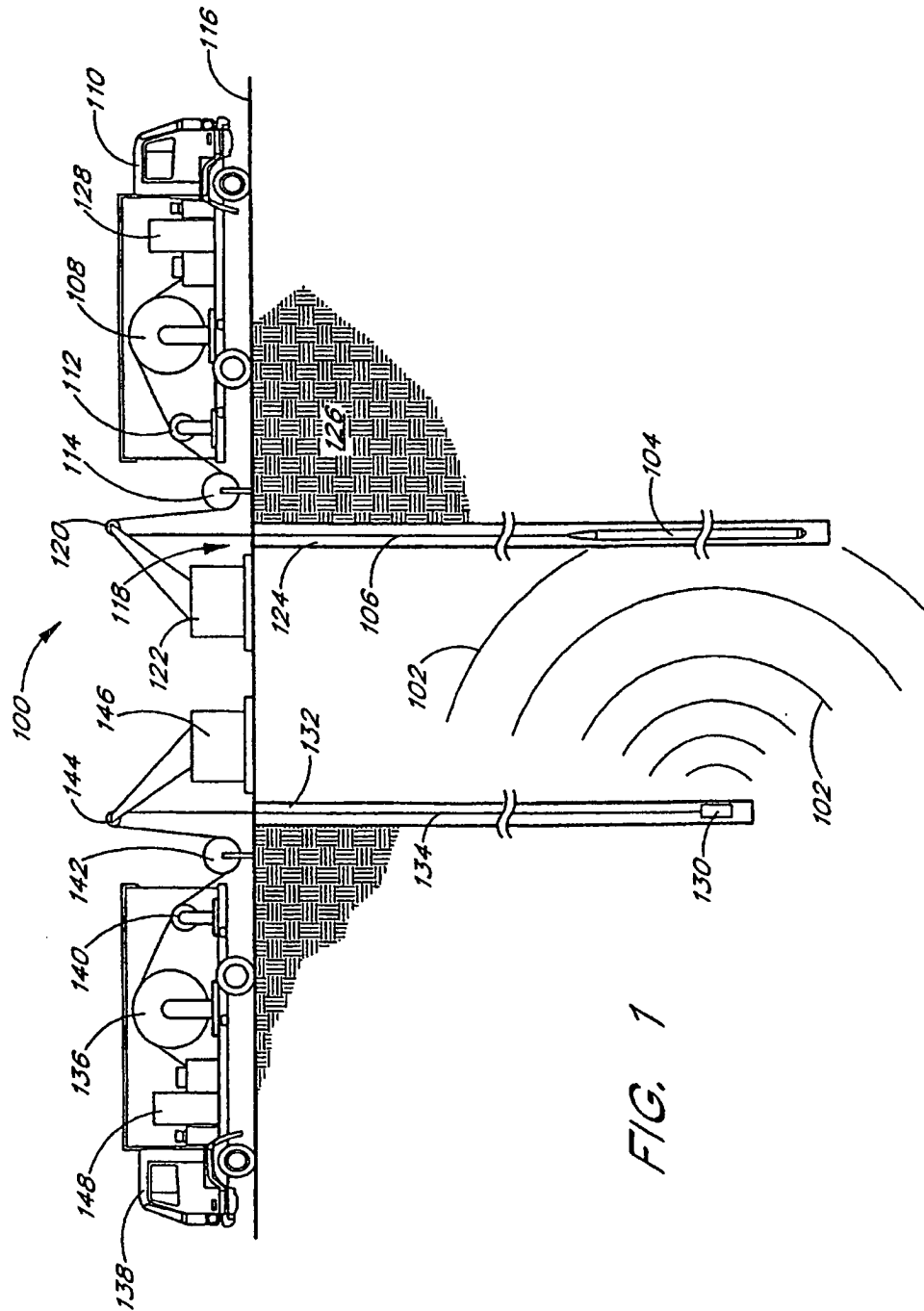


FIG. 1

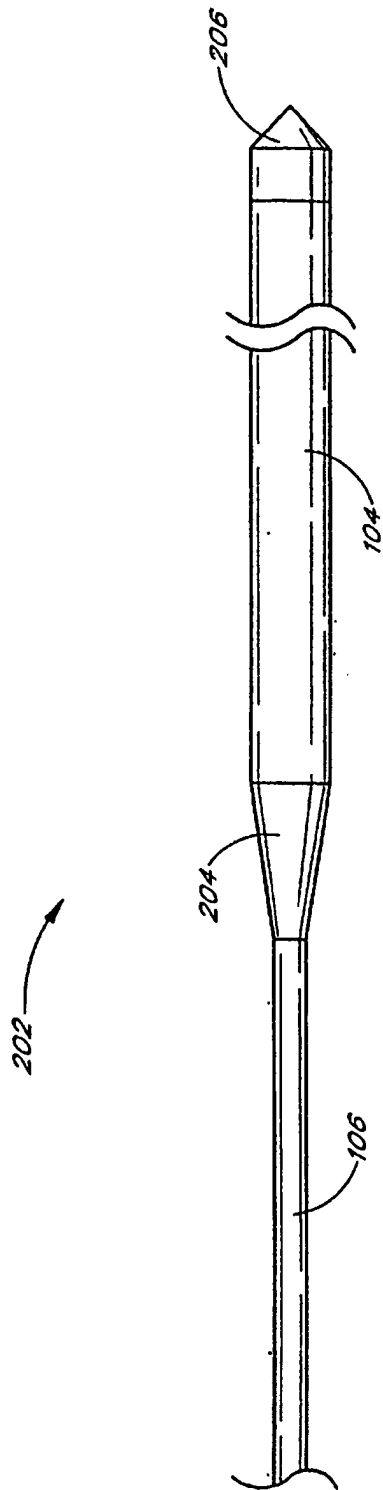


FIG. 2

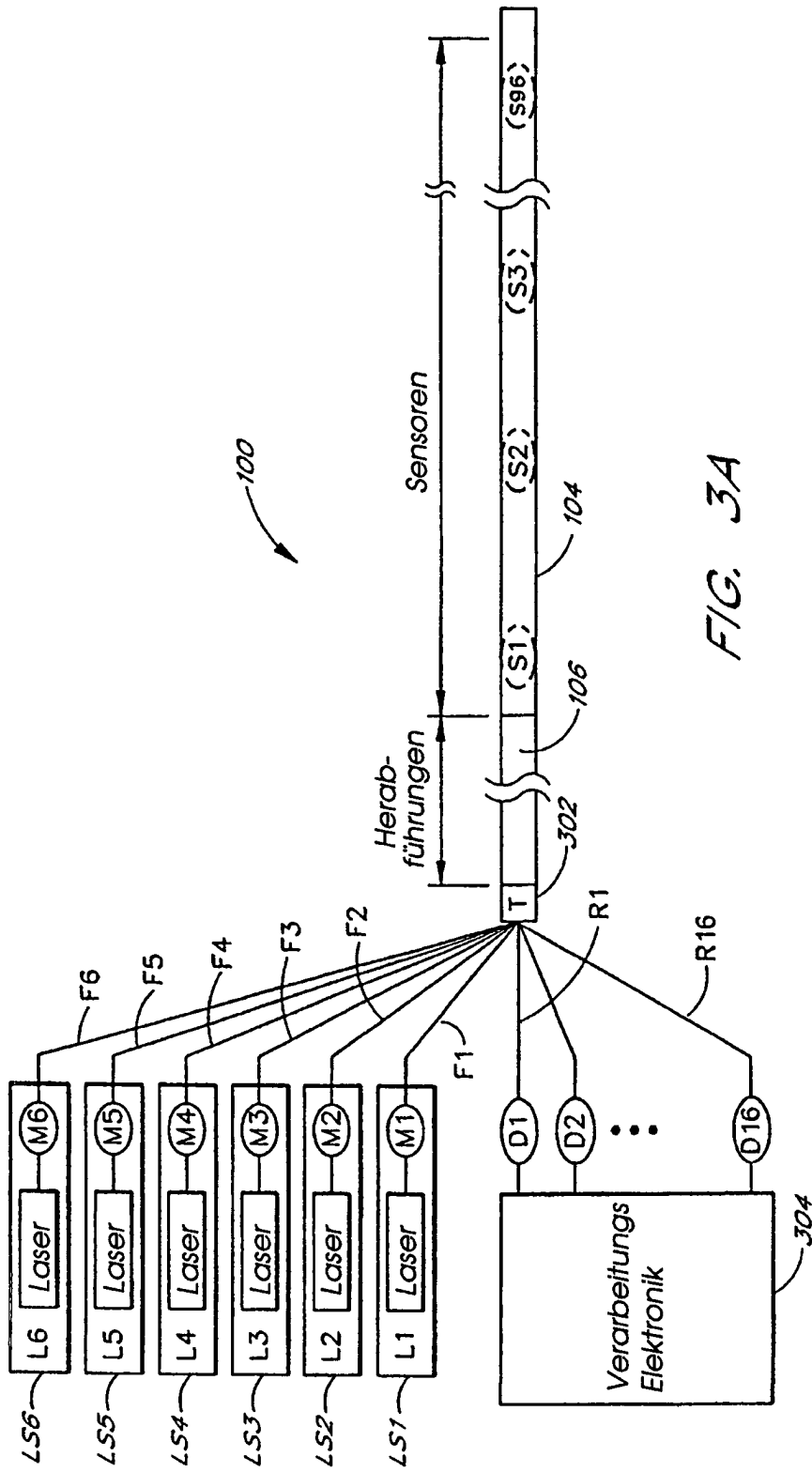


FIG. 3A

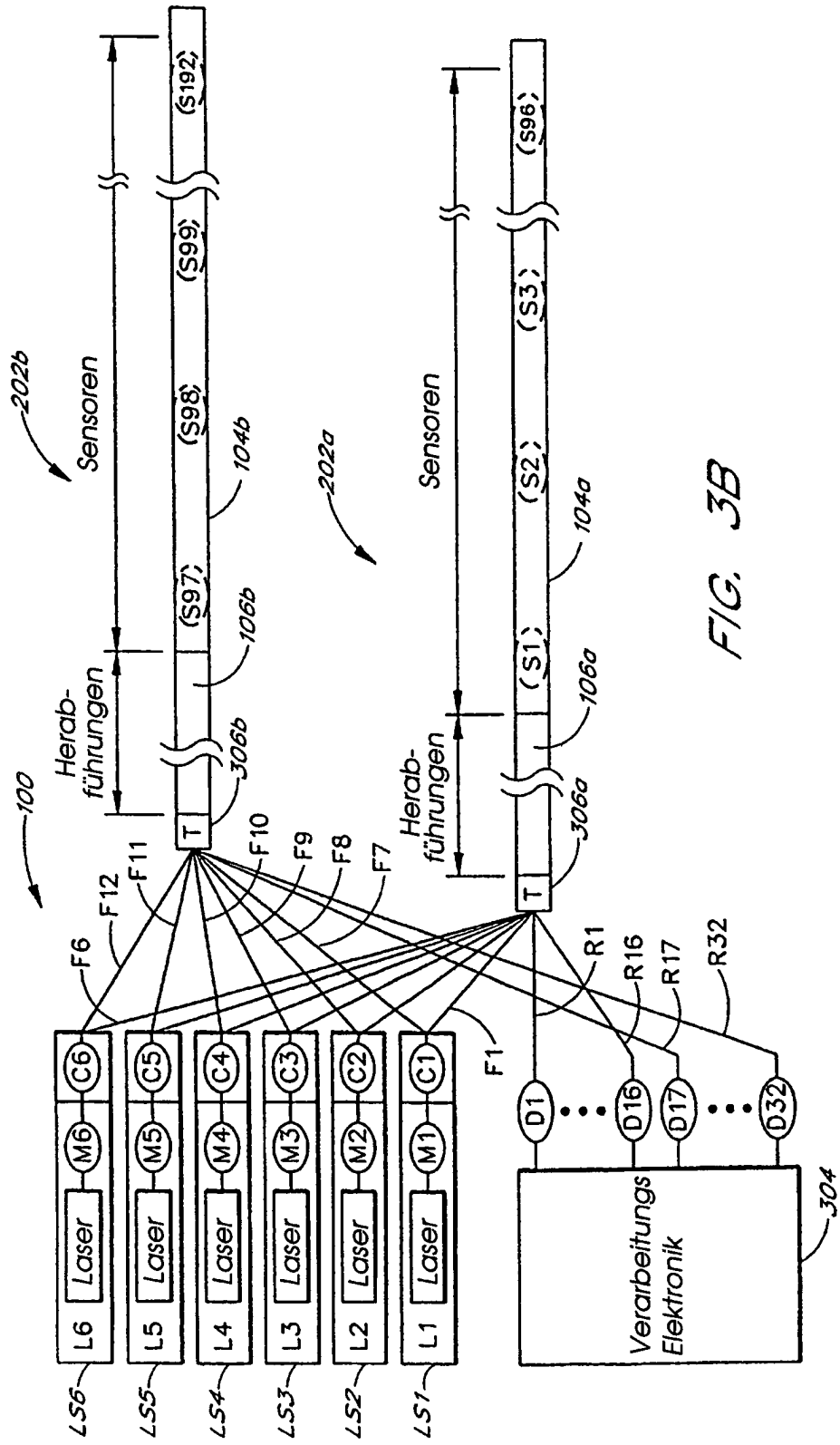


FIG. 3B

<i>FIG. 4A</i>	<i>FIG. 4B</i>	<i>FIG. 4C</i>	<i>FIG. 4D</i>	<i>FIG. 4E</i>	<i>FIG. 4F</i>	<i>FIG. 4G</i>	<i>FIG. 4H</i>
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

FIG. 4

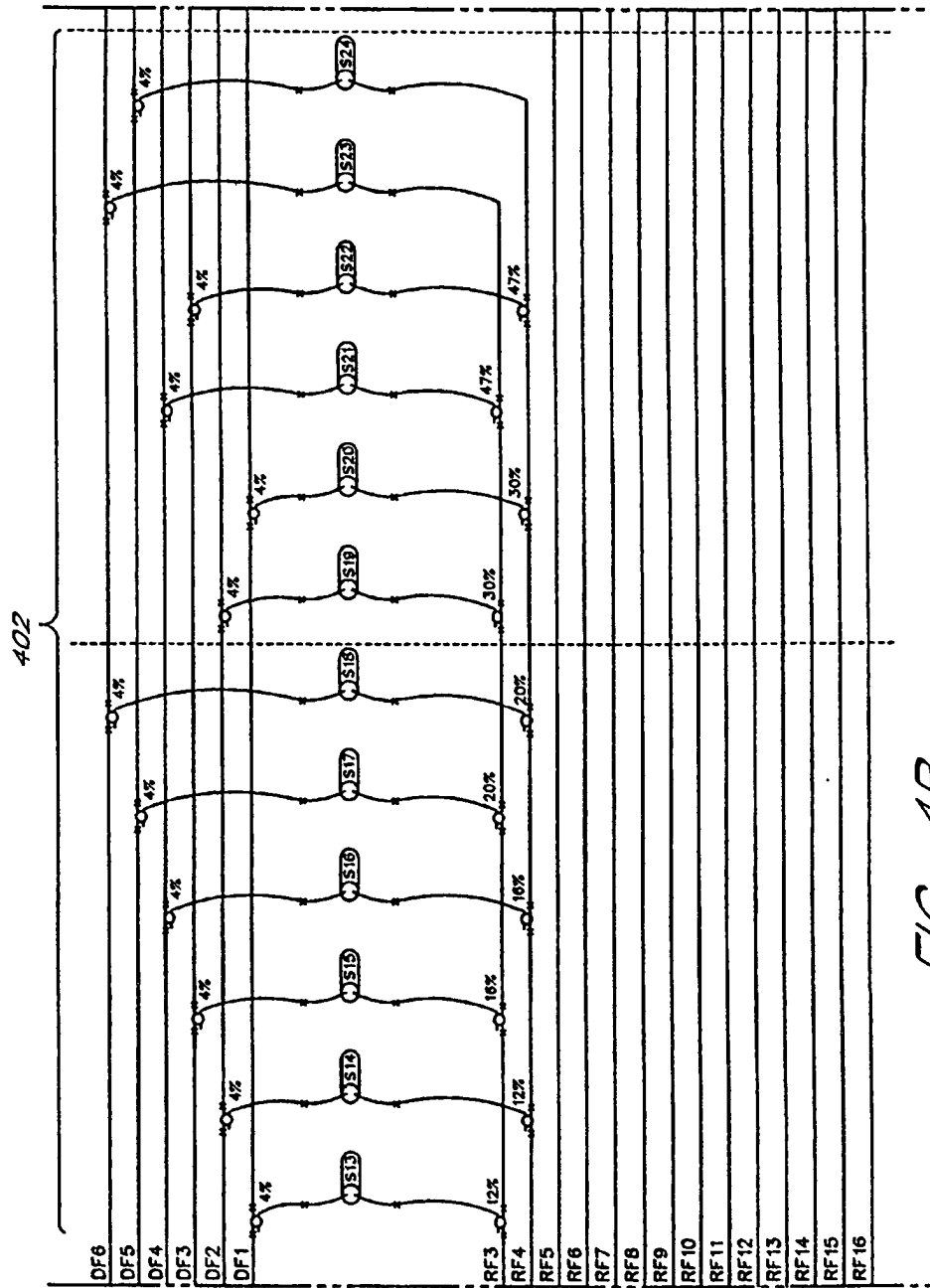


FIG. 4B

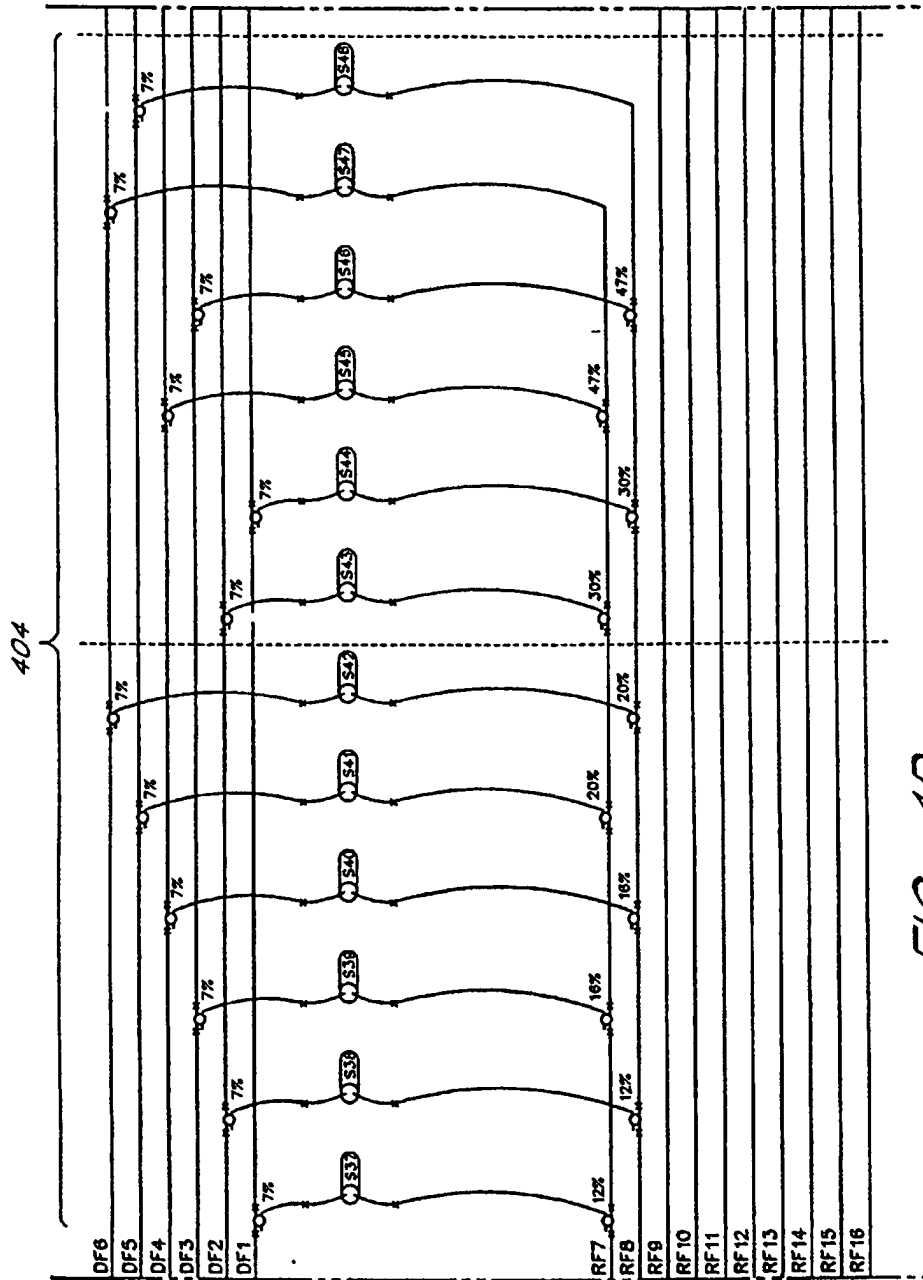


FIG. 4D

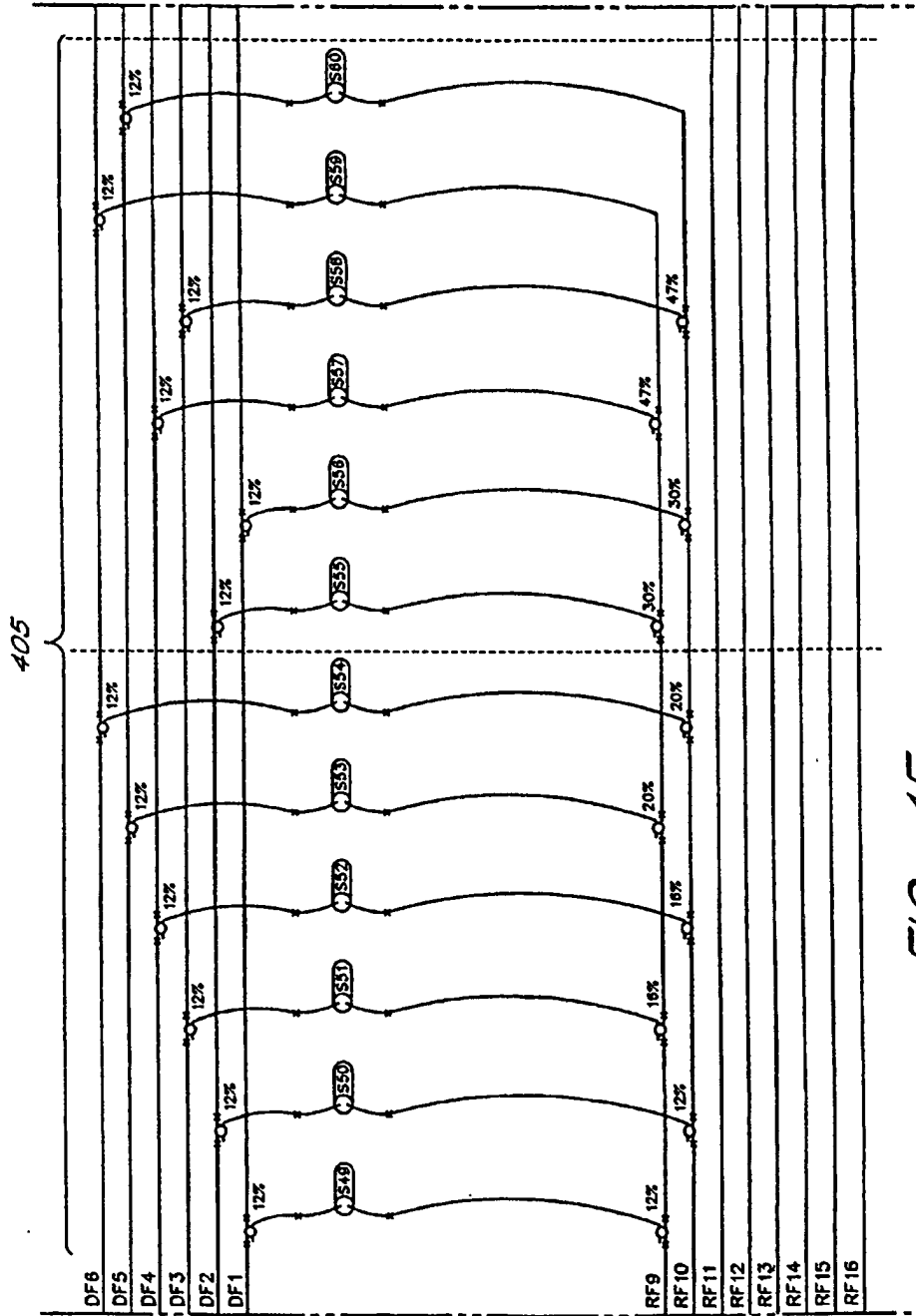


FIG. 4E

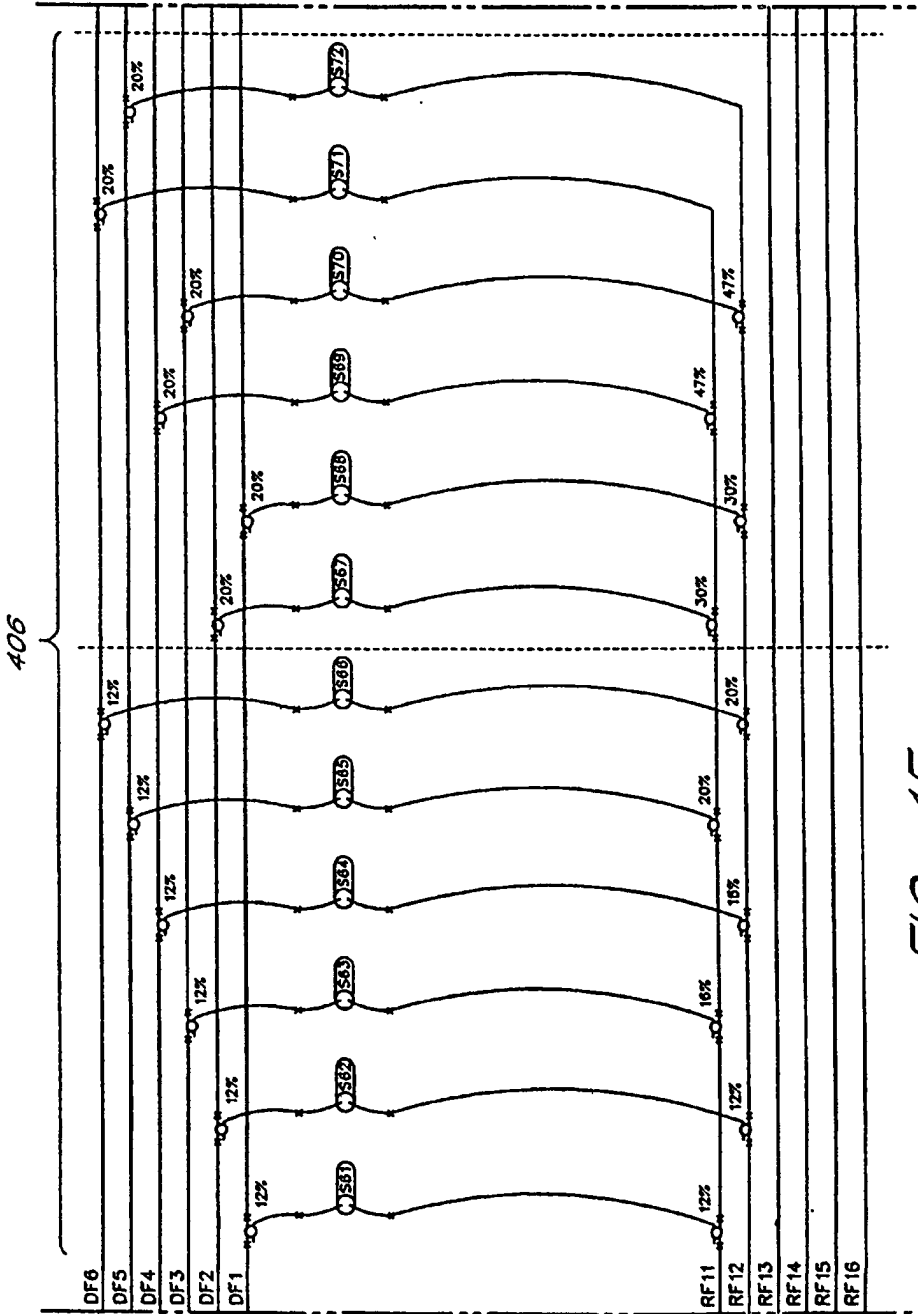


FIG. 4F

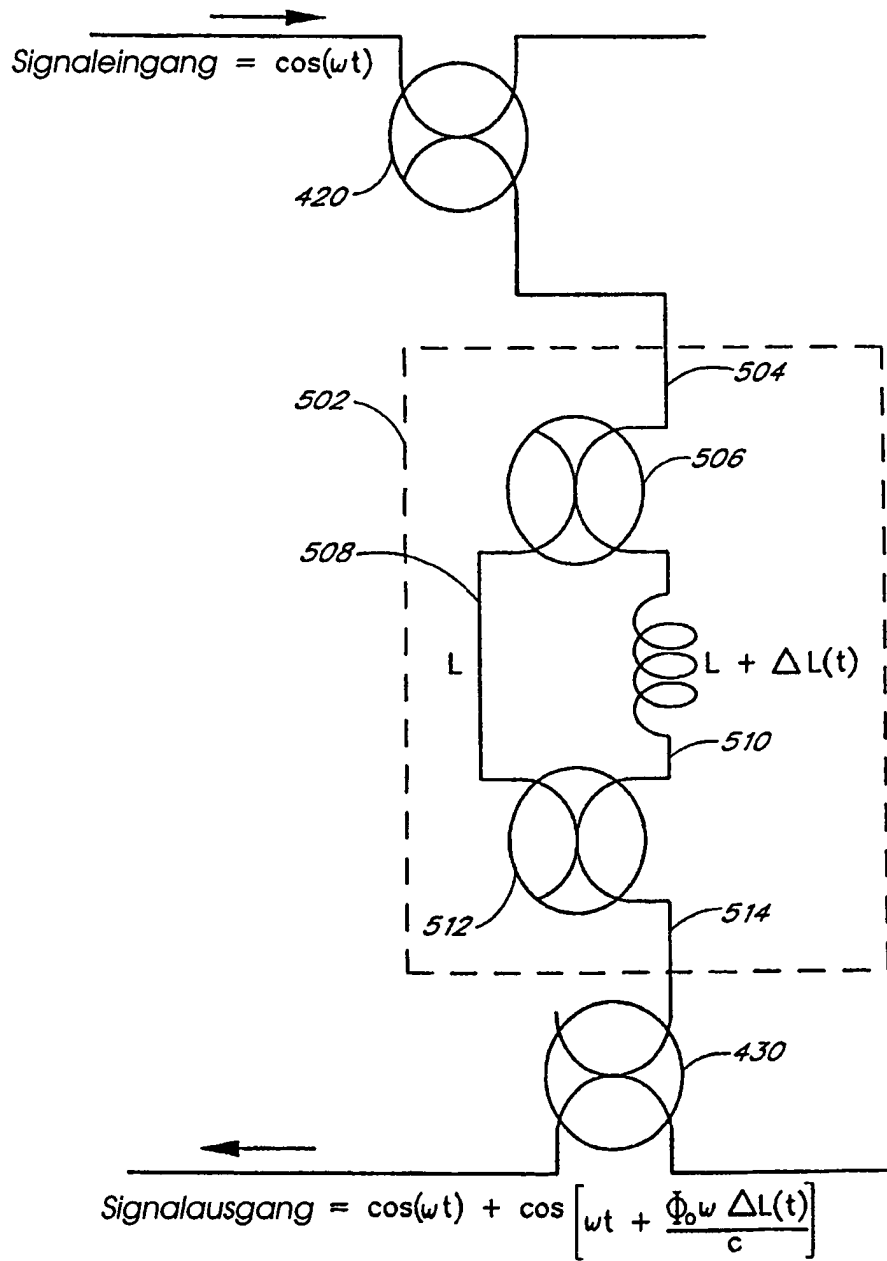


FIG. 5

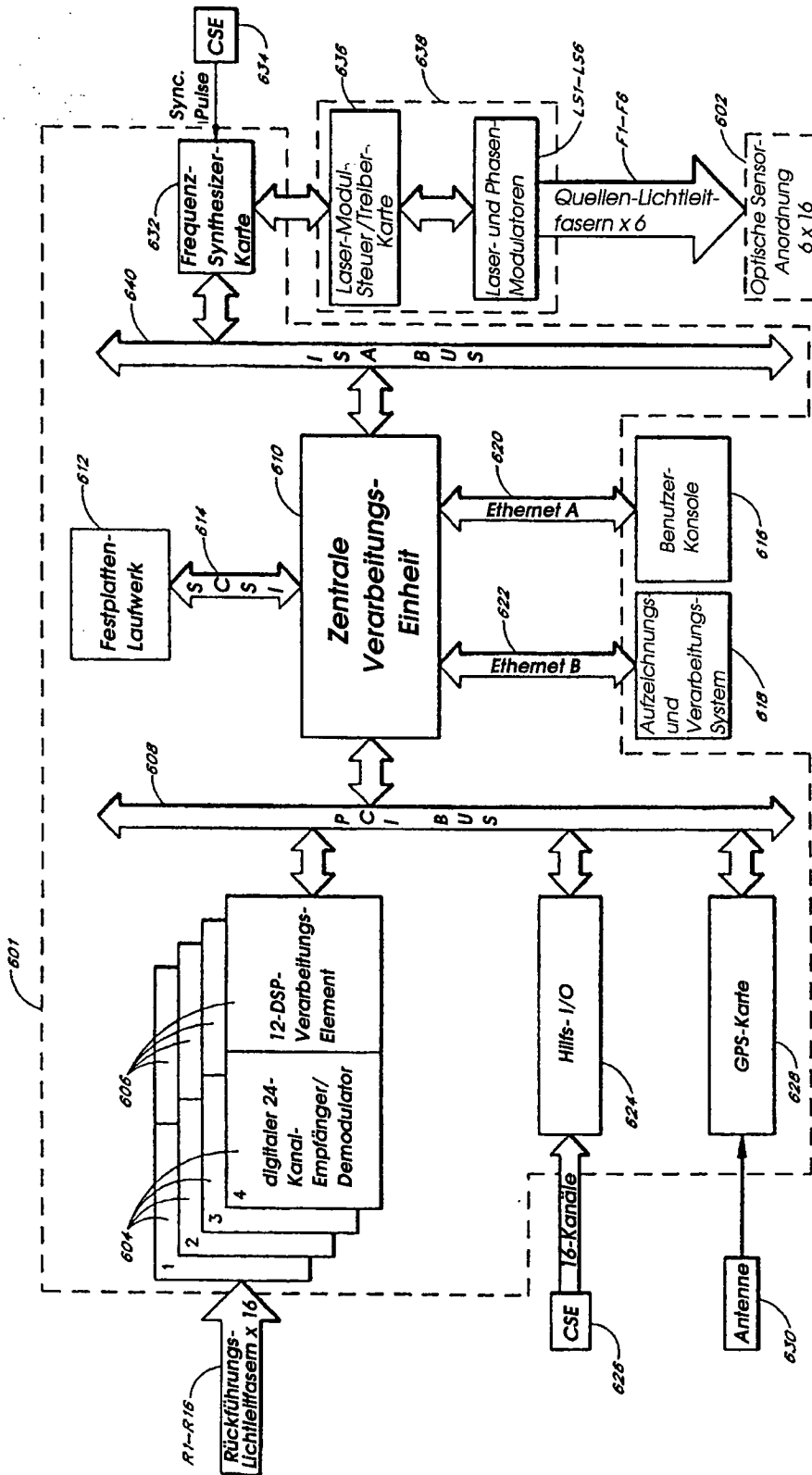


FIG. 6

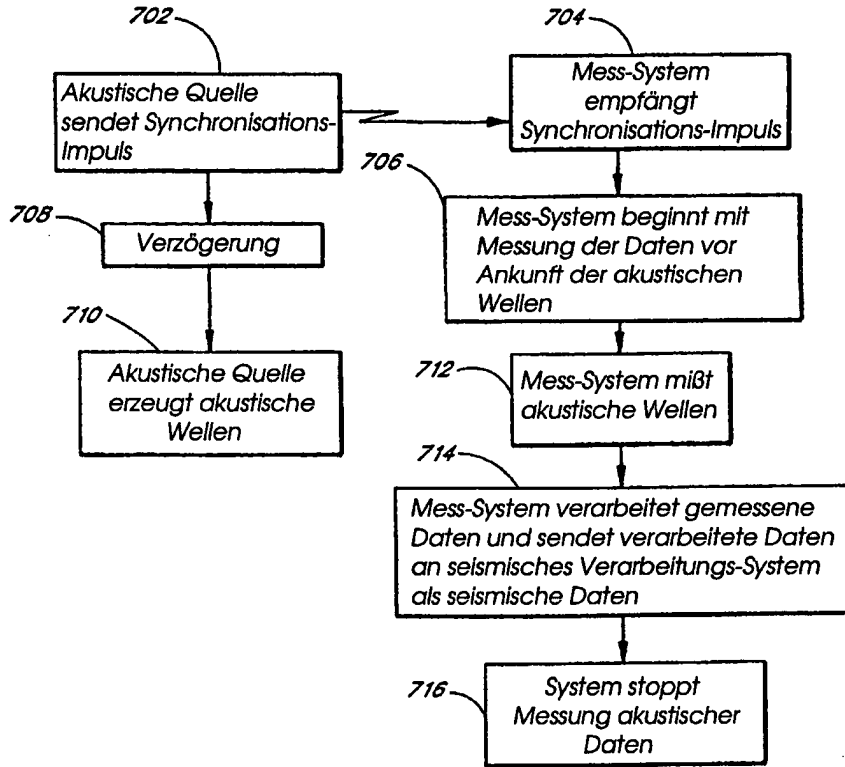


FIG. 7

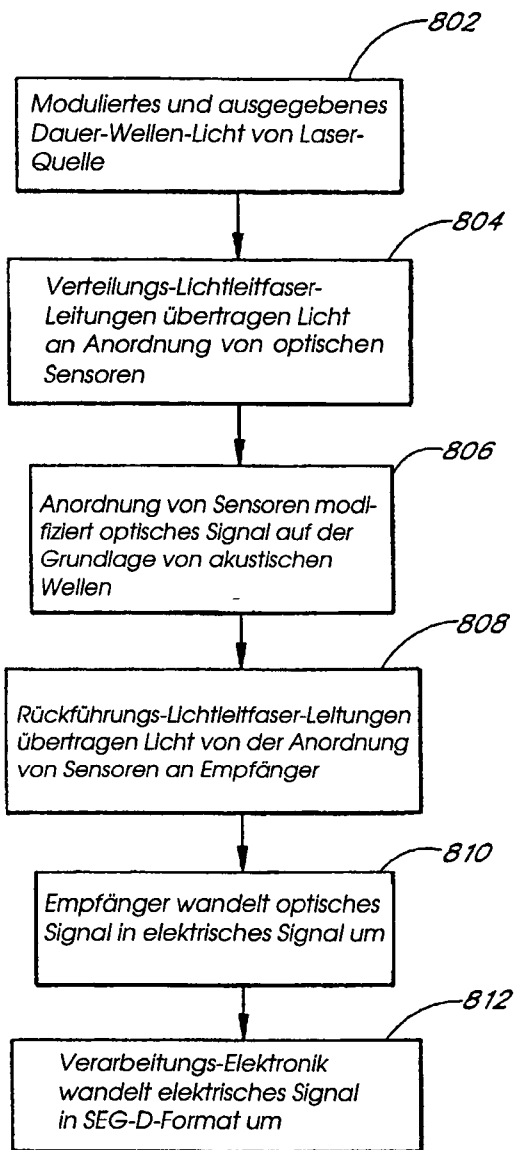


FIG. 8

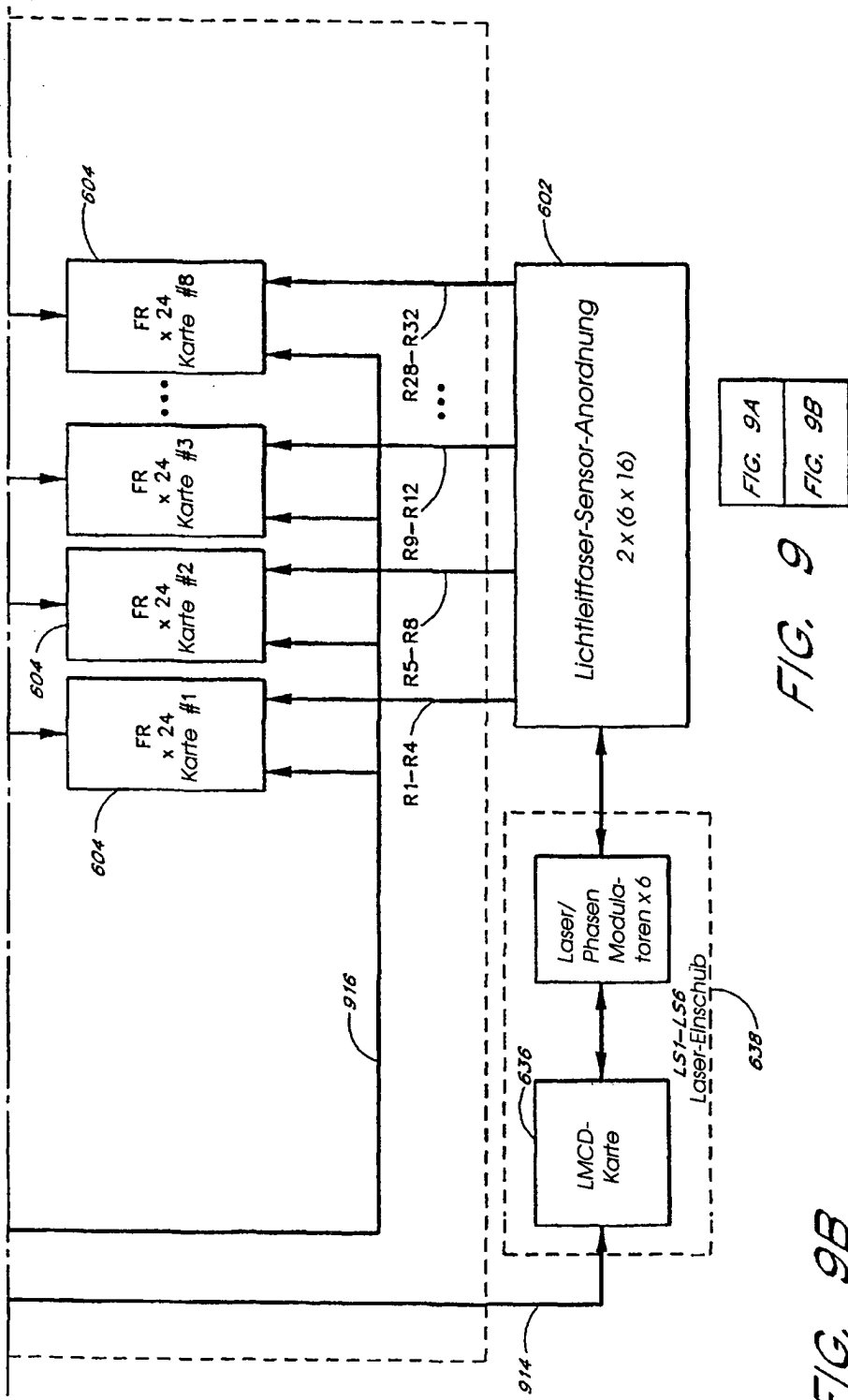
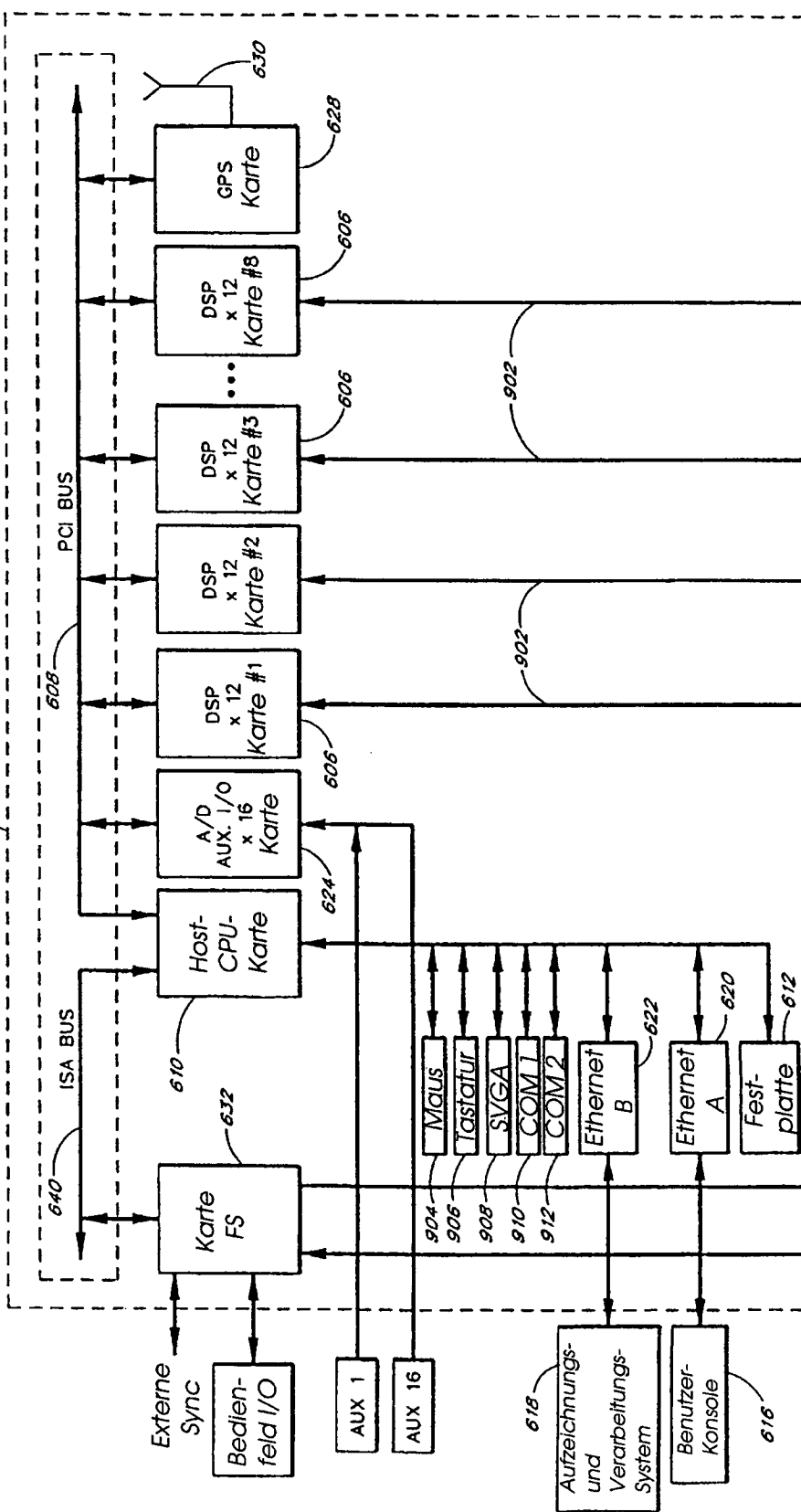


FIG. 9

FIG. 9B

FIG. 9A



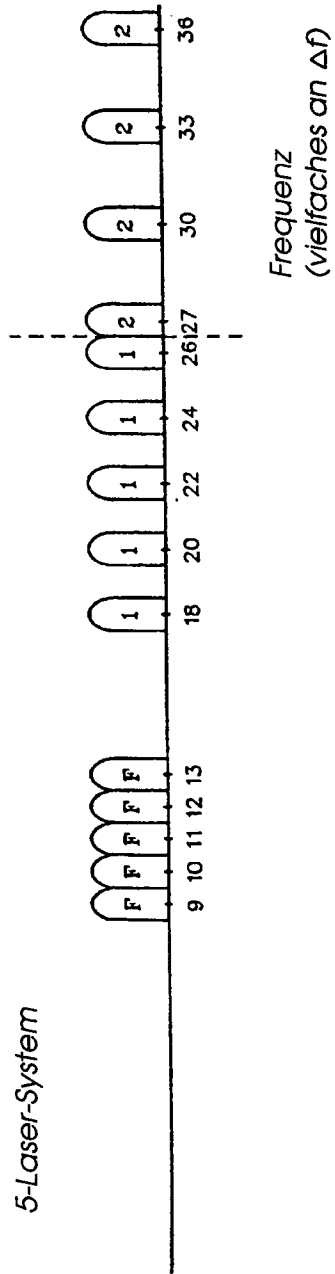
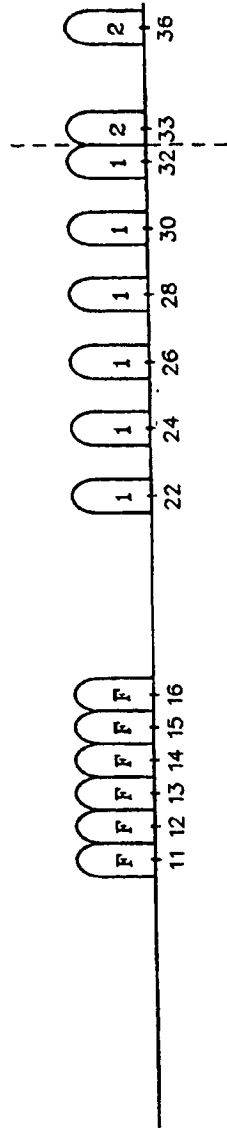


FIG. 10A

6-Laser-System



Frequenz
(vielfaches an Δf)

FIG. 10B

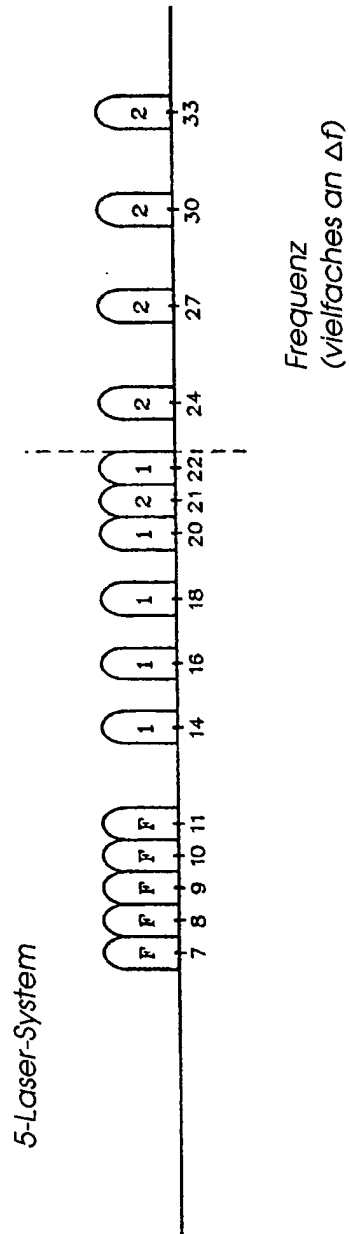


FIG. 11A

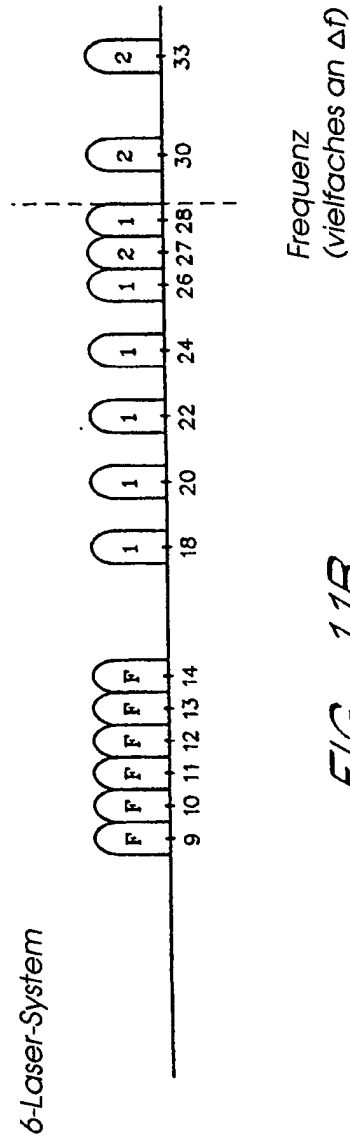


FIG. 11B

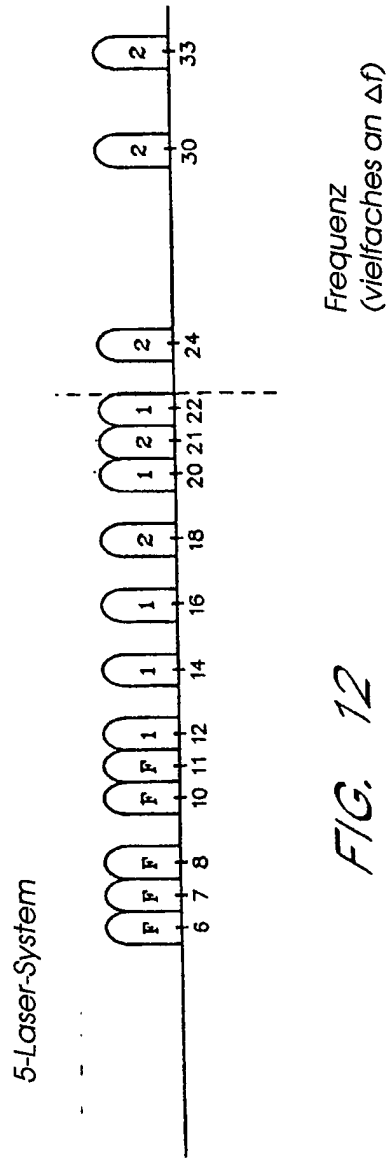


FIG. 12

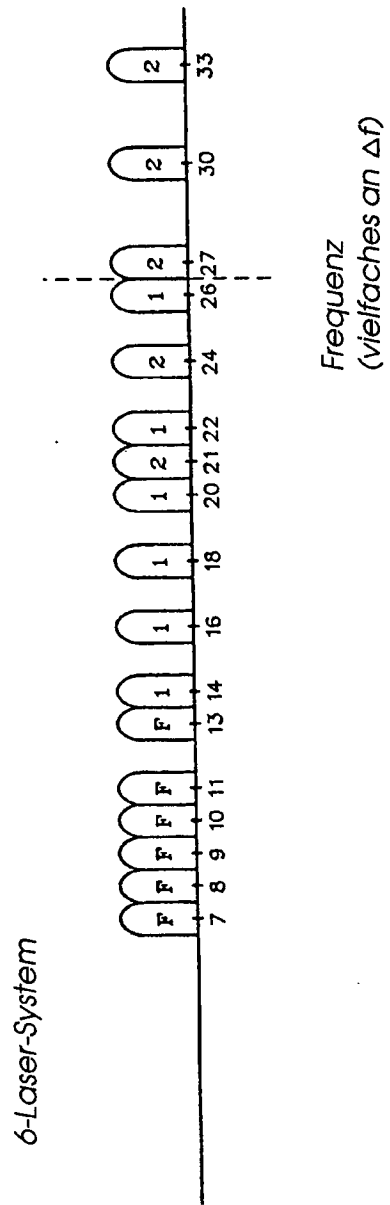


FIG. 13

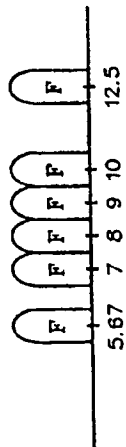
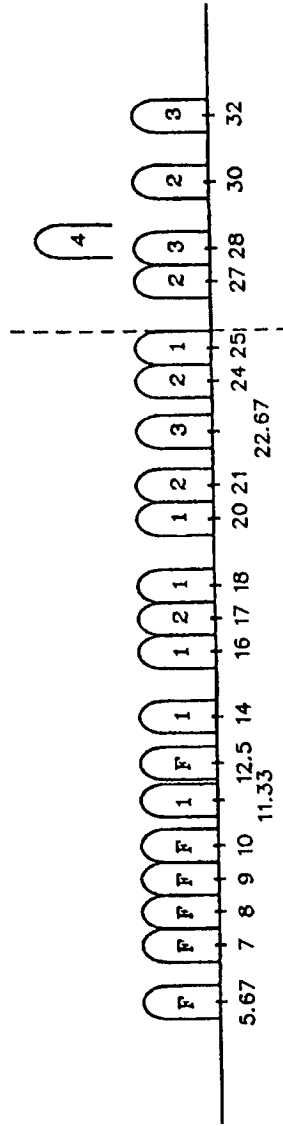


FIG. 14A



Frequenz
(vielfaches an Δf)

FIG. 14B

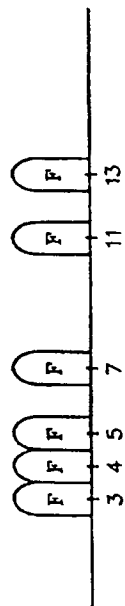


FIG. 15A

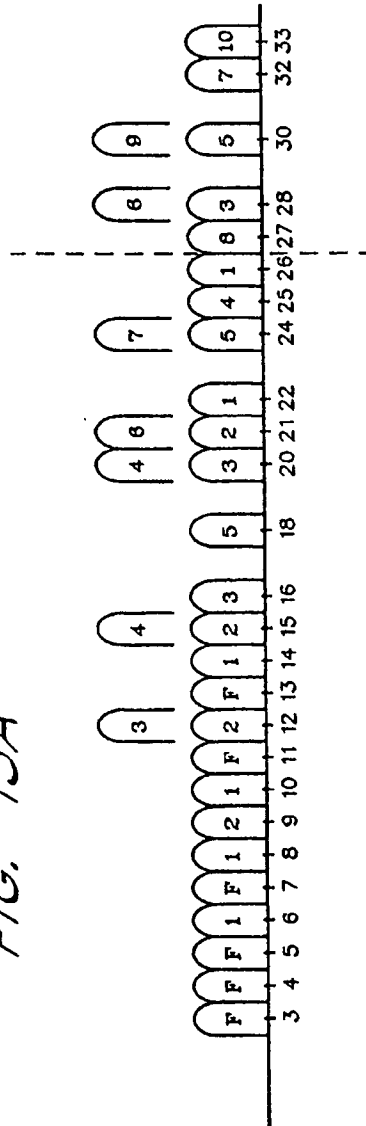


FIG. 15B

Frequenz
(vielfaches an Δf)

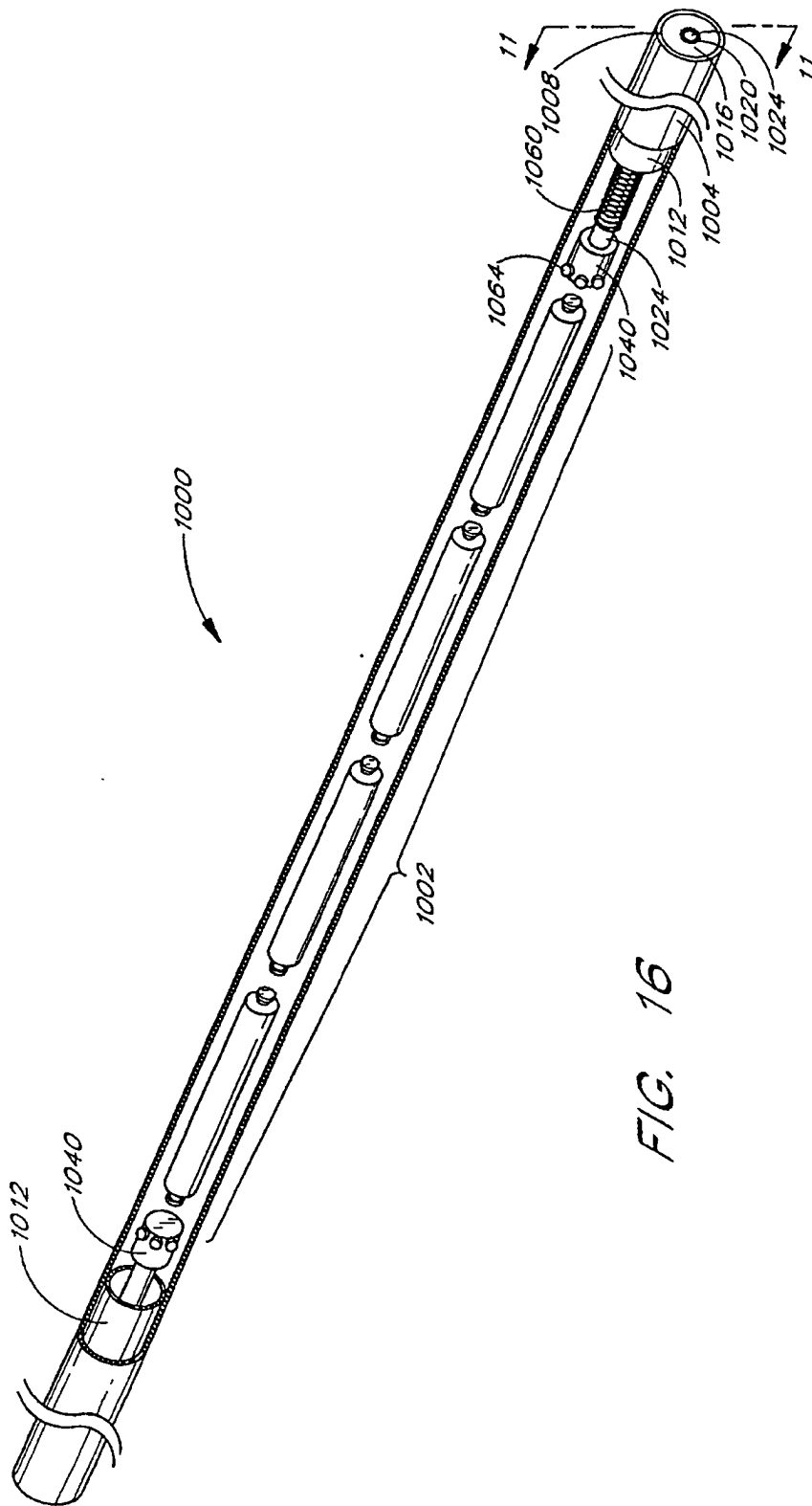


FIG. 16

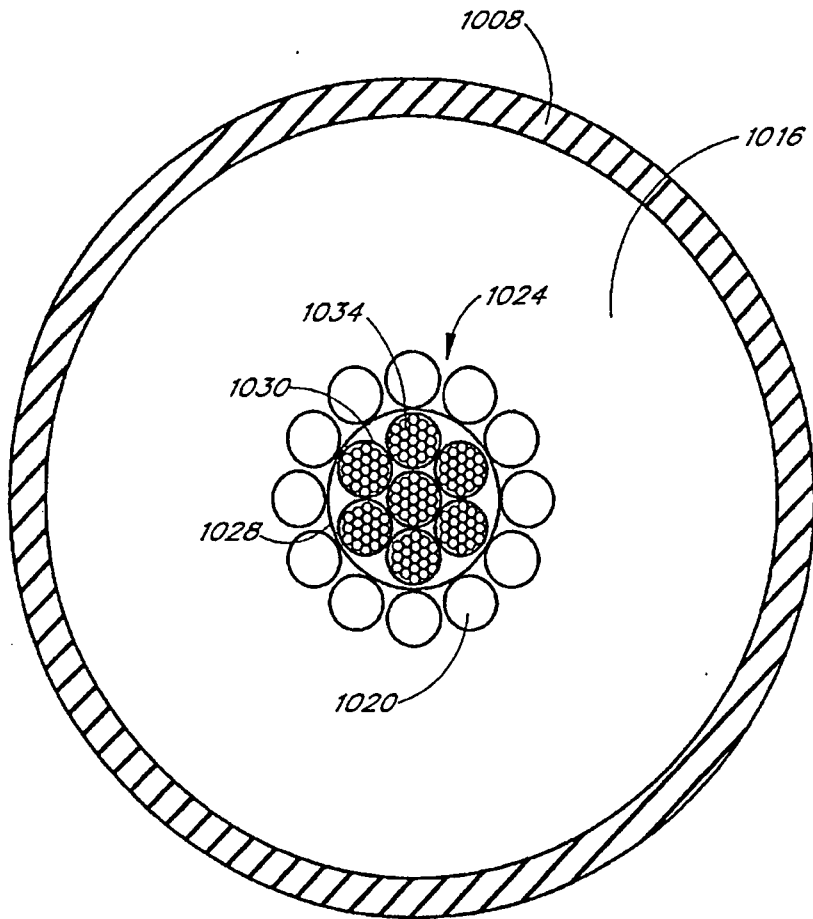


FIG. 17

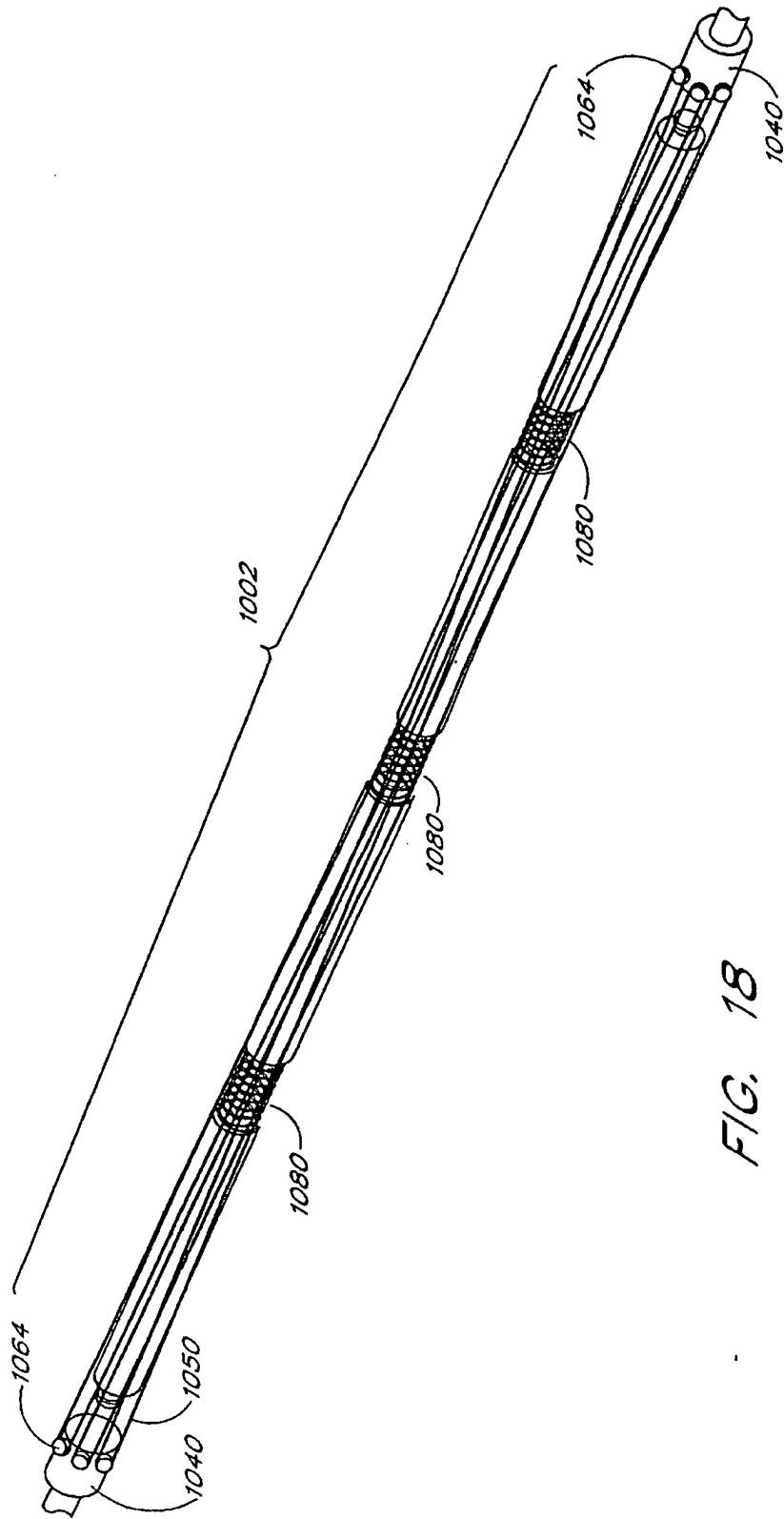


FIG. 18

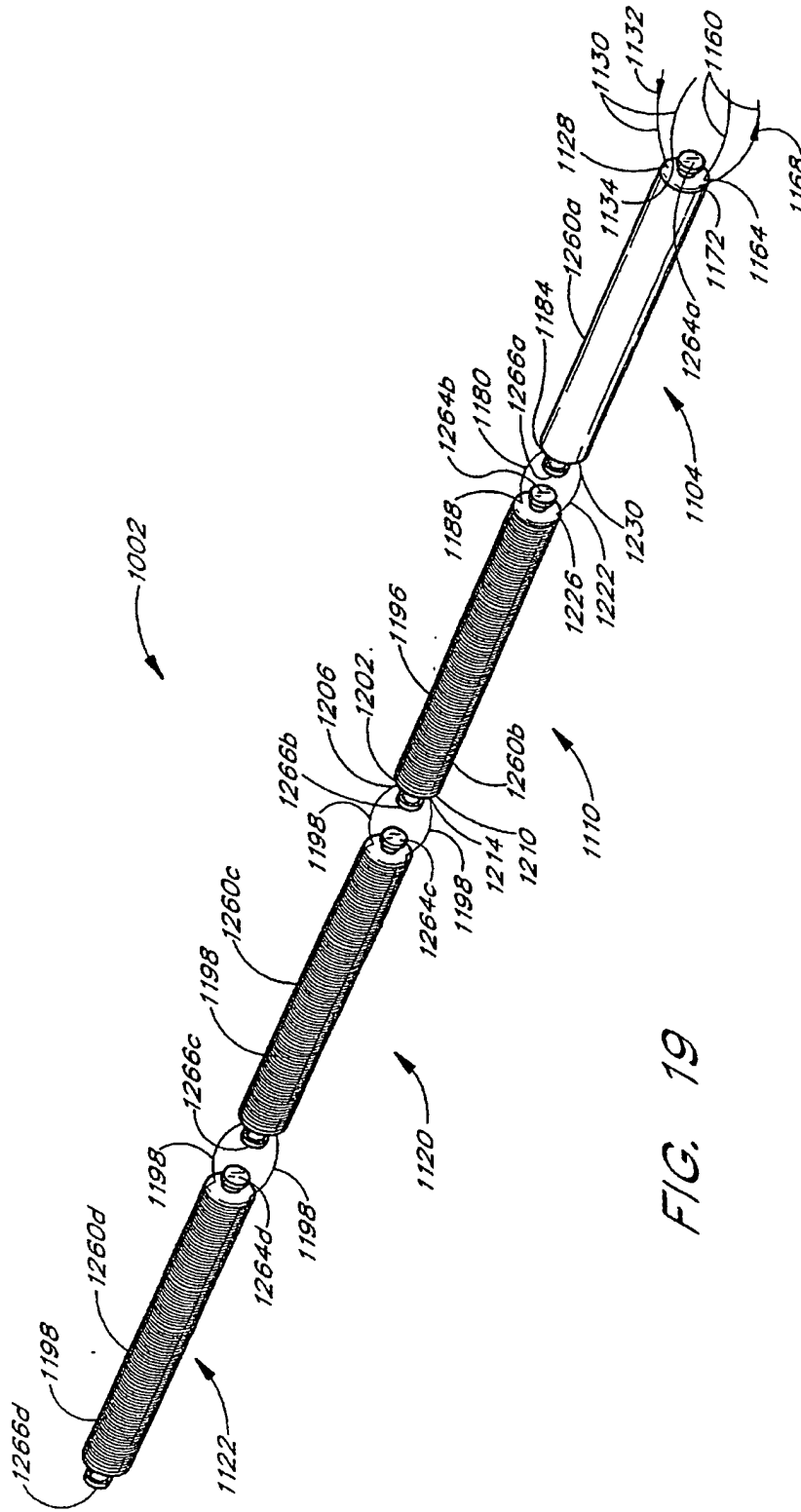


FIG. 19

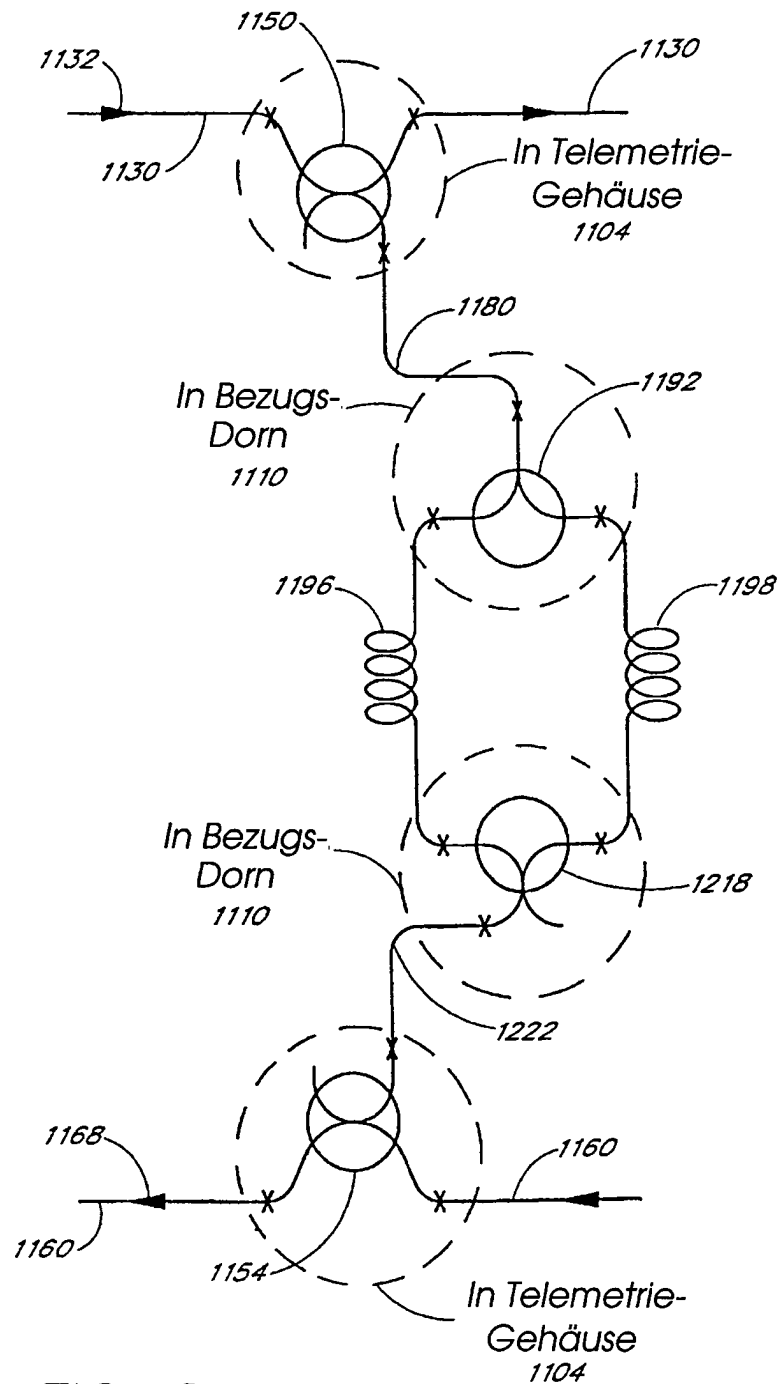


FIG. 20A

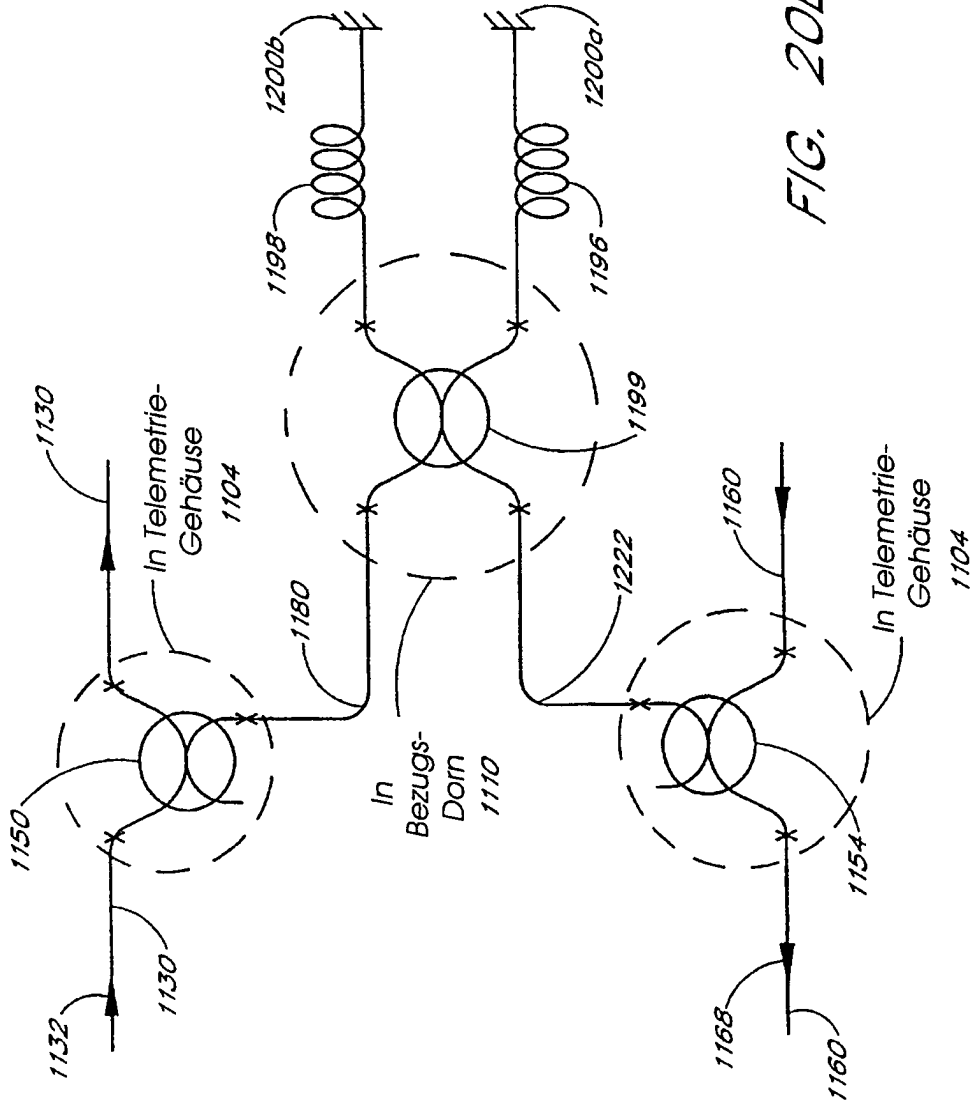


FIG. 20B

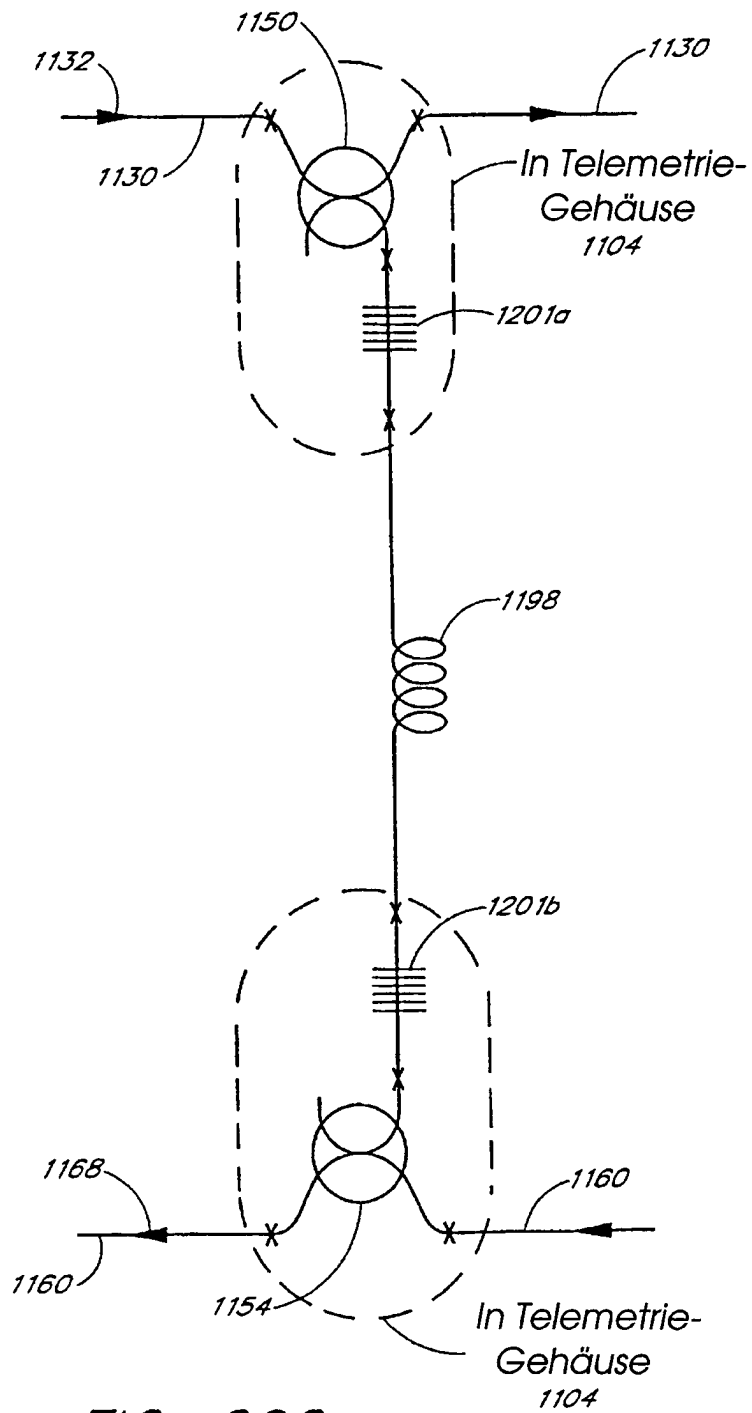


FIG. 20C

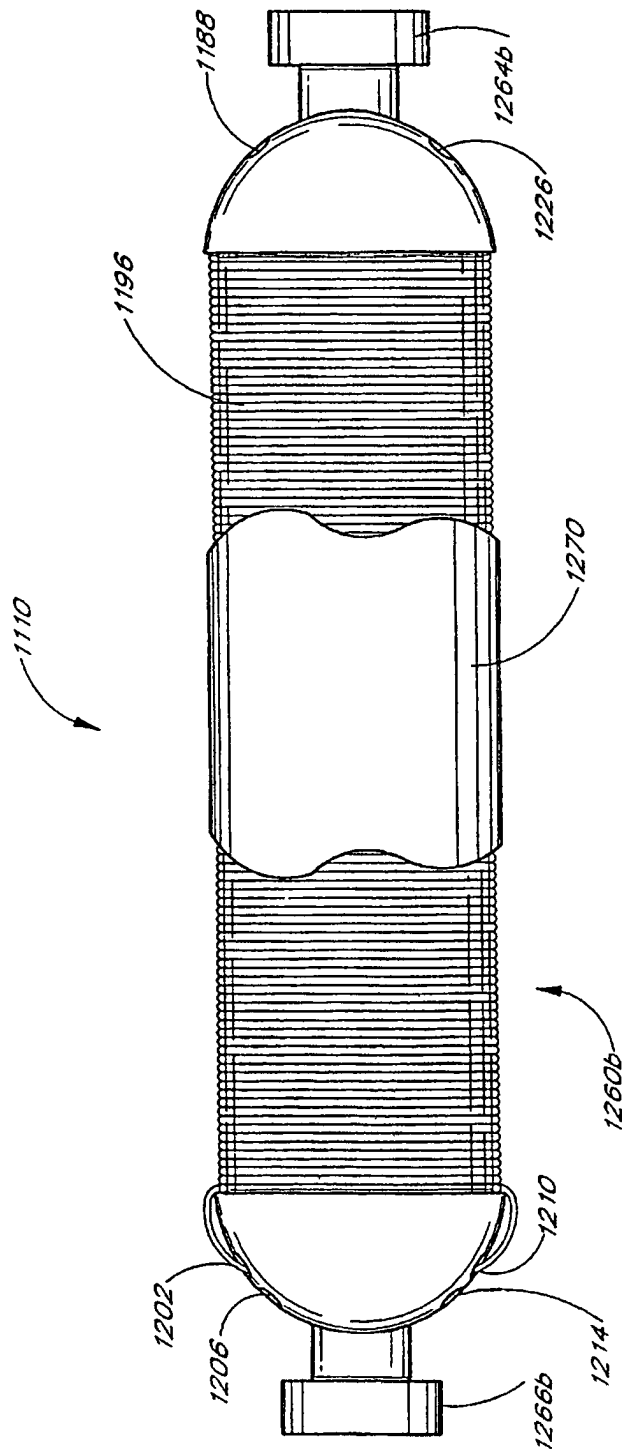


FIG. 21

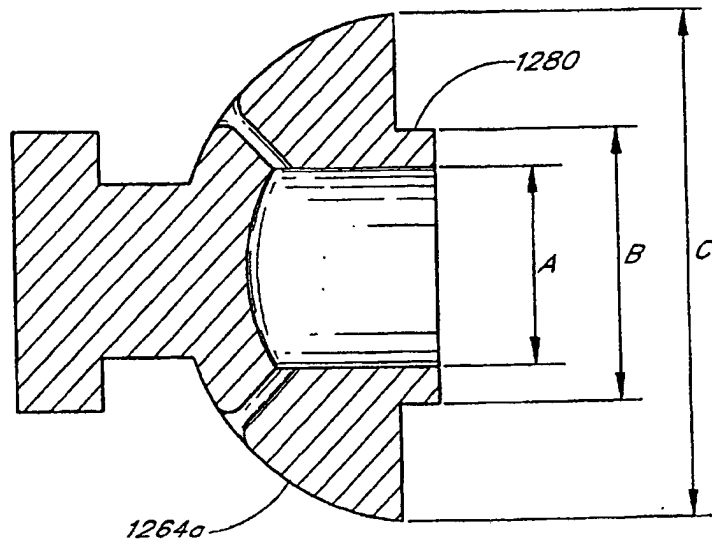


FIG. 22

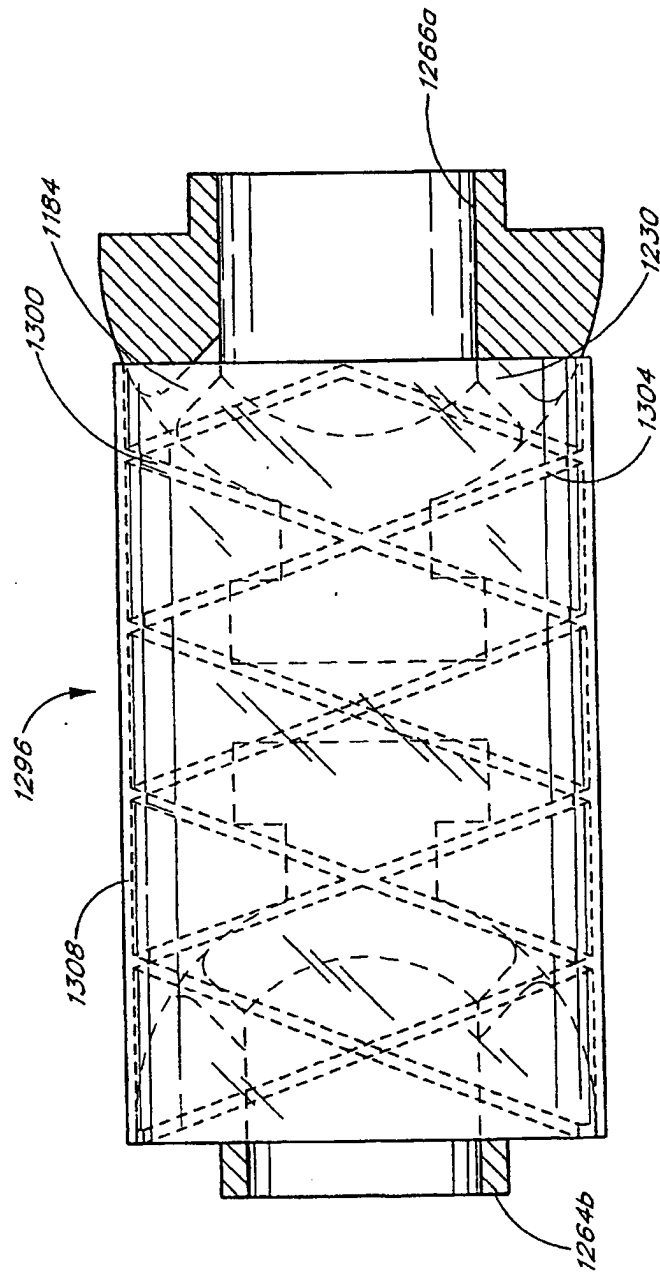


FIG. 23