



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 26 749 T2** 2006.06.08

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 084 590 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 26 749.8**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US99/06829**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 916 185.4**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 99/052323**

(86) PCT-Anmeldetag: **29.03.1999**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **14.10.1999**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **21.03.2001**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **17.08.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **08.06.2006**

(51) Int Cl.⁸: **H04R 1/44** (2006.01)
G01H 9/00 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

80677 P	03.04.1998	US
253203	19.02.1999	US

(73) Patentinhaber:

**The Board of Trustees of the Leland Stanford
Junior University, Stanford, Calif., US**

(74) Vertreter:

derzeit kein Vertreter bestellt

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB, IT, NL

(72) Erfinder:

VAKOC, Benjamin J., San Mateo, US

(54) Bezeichnung: **GEFALTETE SAGNAC-SENSORANORDNUNG**

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 liegt auf dem Gebiet faseroptischer Schallsensorfeldern- beziehungsweise Anordnungen, wobei Licht sich in den Anordnungen ausbreitet und die Auswirkungen akustischer Signale auf das Licht, das von den Anordnungen zurückkehrt, analysiert werden, um die Charakteristik der akustischen Signale zu bestimmen.

BESCHREIBUNG DES STANDES DER TECHNIK

[0002] Faseroptisch basisbezogene Schallsensoren sind vielversprechende Alternativen zu herkömmlichen elektronischen Sensoren. Zu ihren Vorteilen gehören eine hohe Ansprechempfindlichkeit, ein großer dynamischer Bereich, geringes Gewicht und kompakte Größe. Die Fähigkeit, eine große Anzahl von faseroptischen Sensoren auf einfache Weise auf gemeinsamen Bussen zu multiplexieren, macht faseroptische Sensoren auch für großräumige Anordnungen attraktiv. Die neue erfolgreiche Einbeziehung von mehreren erbiumdotierten Faserverstärkern mit niedriger Verstärkungsleistung (EDFAs) in eine faseroptische Sensoranordnung zur Erhöhung der Anzahl von Sensoren, die von einem einzelnen Faserpaar unterstützt werden können, hat großräumige faseroptische Sensoranordnungen noch wettbewerbsfähiger gemacht.

[0003] Zur Schalldetektion ist bisher der am meisten gewählte faseroptische Sensor der Mach-Zehnder-Interferometer-Sensor gewesen. Ein Beispiel für einen solchen Sensor ist in EP 0 376 449 beschrieben, die einen Mach-Zehnder-Interferometer-Sensor mit Anschlüssen beschreibt, die mit einer optischen Faserschleife gekoppelt sind, die ein beliebiges optisches Signal wieder einkoppelt, das von einem der Ausgangsanschlüsse ausgegeben wird. Das Interferometer beruht dann auf einer direkten Interferenz zwischen den Signalen, die sich vom ersten Koppler zum zweiten Koppler ausbreiten.

[0004] In irgendwelchem Interferometer-Sensor wird die Phasenmodulation mittels einer Cosinus-Quadrat-Funktion in eine Intensitätsmodulation umgesetzt. Wegen dieser nichtlinearen Übertragungsfunktion erzeugt eine Sinusphasenmodulation Harmonische höherer Ordnung. Ein Interferometer, das in Quadratur arbeitet (interferierende Strahlen $\pi/2$ außer Phase), hat ein maximiertes Frequenzverhalten bei der Harmonischen erster Ordnung und ein minimiertes Frequenzverhalten bei der Harmonischen zweiter Ordnung. Aus diesem Grund wird die Quadratur als Arbeitspunkt bevorzugt. Wenn der Arbeitspunkt von der Quadratur wegdriftet (beispielsweise infolge äußerer Temperaturänderungen), nimmt das Frequenzverhalten bei der Harmonischen erster Ordnung ab und das Frequenzverhalten bei der Harmonischen zweiter Ordnung zu. Wenn das Interferometer mit 0 oder π außer Phase arbeitet, verschwindet die Harmonische erster Ordnung vollständig. Dieses verringerte Frequenzverhalten bei der Harmonischen erster Ordnung (das durch die Arbeitspunkte abseits der Quadratur bewirkt wird) wird als Signalfading bezeichnet.

[0005] Da Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoren einen instabilen Arbeitspunkt haben, sind sie für das eben erwähnte Signalfadingproblem besonders anfällig. Um Signalfading zu überwinden, ist eine Demodulation des zurückgekehrten Signals erforderlich. Die typische Demodulationstechnik ist das Schema des phasenerzeugten Trägers (PGC), das einen Mach-Zehnder-Interferometer-Sensor mit Weglängenfehlableich erfordert. (Siehe beispielsweise Anthony Dandridge et al., Multiplexing of Interferometric Sensors Using Phase Carrier Techniques, Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-5, Nr. 7, Juli 1987, S. 947–952) Diese Weglängenunsymmetrie bewirkt auch die Umwandlung des Laserphasenrauschens in ein Intensitätsrauschen, das die Leistungsfähigkeit der Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnungen bei niedrigen Frequenzen einschränkt und der Linienbreite der Quelle strenge Anforderungen auferlegt. Diese Forderung nach einer schmalen Linienbreite hat die Entwicklung verstärkter Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnungen bei 1,55 μm verlangsamt.

[0006] Das Sagnac-Interferometer hat in faseroptischen Gyroskopen breite Anwendung gefunden. (Siehe beispielsweise B. Culshaw et al., Fibre optic gyroscopes, Journal of Physics E (Scientific Instruments), Vol. 16, Nr. 1, 1983, S. 5–15) Es ist vorgeschlagen worden, daß das Sagnac-Interferometer verwendet werden könnte, um Schallwellen zu detektieren. (Siehe beispielsweise E. Udd, Fiber-optic acoustic sensor based on the Sagnac Interferometer, Proceedings of the SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 425, 1983, S. 90–91; Kjell Kråkenes et al., Sagnac Interferometer for underwater sound detection: noise properties, OPTICS LETTERS, Vol. 14, Nr. 20, 15. Oktober 1989, S. 1145–1152; und Sverre Knudsen et al., An Ultrasonic

Fiber-Optic Hydrophone Incorporating a Push-Pull Transducer in a Sagnac Interferometer, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 12, Nr. 9, September 1994, S. 1696–1700) Da das Sagnac-Interferometer ein Common-Path-Interferometer (Interferometer mit einem gemeinsamen Weg der Teilstrahlen) ist, ist es reziprok und hat daher einen stabilen Arbeitspunkt, der Signalfading ausschließt und die Umwandlung von Quellphasenrauschen in Intensitätsrauschen verhindert. Deshalb ist das Sagnac-Interferometer gegen das Phasenrauschen immun, das die Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoren bei niedrigen Frequenzen einschränkt.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0007] Ein Aspekt der vorliegenden Erfindung ist ein Sensor, der folgendes umfaßt: einen ersten optischen Koppler, um Eingangslicht zu empfangen und das Eingangslicht an einen ersten optischen Weg mit einer ersten optischen Laufzeitverzögerung und an eine Anordnung von Sensoren zu koppeln, wobei die Anordnung von Sensoren wenigstens einen ersten Sensor in einem zweiten optischen Weg umfaßt, wobei der zweite optische Weg eine zweite optische Laufzeitverzögerung aufweist, die sich von der ersten optischen Laufzeitverzögerung unterscheidet, einen zweiten optischen Koppler, um Licht von dem ersten optischen Weg und von dem zweiten optischen Weg zu empfangen, um das Licht in einen Verzögerungsweg einzukoppeln, und um Licht, das von dem Verzögerungsweg zurückkehrt, wieder in den ersten optischen Weg und den zweiten optischen Weg einzukoppeln, um das Licht zu veranlassen sich an den ersten optischen Koppler auszubreiten, um dort erneut kombiniert zu werden, wobei Teile des Lichts in dem ersten optischen Koppler interferieren, wenn die Teile des Lichts sich über gleiche Gesamtentfernungen durch den ersten optischen Weg und den zweiten optischen Weg vor Rückkehr an den ersten Koppler bewegt haben und einen Detektor, der Veränderungen der Intensität des Lichts detektiert, die aus Lichtimpulsen resultieren, die in dem ersten Koppler interferieren.

[0008] Der Sensor kann eine Lichtquelle aufweisen. Die Anordnung kann vorteilhafterweise einen zweiten Sensor aufweisen, der in einem dritten optischen Weg mit einer dritten optischen Länge ist, die sich von der ersten optischen Länge unterscheidet und von der zweiten optischen Länge unterscheidet.

[0009] Die detektierbaren Ausgangssignale ändern sich als Antwort auf die Schallenergie, die auf den ersten Sensor auftrifft.

[0010] Licht, das durch den ersten optischen Weg läuft, bleibt von einem akustischen Signal im wesentlichen unbeeinflusst. Zumindest ein Teil des zweiten optischen Wegs ist vom akustischen Signal beeinflusst, um eine Phase des Lichts zu modulieren, das durch den Teil des zweiten optischen Wegs läuft.

[0011] Das Licht vom ersten optischen Weg und vom zweiten optischen Weg umfaßt einen ersten beziehungsweise zweiten Teil des Lichts, die in Übereinstimmung mit Differenzen der ersten und zweiten optischen Längen zeitlich voneinander getrennt sind. Der erste und zweite Teil des Lichts kehrt vom Verzögerungsweg als erster beziehungsweise zweiter verzögerter Teil zurück. Der zweite Koppler koppelt den ersten und zweiten verzögerten Teil in den ersten optischen Weg und in den zweiten optischen Weg ein. Jeder der ersten und zweiten verzögerten Teile wird in jeden der optischen Wege zur Ausbreitung in diesen in einer zweiten Richtung entgegen der ersten Richtung eingekoppelt. Die Lichtteile, die in der zweiten Richtung laufen, werden im ersten Koppler rekombiniert und vom ersten Koppler an den Detektor ausgegeben.

[0012] In einer Ausführungsform umfaßt der Verzögerungsweg eine Länge einer optischen Faser und einen Reflektor. Die Länge der optischen Faser ist so gewählt, daß eine optische Laufzeitverzögerung entsteht. Das Licht breitet sich durch die optische Faser vom zweiten Koppler zum Reflektor aus. Der Reflektor reflektiert das Licht in die optische Faser, damit es sich durch die optische Faser zum zweiten Koppler ausbreitet. In bestimmten Ausführungsformen umfaßt der Reflektor einen Faraday-Drehspiegel. Das Licht, das in einer ersten Polarisation auf den Faraday-Drehspiegel fällt, wird in einer orthogonalen zweiten Polarisation reflektiert, und das Licht, das in der zweiten Polarisation einfällt, wird in der ersten Polarisation reflektiert. In der Ausführungsform mit dem Faraday-Drehspiegel weist der Sensor vorzugsweise einen ersten Polarisator auf, damit sich Licht in der ersten Polarisation in den gemeinsamen Weg zwischen dem ersten Koppler und dem zweiten Koppler ausbreiten kann. Ein zweiter Polarisator ermöglicht, daß sich Licht in der zweiten Polarisation in der Erfassungsanordnung ausbreiten kann. Der Faraday-Drehspiegel bewirkt, daß sich Licht, das sich in dem gemeinsamen Weg in der ersten Richtung ausbreitet, nur in der Erfassungsanordnung in der zweiten Richtung ausbreitet, und bewirkt, daß sich Licht, das sich in der Erfassungsanordnung in der ersten Richtung ausbreitet, nur in dem gemeinsamen Weg in der zweiten Richtung ausbreitet. Teile des Lichts, die sich in dem gemeinsamen Weg in der zweiten Richtung ausbreiten, interferieren im ersten Koppler mit Teilen des Lichts, die sich in der Erfassungsanordnung in der zweiten Richtung ausbreiten, wobei diese im wesentlichen gleiche optische Gesamt-

weglängen in der ersten und zweiten Richtung zurücklegen. In alternativen Ausführungsformen empfängt der Verzögerungsweg das Licht von einem ersten Anschluß des zweiten Kopplers und sendet das Licht zurück zu einem zweiten Anschluß des zweiten Kopplers. Der Verzögerungsweg kann vorteilhafterweise einen Phasenmodulator aufweisen, der Licht moduliert, das sich im Verzögerungsweg ausbreitet. Der Phasenmodulator spricht auf das Ausgangssignal vom Detektor an, um das Licht, das sich im Verzögerungsweg ausbreitet, zu modulieren, um das Ausgangssignal vom Detektor auf Null zu bringen.

[0013] Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zum Detektieren von akustischen Signalen mit den folgenden Schritten:

Erzeugen eines Eingangslichtsignals;

Einkoppeln des Eingangslichtsignals in einen ersten optischen Weg und in eine Anordnung von Sensoren, um sich darin in jeweiligen ersten Richtungen auszubreiten, wobei das Anordnung von Sensoren wenigstens einen ersten Sensor in einem zweiten optischen Weg umfaßt, wobei der erste optische Weg eine erste optische Laufzeitverzögerung aufweist, wobei der zweite optische Weg eine zweite optische Laufzeitverzögerung aufweist, die sich von der ersten optischen Laufzeitverzögerung unterscheidet;

Ausgeben von jeweiligen ersten und zweiten Ausgangslichtteilen von den ersten und zweiten optischen Wegen, wobei die ersten und zweiten Ausgangslichtteile von den ersten und zweiten optischen Wegen zu unterschiedlichen Zeiten in Übereinstimmung mit Differenzen in den ersten und zweiten optischen Laufzeitverzögerungen ausgegeben werden;

Modulieren des zweiten Ausgangslichtteils in dem ersten Sensor in dem zweiten optischen Weg durch ein akustisches Signal, das auf den zweiten optischen Weg einfällt;

Einkoppeln der ersten und zweiten Ausgangslichtteile in einen Verzögerungsweg, wobei der Verzögerungsweg erste und zweite verzögerte Lichtteile entsprechend zu den ersten und zweiten Ausgangslichtteilen ausgibt;

Einkoppeln der ersten und zweiten verzögerten Lichtteile in die ersten und zweiten optischen Wege, um sich darin in einer zweiten Richtung, entgegengesetzt zu der ersten Richtung, auszubreiten;

Ausgeben einer ersten Gruppe von Rückkehrlichtteilen von dem ersten optischen Weg, wobei die erste Gruppe von Rückkehrlichtteilen einen jeweiligen Rückkehrlichtteil für jeden der ersten und zweiten verzögerten Lichtteile umfaßt;

Ausgeben einer zweiten Gruppe von Rückkehrlichtteilen von dem zweiten optischen Pfad, wobei die zweite Gruppe von Rückkehrlichtteilen einen jeweiligen Rückkehrlichtteil für jeden der ersten und zweiten verzögerten Lichtteile umfaßt; und

Einkoppeln der ersten und zweiten Gruppe von Rückkehrlichtteilen in wenigstens einen Detektor, wobei die Rückkehrlichtteile, die sich über identische gesamte optische Pfadlängen in den ersten und zweiten Richtungen bewegen, interferieren, um erfaßbare Ausgangssignale zu erzeugen.

[0014] Die vorliegende Erfindung ist eine geknickte faseroptische Sagnac-Schallsensoranordnung, die so arbeitet wie ein Sagnac-Interferometer, die jedoch einen gemeinsamen Verzögerungsweg verwendet, um eine verteilte Aufnahme in Zuführungsfasern zu reduzieren. Die faseroptische Schallsensoranordnung wird verwendet, um Schallwellen in Wasser zu detektieren. Wenn man die geknickte Sagnac-Sensoranordnung auf Betriebsprinzipien wie das Sagnac-Interferometer einstellt anstatt die Anordnung auf die Prinzipien des Mach-Zehnder-Interferometers einzustellen, hat die Sensoranordnung einen stabilen Arbeitspunkt, hat reduziertes Phasenrauschen und ermöglicht die Verwendung einer Breitbandsignalquelle, anstatt einen teureren Schmallinien-Lasers verwenden zu müssen. Eine große Anzahl von Schallsensoren kann in der Architektur der geknickten faseroptischen Sagnac-Schallsensoranordnung multiplexiert werden.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0015] Die vorliegende Erfindung wird nachstehend in Verbindung mit den beigefügten Zeichnungen beschrieben, die folgendes zeigen:

[0016] [Fig. 1](#) stellt ein exemplarisches Sagnac-Interferometer mit einer einzelnen Erfassungsschleife dar;

[0017] [Fig. 2](#) stellt eine Sagnac-Sensoranordnung dar, bei der jede Sprosse einer Sensoranordnung ein zusätzliches Sagnac-Interferometer bildet;

[0018] [Fig. 3](#) stellt eine Sagnac-Sensoranordnung dar, die erbiumdotierte Faserverstärker aufweist, um Signalleistung zu regenerieren, die durch Koppel- und Leistungsverluste verloren gehen;

[0019] [Fig. 4](#) stellt ein Diagramm des Frequenzverhaltens eines Sagnac-Interferometers dar;

- [0020] [Fig. 5](#) stellt Diagramme des maximalen und minimalen akustischen Signals dar, das durch ein Mach-Zehnder-Interferometer detektierbar und durch ein Sagnac-Interferometer detektierbar ist, und zeigt den relativ konstanten dynamischen Bereich eines Sagnac-Interferometers über einen großen Bereich von Frequenzen;
- [0021] [Fig. 6](#) stellt Kurven des kleinsten detektierbaren akustischen Signals gegen Frequenz bei drei Sagnac-Interferometer-Konfigurationen mit verschiedenen Faserlängen in der Hydrophon- und der Verzögerungsschleife dar;
- [0022] [Fig. 7](#) stellt ein Sagnac-Interferometer dar, das eine zusätzliche Verzögerungsschleife aufweist, um den dynamischen Bereich des Interferometers zu vergrößern;
- [0023] [Fig. 8](#) stellt ein Diagramm des dynamischen Bereichs dar, den das Interferometer in [Fig. 7](#) ermöglicht;
- [0024] [Fig. 9A](#) stellt die Positionierung der Verzögerungsschleife des Interferometers im trockenen Ende eines Sensoranordnungssystems dar;
- [0025] [Fig. 9B](#) stellt die Positionierung der Verzögerungsschleife des Interferometers im nassen Ende eines Sensoranordnungssystems dar;
- [0026] [Fig. 10](#) stellt das Sagnac-Interferometer von [Fig. 9B](#) mit Angaben dar, die die Längen zeigen, die bei Berechnungen der Auswirkungen der Phasenmodulation verwendet werden;
- [0027] [Fig. 11](#) stellt eine Technik zum Aufwickeln der Verzögerungsschleife dar, um die Auswirkungen der Schallwelle auf die Verzögerungsschleife zu reduzieren;
- [0028] [Fig. 12](#) stellt ein Sagnac-Interferometer dar, das leere Sprossen aufweist, die ein verteiltes Aufnahme-Rauschen detektieren, das von den Signalen, die von den Sensoren erzeugt werden, subtrahiert werden kann;
- [0029] [Fig. 13](#) stellt ein Sagnac-Interferometer dar, das einen Depolarisator aufweist, um die Auswirkungen des polarisationsbedingten Fadings zu reduzieren;
- [0030] [Fig. 14](#) stellt ein Sagnac-Interferometer dar, das Frequenzmultiplexierung nutzt;
- [0031] [Fig. 15](#) stellt ein Diagramm dar, das die Erzeugung der Überlagerungssignale zwischen dem verzögerten Modulationssignal und den zurückkehrenden Sensorsignalen im Interferometer von [Fig. 14](#) zeigt;
- [0032] [Fig. 16](#) stellt ein Sagnac-Interferometer dar, das Codemultiplexierung nutzt;
- [0033] [Fig. 17](#) stellt die Architektur einer geknickten faseroptischen Sagnac-Schallsensoranordnung gemäß der Erfindung dar;
- [0034] [Fig. 18](#) stellt ein Diagramm der Anzahl der zurückgekehrten Impulse pro Zeitintervall dar und zeigt die zeitliche Trennung von Signalimpulsen und Rauschimpulsen;
- [0035] [Fig. 19](#) stellt eine geknickte Sagnac-Schallfasersensoranordnung mit einer zweiten Verzögerungsschleife dar, um einen erweiterten dynamischen Bereich bereitzustellen;
- [0036] [Fig. 20](#) stellt eine geknickte faseroptische Sagnac-Schallsensoranordnung mit einem Phasenmodulator und einer Nullabgleichsschaltungsanordnung anstelle des Reflektors in [Fig. 17](#) dar;
- [0037] [Fig. 21](#) stellt eine weitere alternative Ausführungsform von [Fig. 19](#) dar, bei der die beiden Verzögerungsschleifen mit verschiedenen Anschlüssen des Kopplers verbunden sind; und
- [0038] [Fig. 22](#) stellt eine alternative Ausführungsform eines faseroptischen Schallsensoranordnungssystems unter Verwendung eines Faraday-Drehspiegels dar.
- [0039] [Fig. 23A](#), [Fig. 23B](#) und [Fig. 23C](#) stellen weitere alternative Ausführungsformen einer faseroptischen Schallsensoranordnung dar, die eine nichtpolarisierte Lichtquelle in Kombination mit einem Depolarisator, ei-

nem Polarisationsstrahlteiler und einem Faraday-Drehspiegel nutzt.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0040] Die vorliegende Erfindung wird nachstehend beginnend mit [Fig. 17](#) in Verbindung mit einer Anordnung von Schallsensoren (zum Beispiel Hydrophone) in einer Sagnac-Schleife beschrieben. Vor der Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen wird der Betrieb eines Sagnac-Schallsensors mit einfacher Schleife kurz beschrieben.

SAGNAC-SCHALLSENSOR MIT EINFACHER SCHLEIFE

[0041] Ein einfacher Sagnac-Schallsensor **100** ist in [Fig. 1](#) dargestellt. Die Sagnac-Schleife ist in zwei Abschnitte geteilt, eine Verzögerungsschleife **102** und ein Hydrophon **104**. Die Verzögerungsschleife **102** ist einfach eine große Faserlänge, normalerweise länger als 1 km. Das Hydrophon **104** ist ein Abschnitt der Faser, in dem eine Schallwelle in eine Phasenmodulation eines optischen Signals umgewandelt wird, die sich durch die Faser ausbreitet. Eine hohe Ansprechempfindlichkeit von Schallwellen wird normalerweise dadurch erreicht, daß optimierte Beschichtungen des Abschnitts der Faser im Hydrophon **104** gewählt werden und die Faser um einen Kern mit geeigneter Zusammensetzung gewickelt wird. (Siehe beispielsweise J. A. Bucaro et al., Optical fibre sensor coatings, Optical Fiber Sensors, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, 1986, S. 321–338) Die Faserlänge, die um das Hydrophon **104** gewickelt ist, beträgt normalerweise 10 Meter bis 100 Meter. Licht von einer Quelle **110**, zum Beispiel eine superfluoreszierende Faserquelle (SFS), wird von einem 3 × 3-Koppler **112** in einen im Uhrzeigersinn (CW) laufenden und einen im entgegengesetzten Uhrzeigersinn (CCW) laufenden Strahl geteilt. Der Betrieb des 3 × 3-Kopplers **112** ist bekannt und beispielsweise in Sang K. Sheem, Fiber-optic gyroscope with [3 × 3] directional coupler, Applied Physics Letters, Vol. 37, Nr. 10, 15. November 1980, S. 869–871 beschrieben.

[0042] Obwohl hier die Verwendung eines 3 × 3-Kopplers **112** beschrieben wird, können andere Koppler (zum Beispiel ein 2 × 2-Koppler, ein 4 × 4-Koppler und so weiter) verwendet werden. Um beispielsweise einen 2 × 2-Koppler zu verwenden, werden beide Anschlüsse der einen Seite verwendet, um das Sagnac-Interferometer zu bilden. Ein Anschluß der anderen Seite ist ein Detektionsanschluß. Der verbleibende Anschluß wird verwendet, um Licht in die Anordnung einzukoppeln, und kann auch als Detektionsanschluß verwendet werden, wenn ein Koppler oder Zirkulator verwendet wird (ähnlich wie es bei faseroptischen Gyroskopen erfolgt). Im allgemeinen kann jeder n × m-Koppler verwendet werden, indem zwei Anschlüsse der einen Seite des Kopplers verwendet werden, um das Sagnac-Interferometer zu bilden, und die Anschlüsse auf der anderen Seite des Kopplers als Detektionsanschlüsse, Einkopplungsanschlüsse oder beides verwendet werden.

[0043] Nach der Teilung läuft der CW-Strahl zunächst durch die Verzögerungsschleife **102** und dann durch das Hydrophon **104**, während der CCW-Strahl zuerst durch das Hydrophon **104** und dann durch die Verzögerungsschleife **102** läuft. Während einer Laufzeitverzögerung T_{delay} zwischen einer Zeit, wo der CW-Strahl durch das Hydrophon **104** läuft, und einer Zeit, wo der CCW-Strahl durch das Hydrophon **104** läuft, ändert sich das akustische Signal und ebenso die akustisch induzierte Phasenmodulation im Hydrophon **104**. Diese Änderung der Phasenmodulation wird in eine Phasendifferenz zwischen den gegenläufigen Strahlen umgesetzt, die in eine Intensitätsmodulation umgewandelt wird, wenn die Strahlen im 3 × 3-Koppler **112** rekombinieren. Diese Intensitätsmodulation wird dann von einem ersten Detektor **120** und von einem zweiten Detektor **122** oder von nur einem der beiden Detektoren detektiert.

[0044] Wenn, ausführlicher dargestellt, ein akustisches Signal eine Phasenmodulation $\phi_h \cos(\Omega t)$ in der Faser des Hydrophons **104** induziert, ist die resultierende Phasenmodulation zwischen den interferierenden Strahlen im Hydrophon **104**, $\phi_{\text{int}}(t)$, gegeben durch:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{int}}(t) &= \phi_h \cos(\Omega t) - \phi_h \cos(\Omega(t + T_{\text{delay}})) \\ &= 2\phi_h \sin\left(\frac{\Omega \cdot T_{\text{delay}}}{2}\right) \sin\left(\Omega t + \frac{\Omega \cdot T_{\text{delay}}}{2}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

wobei T_{delay} die Laufzeit durch die Verzögerungsschleife ist. Somit ist $\phi_{\text{int}}(t)$ eine Funktion der Hydrophonmodulation ϕ_h und des Produkts aus der akustischen Modulationsfrequenz Ω und der Verzögerungsschleife T_{delay} . Dies ist anders als bei einem Mach-Zehnder-Interferometer-Sensor, bei dem $\phi_{\text{int}}(t)$ eine Funktion lediglich der Hydrophonmodulation ϕ_h ist. Eine maximale Ansprechempfindlichkeit wird im Sagnac-Schallschleifensensor erreicht, wenn das Produkt aus der akustischen Frequenz Ω und der Laufzeitverzögerung T_{delay} ein ungerades Vielfaches von π ist (Höchstwert des ersten Sinusters in Gleichung 1). Die akustische Frequenz, die dieses

Produkt π ergibt, wird als die Eigenfrequenz der Schleife bezeichnet, die die niedrigste Frequenz ist, bei der die höchste Ansprechempfindlichkeit erreicht wird. Die meisten Unterwassererfassungsanwendungen beschäftigen sich mit der Detektion von akustischen Frequenzen unter 10 kHz. Damit die Schleifeneigenfrequenz kleiner als 10 kHz ist, ist eine Laufzeitverzögerung von mindestens 50 Mikrosekunden und somit eine Verzögerungsschleifenlänge von mindestens 10 km erforderlich. Der Sagnac-Schallsensor **100** erfordert also eine große Fasermenge für die Detektion von niedrigen akustischen Frequenzen (< 10 kHz).

[0045] Die Common-Path-Ausführung (Ausführung mit einem gemeinsamen Weg der Teilstrahlen), die für das Sagnac-Interferometer spezifisch ist, hat neben dem stabilen Arbeitspunkt und der Beseitigung des Phasenrauschens, wie bereits erwähnt, viele Vorteile gegenüber dem Mach-Zehnder-Interferometer. Ein Sagnac-Interferometer ermöglicht die Verwendung einer Kurzkohärenz-Breitbandquelle, zum Beispiel einer superfluoreszierenden Faserquelle (SFS), ein Beispiel für eine verstärkte Spontanemissions-(ASE-)Quelle. Solche Quellen sind billig und können ohne weiteres hohe Leistungen hervorbringen. Es ist bisher gezeigt worden, daß die Verwendung des 3×3 -Kopplers den Sagnac-Schallsensor passiv in die Nähe der Quadratur versetzt. (Siehe Sang K. Sheem, Fiber-optic gyroscope with $[3 \times 3]$ directional coupler, Applied Physics Letters, Vol. 37, Nr. 10, 15. November 1980, S. 868–871; und H. Poisel et al., Low-cost fibre-optic gyroscope, Electronics Letters, Vol. 26, Nr. 1, 4. Januar 1990, S. 69–70). Durch Subtrahieren der Signale von den beiden Detektionsanschlüssen des 3×3 -Kopplers kann das Quellenzusatzrauschen, das die begrenzende Rauschquelle der SFS-Quellen ist, subtrahiert werden, während phasenmodulationsbedingte Intensitätsänderungen, die auf das Hydrophon zurückzuführen sind, sich hinzuaddieren. dadurch kann sich ein Sagnac-Interferometer der schrotrauschbegrenzten Leistungsfähigkeit nähern. (Siehe Kjell Kråkenes et al., Sagnac interferometer for underwater sound detection: noise properties, OPTICS LETTERS, Vol. 14, Nr. 20, 15. Oktober 1989, S. 1145–1152).

[0046] Die bisherige Arbeit mit Sagnac-Schallsensoren ist auf eine Einzelsensorkonfiguration beschränkt gewesen. Wegen der dem Sagnac-Interferometer eigenen Vorteile haben die Anmelder der Erfindung festgestellt, daß es erwünscht ist, die Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoren in einer großräumigen Anordnung durch Sagnac-Sensoren zu ersetzen. Jeder Sagnac-Sensor **100**, der oben beschrieben ist, erfordert viele Kilometer Faser, so daß das Einfügen zahlreicher solcher Sensoren in eine großräumige Anordnung unpraktisch wird. Die Untersuchungen zur Verwendung von Umlaufverzögerungsschleifen zur Reduzierung der Faserlängenanforderung haben Sensoren hervorgebracht, die deutlich weniger Faser verwenden, aber infolge der Einbeziehung von EDFAs in die Rezirkulationsschleife durch starkes Rauschen beeinträchtigt sind. (Siehe beispielsweise J. T. Kringlebotn et al., Sagnac Interferometer Including A Recirculating Ring With An Erbium-doped Fibre Amplifier, OFS '92 Conference Proceedings, S. 6–9) Ein neuartiger Lösungsansatz zur Verringerung der erforderlichen Faser wird nachstehend beschrieben.

Neuartige Sensoranordnung auf der Grundlage des Sagnac-Interferometers

[0047] Wie unten ausgeführt, haben die Anmelder ein neuartiges System entdeckt, das die Fasermenge, die für eine auf Sagnac beruhende großräumige Anordnung benötigt wird, dadurch reduziert, daß mehrere Sensoren im Multiplexbetrieb in die gleiche Verzögerungsschleife eingebunden werden, wobei eine praktische Sagnac-Sensoranordnung (SSA) entsteht. Wie in [Fig. 2](#) dargestellt, weist eine Sagnac-Sensoranordnung **200** eine Anordnung **210** von Hydrophonen **212(i)** in einer Leiterkonfiguration auf, die an einer einzelnen Verzögerungsschleife **214** angebracht sind. Beispielsweise zeigt [Fig. 2](#) eine Sagnac-Sensoranordnung **210** mit N Hydrophonen **212(1)**, **212(2)** ... **212(N)** in jeweiligen Sprossen **216(1)**, **216(2)** ... **216(N)**. Jede Sprosse **216(i)** in der Sagnac-Sensoranordnung **210** umfaßt eine einzelne Faser, die um ein jeweiliges Hydrophon **212(i)** gewickelt ist. Jeder Weg von einem 3×3 -Koppler **220** durch die Verzögerungsschleife **214** und die Anordnung **210** und zurück zum Koppler **220** umfaßt ein gesondertes Sagnac-Interferometer. Deshalb sind bei einer Anordnung von N Sensoren **212N** gesonderte Sagnac-Interferometer vorhanden, von denen sich jedes wie der Sagnac-Sensor mit einer Schleife **100** verhält, der in [Fig. 1](#) gezeigt ist. Jedes Sagnac-Interferometer mißt das akustische Signal an einem gesonderten Punkt im Raum, das heißt, an der Stelle des Hydrophons **212(i)**. Beispielsweise mißt das Sagnac-Interferometer mit der Verzögerungsschleife **214** und der Sprosse **216(1)** das akustische Signal im Hydrophon **212(1)**. Außerdem nimmt jedes Sagnac-Interferometer akustische Signale (zum Beispiel Rauschen) an anderen Stellen in der Schleife auf, wobei dieses Rauschen vorteilhaft reduziert wird, wie nachstehend beschrieben wird.

[0048] Die Sagnac-Sensoranordnung **200** ist am besten in einer Zeitmultiplex-(TDM-)Konfiguration zu verstehen (Nicht-TDM-Schemen werden später beschrieben). Eine Quelle **222** (die vorteilhaft eine herkömmliche pulsierende Quelle umfassen kann oder eine Dauerstrich-Quelle mit einem externen Modulator umfassen kann) erzeugt einen Lichtimpuls, der über einen dritten Anschluß des Kopplers **220** in die Sagnac-Schleife eintritt und sich sowohl in der CW- als auch in der CCW-Richtung ausbreitet, wie in [Fig. 2](#) gezeigt. Nach Erreichen

der Anordnung **210** wird der CCW-Impuls in eine Kette von N getrennten Impulsen geteilt. An diesem Punkt hat der CW-Eingangsimpuls noch nicht die Anordnung **210** erreicht und ist noch ein Einzelimpuls. Wenn der CW-Impuls die Anordnung **210** erreicht, wird auch er in eine Kette von N Impulsen geteilt. Jeder Impuls in der CW-Kette kehrt zum 3×3 -Koppler **220** nach dem Durchlaufen einer jeweiligen Sprosse **216(i)** zurück und interferiert mit dem Impuls der CCW-Kette, der die gleiche Sprosse **216(i)** in entgegengesetzter Richtung durchlaufen hat. Es werden also N Impulse von einem ersten Detektor **230** und von einem zweiten Detektor **232** detektiert, und jeder Impuls umfaßt den CW- und den CCW-Impuls einer der N Sagnac-Schleifen (das heißt, die beiden Impulse, die in entgegengesetzten Richtungen die gleiche jeweilige Sprosse **216(i)** durchlaufen haben). Da die Impulse, die verschiedene Kombinationen von Sprossen durchlaufen, keine identischen optischen Wege durchlaufen, fallen solche Impulse nicht zeitlich am Koppler **220** zusammen und interferieren somit nicht miteinander im Koppler **220**. Die Impulsbreiten sollten kleiner sein als die Differenzialverzögerung zwischen benachbarten Sensoren, so daß die Impulse von benachbarten Sensoren nicht überlappen.

[0049] Wie in [Fig. 3](#) dargestellt, werden erbiumdotierte Faserverstärker (EDFAs) mit niedriger Verstärkungsleistung **240** dem Sensoranordnungsabschnitt **210** vorteilhafter hinzugefügt, so wie die EDFAs den Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnungen hinzugefügt worden sind. (Siehe beispielsweise Craig W. Hodgson et al., Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers – Part I: Signal-to-Noise Ratio, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 16, Nr. 2, Februar 1998, S. 218–223; Craig W. Hodgson et al., Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers – Part II: Pump Power, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 16, Nr. 2, Februar 1998, S. 224–231; Jefferson L. Wagener et al., Novel Fiber Sensor Arrays Using Erbium-Doped Fiber Amplifiers, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 15, Nr. 9, September 1997, S. 1681–1688; und C. W. Hodgson et al., Large-scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers, OPTICS LETTERS, Vol. 22, Nr. 21, 21. November 1997, S. 1651–1653) Die EDFAs **240** erhöhen die Anzahl der Sensoren, die durch eine einzelne Anordnung **210** unterstützt werden können, indem die Signalleistung, die durch Koppl- und Leistungsverluste verloren geht, regeneriert wird. Die EDFAs werden vorteilhaft von einer oder mehreren Pumpaserquellen **242** über einen Teilungskoppler **244** und über einen ersten Wellenlängenmultiplex-(WDM-)Koppler **246** und einen zweiten WDM-Koppler **248** gepumpt.

[0050] Da die Sagnac-Sensoranordnung **200** die Sagnac-Architektur nutzt, hat sie alle Vorteile des oben beschriebenen Einzelschleifen-Sagnac-Sensors **100**. Die Common-Path-Ausführung macht die Umwandlung des Quellphasenrauschens in ein Intensitätsrauschen im interferierenden Koppler **220** überflüssig. Die Quelle **222** kann eine Faser-ASE-(verstärkte Spontanemissions-)Quelle sein, (nämlich die oben beschriebene SFS), die preiswert bei $1,55 \mu\text{m}$ hohe Leistungen bereitstellt. Eine passive Versetzung in die Nähe der Quadratur ist für alle Sensoren unter Verwendung des 3×3 -Kopplers **220** erreichbar. Außerdem stellt der 3×3 -Koppler **220** eine bequeme Einrichtung dar, um zwei Interferometer-Ausgangssignale in den Detektoren **230**, **232** zu detektieren und die Ausgangssignale der beiden Detektoren zu benutzen, um Quellenzusatzrauschen zu subtrahieren. (Siehe beispielsweise K. Kråkenes et al., Sagnac interferometer for underwater sound detection: noise properties, OPTICS LETTERS, Vol. 14, 1989, S. 1152–1154, wo die Verwendung von zwei Detektoren in Kombination mit einem einzelnen Sagnac-Interferometer gezeigt wird.)

[0051] Die Eigenschaften dieser neuartigen Sagnac-Sensoranordnung **200** wird nachstehend im einzelnen beschrieben, gefolgt von einer ausführlicheren Beschreibung des Frequenzverhaltens und des dynamischen Bereichs, die auf die Verwendung eines Sagnac-Interferometers zurückzuführen sind. Danach wird eine Berechnung der Stärke der verteilten Aufnahme durch die hydrophonlosen Faserschleifensegmente zusammen mit einer Technik zur Reduzierung dieser Erfassungssstärke beschrieben. Die Polarisation wird auch nachstehend beschrieben. Neue Rauschquellen, die durch die Sagnac-Ausführung entstehen, werden dann beschrieben. Schließlich werden andere Multiplex-Schemen als TDM für die Sagnac-Sensoranordnung dargestellt.

[0052] Obwohl die Sagnac-Sensoranordnung oben mit Bezug auf einen einzelnen Sensor in jeder Sprosse **216(i)** der Anordnung **210** beschrieben wird, ist verständlich, daß jede Sprosse **216(i)** vorteilhafterweise eine Unteranordnung mit mehreren Sensoren umfassen kann, wie beispielsweise in WO-A-98 02 898, angemeldet am 11. März 1997, beschrieben. (Siehe auch C. W. Hodgson et al., Large-scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers, Optics Letters, Vol. 22, 1997, S. 1651–1653; J. L. Wagener et al., Novel fiber sensor arrays using erbium-doped fiber amplifiers, Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, 1997, S. 1681–1688; C. W. Hodgson et al., Optimization of large-scale fiber sensor arrays incorporating multiple optical amplifiers, Part I: signal-to-noise ratio, Journal of Lightwave Technology, Vol. 16, 1998, S. 218–223; und C. W. Hodgson et al., Optimization of large-scale fiber sensor arrays incorporating multiple optical amplifiers, Part II: pump power, Journal of Lightwave Technology, Vol. 16, 1998, S. 224–231)

[0053] Wie oben ausgeführt, hat der Sagnac-Sensor ein frequenzabhängiges Verhalten, das in der Gleichung 1 gegeben ist. Bei Frequenzen weitgehend unter der Eigenfrequenz der Schleife, die als $1/(2 \cdot T_{\text{delay}})$ definiert ist, verändert sich das kleinste detektierbare akustische Signal mit dem Kehrwert der akustischen Frequenz. Diese verringerte akustische Ansprechempfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen ist ein Hauptanliegen für den Sagnac-Schallsensor. Es ist jedoch bereits ausgeführt worden, daß diese verringerte Ansprechempfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen glücklicherweise ausgeglichen wird durch ein zunehmendes Grundrauschen des Ozeans (Siehe beispielsweise Sverre Knudsen, Ambient and Optical Noise in Fiber-Optic Interferometric Acoustic Sensors, Fiber-Optic Sensors Based on the Michelson and Sagnac Interferometers: Responsivity and Noise Properties, Thesis, Chapter 3, Norwegian University of Science and Technology, 1996, S. 37–40) Im Idealfall wäre erwünscht, wenn das kleinste detektierbare akustische Signal einer Sensoranordnung bei einer gegebenen Frequenz ein konstanter Betrag unter dem Ozeangrundrauschen bei dieser Frequenz wäre. Das kleinste detektierbare akustische Signal würde also bei niedrigeren Frequenzen größer werden, um sich an das zunehmende Ozeangrundrauschen anzupassen. Das Frequenzverhalten der Sagnac-Sensoranordnung **200** stellt also eine gute Übereinstimmung zwischen dem Ozeangrundrauschen und der akustischen Ansprechempfindlichkeit her. Dies ist in [Fig. 4](#) dargestellt, wo das kleinste detektierbare akustische Signal für eine Sagnac-Sensoranordnung als Kurve **250** dargestellt ist, wobei ein optisches Grundrauschen von $10 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, eine Hydrophonphasenansprechempfindlichkeit von $3,2 \times 10^{-7} \text{ rad}/\mu\text{Pa}$ und eine Verzögerungsschleifenlänge von 20 km angenommen wird. (Die vertikale Achse ist in dB relativ zu einer Basislinie von $1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ bemessen.) Außerdem sind in [Fig. 4](#) dargestellt die Ozeangrundrauschwerte für die drei dominanten Ozeanrauschquellen bei diesen Frequenzen und eine resultierende Summe des Rauschens von den drei Quellen. Eine Kurve **252** stellt das Rauschen durch die Ozeanturbulenz, Erdbeben, vulkanische Eruptionen und dergleichen dar. Eine Kurve **253** stellt leichte Schifffahrtsgeräusche dar. Eine Kurve **254** stellt DSS0-(entferntes Schiffsverkehr- und Sturm-)Rauschen dar. Eine Kurve **256** stellt die Summe aus den Grundrauschwerten von den drei dominanten Quellen dar (das heißt, die Summe aus den Kurven **252**, **253** und **254**). (Siehe beispielsweise Robert J. Urick, The noise background of the sea: ambient noise level, Principles of Underwater Sound, 3. Ed., Kapitel 7, McGraw-Hill, 1983, S. 202–236). Das kleinste detektierbare akustische Signal der Sagnac-Sensoranordnung **200** verstärkt sich derartig, daß eine nahezu konstante Größe eines detektierbaren Signals unter dem Ozeangrundrauschen bei allen Frequenzen unter 10 kHz entsteht. Das frequenzabhängige Verhalten der Sagnac-Sensoranordnung **200** verhindert also nicht die akustische Niedrigfrequenzdetektion. Die Mach-Zehnder-Anordnung zeigt die gleiche Tendenz wie die Sagnac-Sensoranordnung, nämlich eine sich verringemde Ansprechempfindlichkeit in Richtung der niedrigeren Frequenzen, aber in der Mach-Zehnder-Anordnung ist die abnehmende Ansprechempfindlichkeit kleiner als im Sagnac-Sensor.

[0054] Obwohl sowohl die Mach-Zehnder-Interferometer als auch die Sagnac-Sensoranordnung **200** ähnliche frequenzabhängige Verhaltensweisen haben, ist die Quelle ihrer Frequenzverhaltensweisen fundamental anders. Das größer werdende kleinste detektierbare Signal in der Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung ist auf ein zunehmendes optisches Grundrauschen zurückzuführen. Die Ursache für dieses zunehmende optische Grundrauschen ist das Phasenrauschen, das durch das Mach-Zehnder-Interferometer mit unsymmetrischen Weglängen entsteht. Obwohl das Grundrauschen bei 10 kHz $10 \text{ mrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ist, erhöht es sich also in Richtung der niedrigeren Frequenzen. In der Sagnac-Sensoranordnung **200** ist das größer werdende kleinste detektierbare akustische Signal auf den Term $\sin(\Omega T_{\text{delay}}/2)$ in der Gleichung 1 und nicht auf ein größer werdendes optisches Grundrauschen zurückzuführen. Das optische Grundrauschen bleibt über den gesamten Frequenzbereich konstant $10 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$.

[0055] Die Bedeutung dieser Differenz kann man erkennen, wenn man den dynamischen Bereich der Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung und der Sagnac-Sensoranordnung **200** untersucht, der in [Fig. 5](#) dargestellt ist. Der dynamische Bereich eines Sensors wird durch die kleinste und größte detektierbare Phasenverschiebung begrenzt. Bei Interferometer-Sensoren ist die größte detektierbare Phasenverschiebung durch das nichtlineare Frequenzverhalten des Interferometers und die kleinste detektierbare Phasenverschiebung durch das optische Grundrauschen begrenzt. Sowohl die Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung als auch die Sagnac-Sensoranordnung haben größte detektierbare Phasenverschiebungen, die über den akustischen Frequenzbereich konstant sind. Die Sagnac-Sensoranordnung **200** hat jedoch auch eine flache kleinste detektierbare Phasenverschiebung, da sie ein weißes optisches Grundrauschen hat, während die Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung einer zunehmenden kleinsten detektierbaren Phasenverschiebung ausgesetzt ist, die auf ein zunehmendes optisches Grundrauschen zurückzuführen ist, das durch das Phasenrauschen bewirkt wird, das durch das Interferometer mit Weglängenunsymmetrie entsteht. Die Sagnac-Sensoranordnung **200** hat also bei allen akustischen Frequenzen einen konstanten dynamischen Bereich, während die Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung bei niedrigen akustischen Frequenzen ei-

nen verringerten dynamischen Bereich hat. Dies ist in [Fig. 5](#) dargestellt, wobei das kleinste und größte detektierbare akustische Signal (in willkürlichen dB-Einheiten) für die Sagnac-Sensoranordnung **200** und eine Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung dargestellt sind. Wie in [Fig. 5](#) gezeigt, haben beide Anordnungen oberhalb 1 kHz einen dynamischen Bereich von annähernd 100 dB, wo das Phasenrauschen die Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung nicht begrenzt. Bei 10 Hz dominiert das Phasenrauschen die Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung, und ihr dynamischer Bereich wird auf annähernd 74 dB reduziert. Dazwischen verbleibt der dynamische Bereich der Sagnac-Sensoranordnung **200** bei etwa 100 dB.

[0056] Es ist interessant, das Frequenzverhalten der Sagnac-Sensoranordnung **200** bei Frequenzen weitgehend unter der Eigenfrequenz der Schleife als eine Funktion der Verzögerungsschleifenlänge und der Hydrophonansprechempfindlichkeit zu untersuchen. Bei diesen Frequenzen kann der Faktor $\sin(\Omega T_{\text{delay}}/2)$ in Gleichung 1 näherungsweise als $\Omega T_{\text{delay}}/2$ dargestellt werden, was zeigt, daß die Ansprechempfindlichkeit der Sagnac-Sensoranordnung **200** proportional zum Produkt aus ϕ_h und T_{delay} ist. ϕ_h selbst ist proportional zur Faserlänge in jedem Hydrophon **212(i)**, und T_{delay} ist proportional zur Faserlänge in der Verzögerungsschleife **214**. Die Ansprechempfindlichkeit bei Frequenzen weitgehend unter der Eigenfrequenz der Schleife ist also proportional zum Produkt aus der Hydrophonfaserlänge und der Verzögerungsfaserlänge. [Fig. 6](#) zeigt das kleinste detektierbare akustische Signal für mehrere Sagnac-Sensoranordnungs-konfigurationen, bei denen das Produkt aus der Länge der Faser in jedem Hydrophon **212(i)** und der Länge der Faser in der Verzögerungsschleife **214** konstant ist, aber die relative Verteilung der Faser zwischen der Verzögerungsschleife **214** und jedem Hydrophon **212(i)** sich ändert. Beispielsweise stellt eine Kurve **260** das Frequenzverhalten einer Sagnac-Sensoranordnung **200** mit 45 km Faser in ihrer Verzögerungsschleife **214** und 100 Meter Faser in jedem Hydrophon **212(i)** dar; eine Kurve **262** stellt das Frequenzverhalten einer Sagnac-Sensoranordnung **200** mit 30 km Faser in ihrer Verzögerungsschleife **214** und 150 Meter Faser in jedem Hydrophon **212(i)** dar; und eine Kurve **264** stellt das Frequenzverhalten einer Sagnac-Sensoranordnung **200** mit 15 km Faser in ihrer Verzögerungsschleife **214** und 300 Meter Faser in jedem Hydrophon **212(i)** dar. Wie dargestellt hat jede Sagnac-Sensoranordnung **200** die gleiche Ansprechempfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen, nähert sich jedoch einer höchsten Ansprechempfindlichkeit bei verschiedenen Frequenzen, die durch die jeweiligen Eigenfrequenzen der Schleife gegeben sind. Bei einem gegebenen kleinsten detektierbaren akustischen Signal bei niedrigen Frequenzen besteht dennoch eine bestimmte Freiheit in der Wahl der Faserlängen der Verzögerungsschleife **214** und der Hydrophone **212(i)**. Diese Freiheit kann mit dazu dienen, daß die Sagnac-Sensoranordnung **200** weitere Kriterien erfüllt, zum Beispiel die Minimierung der Gesamtmenge der erforderlichen Faser oder die Minimierung der Verzögerungsschleifenlänge.

ERHÖHUNG DES DYNAMISCHEN BEREICHS DER SAGNAC-SENSORANORDNUNG

[0057] Wie oben beschrieben hat die Sagnac-Sensoranordnung **200** bei niedrigen akustischen Frequenzen einen größeren dynamischen Bereich als die Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung, da sie gegen Phasenrauschen immun ist. Im Idealfall weist eine Sensoranordnung **200** einen ausreichenden dynamischen Bereich auf, um die stärksten und schwächsten akustischen Signale zu detektieren, die mit bestimmter Wahrscheinlichkeit auftreten. Diese Anforderung führt häufig zu einem erforderlichen dynamischen Bereich von annähernd 150 dB. Um einen solchen dynamischen Bereich in einer Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung zu erreichen, sind zwei getrennte Sensoren mit verschiedenen Phasenansprechempfindlichkeiten erforderlich, wobei jeder einen Bruchteil des gesamten dynamischen Bereichs von 150 dB detektiert. Der offensichtliche Nachteil dieses Schemas besteht darin, daß es zwei Sensoranordnungen (das heißt zweimal so viele Hydrophone, Sprossen, Quellen und Detektoren) erfordert. Im Endeffekt kann eine Anordnung, die N Hydrophone unterstützen kann, das akustische Signal nur an N/2 Punkten detektieren.

[0058] In der Sagnac-Sensoranordnung **200** ist es möglich, einen großen dynamischen Bereich zu erreichen, ohne zusätzliche Hydrophone **212** zu verwenden. Da die Phasenansprechempfindlichkeit in der Sagnac-Sensoranordnung eine Funktion des Hydrophonansprechverhaltens und der Verzögerungsschleifenlänge ist, wie in Gleichung 1 gezeigt, kann das Phasenansprechverhalten der gesamten Anordnung von Hydrophonen dadurch geändert werden, daß die Verzögerungsschleifenlänge modifiziert wird. Durch gleichzeitige Verwendung von zwei getrennten Verzögerungsschleifen **214(1)** und **214(2)** der Länge L_1 beziehungsweise L_2 , wie in einer modifizierten Sensoranordnung **266** in [Fig. 7](#) gezeigt, kann der Detektionsbereich der Anordnung **266** dramatisch erhöht werden. Die Anordnung **266** hat nun 2N gesonderte Sagnac-Schleifen. Jedes Hydrophon **212(i)** sendet ein gesondertes Signal für jede der beiden Verzögerungsschleifenwege zurück, und die Länge jeder Verzögerungsschleife **214(1)**, **214(2)** bestimmt den Schalldetektionsbereich dieses Signals. Der gesamte Schalldetektionsbereich jedes Hydrophons **212(i)** ist die Vereinigung der Detektionsbereiche jedes der beiden Sagnac-Schleifen-Sensoren, die das Hydrophon **212(i)** einschließen. Die Längen von L_1 und L_2 legen den Schalldetektionsbereich fest. Die Längen $L_1 + L_2$ sind so gewählt, daß die Anordnung **266** das kleinste akusti-

sche Signal von Interesse detektieren kann. Die Länge L_1 der Verzögerungsschleife **214(1)** wird dann gewählt, um den Detektionsbereich der Signale, die nur diese kürzere Verzögerungsschleife im oberen Teil des Detektionsbereichs der Signale durchlaufen, die beide Verzögerungsschleifen **214(1)**, **214(2)**, durchlaufen, festzulegen. In einem TDM-System wird im Ergebnis des Einfügens einer zweiten Schleife die Wiederholfrequenz der Quellenimpulse halbiert, um Zeit zu gewinnen, damit $2N$ Impulse zurückkehren können, und die Längen der Verzögerungsschleifen **214(1)**, **214(2)** werden so gewählt, daß keine Impulsüberlappung auftritt. Da die Wiederholfrequenz halbiert wird, verringert sich der dynamische Bereich jedes einzelnen Signals um 3 dB. Diese Verringerung wird durch die Erhöhung des gesamten dynamischen Bereichs, die durch Aufsatteln des dynamischen Bereichs der beiden getrennten Signale erreicht wird, mehr als ausgeglichen. In [Fig. 7](#) ist die zweite Verzögerungsschleife **214(2)** so positioniert, daß das gesamte Licht, das die zweite Verzögerungsschleife **214(2)** durchläuft, die erste Verzögerungsschleife **214(1)** durchläuft. Es versteht sich, daß als Alternative die beiden Verzögerungsschleifen **214(1)**, **214(2)** derartig optisch parallel sein können, daß das Licht, das die zweite Verzögerungsschleife **214(2)** durchläuft, nicht die erste Verzögerungsschleife **214(1)** durchläuft. In einem solchen Fall müßte die Faserlänge der zweiten Verzögerungsschleife **214(2)** die Summe der ersten Länge und der zweiten Länge (das heißt $L_1 + L_2$) sein. Aber da L_1 beträchtlich kürzer ist als L_2 , ist diese Anpassung nicht wesentlich. Die Ausführungsform in [Fig. 7](#) reduziert die Gesamtfaseranforderungen dadurch, daß die Länge der ersten Verzögerungsschleife zur zweiten Verzögerungsschleife hinzuaddiert wird.

[0059] [Fig. 8](#) stellt den erweiterten dynamischen Bereich dar, der dadurch ermöglicht wird, daß die beiden Verzögerungsschleifen **214(1)**, **214(2)** in der Sensoranordnung **266**, in der der dynamische Bereich jedes Signals 100 dB ist und das Verhältnis L_1/L_2 auf 5000 festgelegt ist. Wie dargestellt ist die Sensoranordnung **266** nunmehr in der Lage, über den gesamten dynamischen Bereich von Interesse (annähernd ein Bereich von 160 dB) ohne Erhöhung der Hydrophonanzahl zu delektieren.

VERTEILTE ERFASSUNG

[0060] In der Sagnac-Sensoranordnung **266** kann jede Phasenmodulation im Interferometer in eine Intensitätsmodulation in dem interferierenden 3×3 -Koppler **220** übertragen werden. Diese verteilte Erfassung über die gesamte Sagnac-Schleife ist für eine Schallsensoranordnung nachteilig. Um praktisch zu sein, sollte die Schallsensoranordnung das akustische Signal an einer Anzahl von diskreten Punkten im Raum (das heißt, in den Hydrophonen) abtasten und diese Signale unabhängig zurücksenden. Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnungen erreichen dies, da das Interferometer auf einen kleinen Raum begrenzt ist und daher nur an diesem Punkt erfaßt. Damit die Sagnac-Sensoranordnung **266** praktisch ist, muß die verteilte Erfassung der Sagnac-Schleife verringert werden.

[0061] Die große Masse der Faser im Interferometer bildet die Verzögerungsschleife **214**, die an zwei Positionen lokal angeordnet sein kann. Die erste ist an der Quelle **222** und der Detektionselektronik (das heißt der Detektor **230** und der Detektor **232**) im trockenen Ende (das heißt außerhalb des Wassers), wie in [Fig. 9A](#) gezeigt. Hier kann die Verzögerungsschleife **214** gegen die Umwelt abgeschirmt werden, um jede externe Modulation zu minimieren. Jedoch die Zuführungsfasern **270**, **272**, die das feuchte Ende mit dem Sensoranordnungsabschnitt **210** verbinden, sind Teil des Interferometers. Die zweite Möglichkeit besteht darin, die Verzögerungsschleife **214** im feuchten Ende (das heißt im Wasser) mit der Sensoranordnung **210** anzuordnen, wie in [Fig. 9B](#) gezeigt. Dabei kann die Verzögerungsschleife **214** nicht im gleichen Maße getrennt werden, wie sie es könnte, wenn sie im trockenen Ende angeordnet wäre, aber die Zuführungsfasern **270**, **272**, **274** sind außerhalb des Interferometers und führen somit keine Erfassung durch. Die relative Größe der zuführungs- und verzögerungsschleifenverteilten Aufnahme bestimmt, welche Konfiguration für eine bestimmte Anwendung am besten geeignet ist. Man beachte, daß, wenn die Verzögerungsschleife **214** im trockenen Ende angeordnet ist ([Fig. 9A](#)), die Zuführungsfasern **270**, **272** stationär bleiben müssen, um physische Bewegungen, zum Beispiel Biegen und Vibrationen, dieser Fasern zu verhindern, was extrem große Phasenmodulationen bewirken kann. Dies sind faserbewegungsbedingte Phasenmodulationen im Gegensatz zu akustisch bedingten Phasenmodulationen. (Solche physischen Bewegungen stellen Probleme in verlauten Sensoranordnungen dar, können aber keine wesentlichen Probleme in stationären Sensoranordnungen darstellen.) Wenn also die Verzögerungsschleife **214** im trockenen Ende angeordnet ist ([Fig. 9A](#)), muß das gesamte nasse Ende der Sagnac-Sensoranordnung **210** stationär sein. Bei der Verzögerungsschleife **214**, die im nassen Ende angeordnet ist ([Fig. 9B](#)), muß jedoch nur der Abschnitt rechts von dem 3×3 -Koppler **220** in [Fig. 9B](#) stationär bleiben, da die Zuführungsfasern **270**, **272**, **274** dann nicht Teil des Interferometers sind. Wenn die Verzögerungsschleife **214** sich im nassen Ende befindet ([Fig. 9B](#)), muß die Verzögerungsschleifenfaser desensibilisiert werden. Die Verzögerungsschleife **214** kann stationär gemacht werden, indem die Verzögerungsschleifenfasern um einen desensibilisierten Zylinder (nicht dargestellt) gewickelt werden, wodurch Faserbewegung ausgeschlossen wird und die Schallaufnahme zur dominanten Quelle des verteilten Aufnahmesignals wird. Da es einfacher ist, die

Faser gegen akustisch bedingte Phasenmodulation zu desensibilisieren als die Faser gegen bewegungsbedingte Phasenmodulation zu desensibilisieren, ist die Konfiguration, mit der die Verzögerungsschleife **214** im nassen Ende angeordnet ist ([Fig. 9B](#)), vorzugsweise für verlaute Sensoranordnungsanwendungen geeignet und wird nachstehend ausführlicher beschrieben.

BERECHNUNG DES IN DER VERZÖGERUNGSSCHLEIFE INDUZIERTEN SCHALLAUFNAHMERAUSCHENS

[0062] In diesem Abschnitt werden Schätzungen für die Größe des akustisch induzierten verteilten Aufnahmeherauswechsels im Vergleich zu der akustisch induzierten Hydrophonphasenmodulation in der Sagnac-Sensoranordnung **210** in [Fig. 9\(b\)](#) abgeleitet. Die Intensitätsmodulation, die auf die verteilten Phasenmodulationen zurückzuführen ist, die durch die Aufnahme von akustischen Signalen in der Verzögerungsschleife und in der Busfaser (die Faser, die jedes Hydrophon mit der Verzögerungsschleife und dem 3 × 3-Koppler verbindet) entstehen, kann als eine Rauschquelle angesehen werden. In der nachstehenden Beschreibung betrachten wir eine Schleife der Sagnac-Sensoranordnung, als wenn sie nur eine Verzögerungsfaser der Länge L_d , eine Busfaser der Länge L_b , eine Hydrophonfaser der Länge L_h und eine Gesamtlänge L hätte, wie in [Fig. 10](#) gezeigt. Wir nehmen außerdem an, daß L_d viel größer ist als L_b und L_h . Die Phasenansprechempfindlichkeit der Faser auf akustische Signale ist zurückzuführen auf eine druckabhängige Ausbreitungskonstante β . Im allgemeinen kann die druckabhängige Komponente der Ausbreitungskonstante an einer Position 1 und zu einer Zeit t folgendermaßen beschrieben werden:

$$\beta(l, t) = \beta_0 R(l) P(l, t) \quad (2)$$

wobei β_0 die Nulldruck-Ausbreitungskonstante ist, $R(l)$ die normierte Phasenansprechempfindlichkeit der Faser und $P(l, t)$ der Druck als Funktion von Raum und Zeit. Wenn ein akustisches Sinussignal der Frequenz Ω angenommen wird, kann die Gleichung 2 folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$\beta(l, t) = \beta_0 R(l) [P_0 + P_m \sin(\Omega t + \theta(t))] \quad (3)$$

wobei P_0 der Beharrungsdruck ist, P_m die Amplitude der Druckmodulation (als unabhängig von 1 angenommen) und $\theta(l)$ die Raumphasenschwankung der Schallwelle enthält. Im allgemeinen ist die induzierte Phasendifferenz zwischen interferierenden Strahlen in einer Sagnac-Schleife infolge akustisch induzierter Phasenmodulation von $l = l_1$ bis $l = l_2$ durch das folgende Integral gegeben:

$$\phi_{int}(t) = \int_{l_1}^{l_2} \left[\beta \left(l, t + \frac{(l - l_1)}{v} \right) - \beta \left(l, t - \frac{l}{v} \right) \right] dl \quad (4)$$

wobei v die Geschwindigkeit des Lichts in der Faser ist und L die Schleifenlänge. Wenn man Gleichung 3 in Gleichung 4 einsetzt, ergibt sich:

$$\phi_{int}(t) = \beta_0 P_m \int_{l_1}^{l_2} R(l) \left[\sin \left(\Omega \left(t + \frac{l - l_1}{v} \right) + \theta(l) \right) - \sin \left(\Omega \left(t - \frac{l}{v} \right) + \theta(l) \right) \right] dl \quad (5)$$

[0063] Gleichung 5 kann verwendet werden, um die Phasendifferenz zwischen interferierenden Strahlen infolge der akustischen Modulation des Hydrophons, des Busses und der Verzögerungsfasern zu bestimmen.

[0064] Für die Hydrophonfaser wird die Gleichung 5 von $l_1 = l_d + l_b/2$ bis $l_2 = l_d + l_b/2 + l_h$ integriert. Es wird angenommen, daß $\theta(l)$ über diesen Bereich konstant ist (nämlich daß die Schallwellenlänge viel größer ist als die Abmessung des Hydrophons). Es wird ebenfalls angenommen, daß die normierte Phasenansprechempfindlichkeit der Faser $R(l)$ konstant ist und in diesem Bereich gleich R_h ist. Die Gleichung 5 ergibt dann eine Phasendifferenzamplitude zwischen interferierenden Strahlen infolge der Hydrophonfasermodulation:

$$\phi_{int}^h = 2 \beta_0 R_h P_m L_h \sin \left(\frac{\Omega \cdot T_{delay}}{2} \right) \quad (6)$$

wobei angenommen wird, daß $\Omega L_h/2v \ll 1$ ist. Man beachte, daß die Gleichung 2 mit dem Ausdruck übereinstimmt, der in Gleichung 1 gegeben ist.

[0065] Für die Busfaser wird die Gleichung 5 zunächst von $l_1 = l_d$ bis $l_2 = l_d + l_b/2$ integriert und dann von $l_1 = L - l_b/2$ bis $l_2 = L$, um sowohl die oberen als auch die unteren Busleitungen einzuschließen. Wie bereits ausgeführt, wird angenommen, daß $R(l)$ konstant ist und für alle Busfasern gleich R_b , so daß $\theta(l)$ im Integral der Gleichung

chung 5 konstant ist. Die Phasendifferenzamplitude zwischen interferierenden Strahlen infolge der Fasermodulation ist dann folgende:

$$\phi_{int}^h = 2\beta_0 R_b P_m L_b \sin\left(\frac{\Omega T_{delay}}{2}\right) \quad (7)$$

wobei angenommen wird, daß $\Omega L_h/2v \ll 1$ ist. Es muß betont werden, daß durch die Annahmen über die Konstanz von $\theta(l)$ und die Amplitude von $\Omega L_h/2v$ eine Erhöhung von ϕ_{int}^b erfolgt, wobei sich ein Szenario des schlimmsten Falles für die Busfaser ergibt.

[0066] Für die Faserlaufzeitverzögerung wird die Gleichung 5 von $l_1 = 0$ bis $l_2 = l_d$ integriert, und wie oben wird angenommen, daß $\theta(l)$ über diesen Bereich konstant ist (nämlich die Verzögerungsschleifenwicklung viel kleiner ist als die Schallwellenlänge) und daß $R(l)$ konstant ist und über das Integral gleich R_d ist. Die Gleichung 5 ergibt dann eine Phasendifferenzamplitude zwischen interferierenden Strahlen infolge der Verzögerungsfasermodulation, die gegeben ist durch:

$$\phi_{int}^d = 2\beta_0 R_d P_m (L - L_d) \sin\left(\frac{\Omega T_{delay}}{2}\right) = 2\beta_0 R_d (L_b + L_h) \sin\left(\frac{\Omega T_{delay}}{2}\right) \quad (8)$$

wobei angenommen wird, daß $\Omega(L_b + L_h)/2v \ll 1$ ist.

[0067] Bei den Gleichungen 6 bis 8 kann die relative Größe dieser Phasenmodulationsamplituden berechnet werden. Zunächst ist zu beachten, daß eine kunststoffbeschichtete Standardfaser eine normierte Phasenansprechempfindlichkeit R von -328 dB bezogen auf $1/\mu\text{Pa}$ hat, wie beispielsweise beschrieben in J. A. Bucaro et al., Optical fibre sensor coatings, Optical Fiber Sensors, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, 1986, S. 321–338. Andererseits hat, wie beispielsweise beschrieben in C. C. Wang et al., Very high responsivity fiber optic hydrophones for commercial applications, Proceedings of the SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 2360, 1994, S. 360–363, eine Faser, die um derzeit gebräuchliche Hydrophone gewickelt ist, die aus einem Luftkern bestehen, eine normierte Phasenansprechempfindlichkeit von -298 dB bezogen auf $1/\mu\text{Pa}$, eine Erhöhung von 30 dB über der normalen Faser. Wenn wir annehmen, daß die Verzögerungsschleife und die Busfaser die normierte Phasenansprechempfindlichkeit einer kunststoffbeschichteten Standardfaser haben und daß die Hydrophonfaser um einen Luftkern gewickelt ist, dann ist das Verhältnis zwischen R_b und R_b oder R_d annähernd 30 dB. Somit kann unter der vereinfachenden Annahme, die aufgestellt wird, um die Gleichungen 6–8 aufzustellen, festgestellt werden, daß folgendes gilt:

$$\frac{\phi_{int}^h}{\phi_{int}^d} \approx \left(\frac{31}{1 + (L_b / L_h)} \right) \quad (9)$$

und

$$\frac{\phi_{int}^h}{\phi_{int}^b} \approx \left(\frac{31}{L_b / L_h} \right) \quad (10)$$

[0068] Das Verhältnis L_b/L_h ist eine Funktion der Hydrophonposition. Für die erste Hydrophonposition gilt: $L_b/L_h \approx 0$, was $\phi_{int}^h/\phi_{int}^d \approx 31$ und $\phi_{int}^h/\phi_{int}^b$ extrem groß macht. Für das letzte Hydrophon werden typische Werte von 100 Metern und 1 km für L_h beziehungsweise L_b verwendet, um $\phi_{int}^h/\phi_{int}^d \approx \phi_{int}^h/\phi_{int}^b \approx 3$ zu erreichen. Trotz der Tatsache, daß die Hydrophonfaser eine relativ kleine Menge der gesamten Sagnac-Schleife bildet, ist also die Größe der akustisch induzierten Phasenmodulationen in der Hydrophonfaser selbst für das am weitesten entfernte Hydrophon größer als die der akustisch induzierten Phasenmodulationen in der Verzögerungsschleifenfaser und in der Busfaser. Der folgende Teil beschreibt ein Mittel zur Bearbeitung dieses Pegels des verteilten Aufnahmehäusens unter Verwendung leerer Sprossen.

[0069] Um das Integral in der Gleichung 5 für die Verzögerungsschleifenfaser zu bewerten, wird angenommen, daß für alle l , die kleiner sind als L_d , gilt: $R(l) = R_d$. Diese Konstanz von $R(l)$ beseitigte jeden Beitrag zum Integral der Gleichung 5 von $l = (L - L_h)$ bis L_d (da der Integrand eine ungerade Funktion um $L/2$ ist). Das Aufwickeln einer langen Länge der Faser führt jedoch zu einer bestimmten Abhängigkeit bei $R(l)$ von l (möglicherweise da die Innenschicht der Faser einen anderen R hat als die Außenschicht). Diese Schwankungen von $R(l)$ erhöhen die Verzögerungsschleifenaufnahme von $l = L - L_d$ bis L_d . Um diese Aufnahme zu reduzieren, wird zunächst festgestellt, daß $R(l)$ nur eine gerade Funktion um $L/2$ sein muß, um den Integrand von Gleichung 5 zu einer ungeraden Funktion von etwa $L/2$ zu machen. $R(l)$ kann gezwungen werden, symmetrischer um $L/2$ zu sein, indem die Verzögerungsschleife so gewickelt wird, daß sie symmetrische Punkte der Faserschleife in

nächster Nähe zueinander positioniert, wie in [Fig. 11](#) gezeigt. Dieses Aufwickeln stellt sicher, daß symmetrische Punkte der Verzögerungsschleife in der Nähe zueinander so positioniert werden, daß alle Schwankungen von $R(l)$ infolge der Position der Faser auf der Spule so symmetrisch wie möglich um $L/2$ sind, wodurch die Verzögerungsschleifenaufnahme so nahe wie möglich an den Ausdruck von Gleichung 8 gebracht wird. Man beachte folgendes: Da jede Sagnac-Schleife in der Sagnac-Sensoranordnung einen anderen $L/2$ -Punkt hat, kann nur eine Schleife genau gewickelt werden, wie in [Fig. 11](#) gezeigt, so daß ein geringer Grad an Ungeradzahligkeit bei $R(l)$ in alle außer einer der Sagnac-Schleifen eingeführt wird.

[0070] Es muß auch erwähnt werden, daß es zusätzlich zur Verbesserung der akustischen Ansprechempfindlichkeit der Faser mit einem Hydrophon möglich ist, die Fasern durch Aufbringen einer Metallbeschichtung mit einem bestimmten Durchmesser zu desensibilisieren. (Siehe beispielsweise J. A. Bucaro, Optical fibre sensor coatings, oben zitiert.) Die gemessenen normierten Phasenansprechempfindlichkeiten von nur -366 dB bezogen auf $1/\mu\text{Pa}$ sind berichtet worden. Wenn solche Fasern in den Verzögerungs- oder Busleitungen verwendet werden, nähert sich das Verhältnis zwischen R_h und R_b oder das Verhältnis zwischen R_h und R_d einem Wert von 68 dB (statt 30 dB bei kunststoffbeschichteten Verzögerungs- und Busfasern), was das durch das Hydrophon induzierte Signal über das verzögerungs- und businduzierte Signal um 38 dB erhöht.

REDUZIERUNG DES VERTEILTEN AUFNAHMERAUSCHENS UNTER VERWENDUNG VON LEEREN SPROSSEN

[0071] Um das verteilte Aufnahmesignal weiter zu eliminieren, kann die hydrophoninduzierte akustische Modulation von der verteilten Aufnahmemodulation dadurch getrennt werden, daß leere Sprossen **300**, die kein Hydrophon in der Sensoranordnung **210** enthalten, angeordnet werden, wie in [Fig. 12](#) gezeigt. Jeder Sprosse **216(i)**, die ein Hydrophon **212(i)** enthält und als Erfassungssprosse bezeichnet wird, geht eine der leeren Sprossen **300(i)** voraus. Die Tatsache, daß die nichterfassende Faser jeder Schleife, die eine leere Sprosse **300(i)** enthält, nahezu mit der nichterfassenden Faser der Schleife identisch ist, die die entsprechende Erfassungssprosse **212(i)** einschließt, bedeutet, daß die leere Sprosse **300(i)** und die entsprechende Erfassungssprosse **212(i)** nahezu das gleiche verteilte Aufnahmesignal haben. Wenn man diese leere Sprosse **300(i)** als weiteren Sensor in der Anordnung **210** behandelt und die Impulse (im TDM-Schema) von den leeren Sprossen **300(i)** und den Erfassungssprossen **212(i)** richtig taktet, so daß sie nicht überlappen, kann das verteilte Aufnahmesignal, das an jeder Erfassungssprosse **212(i)** vorhanden ist, gemessen werden. Nach der Detektion kann dieses Signal vom Erfassungssprossensignal subtrahiert werden, wobei nur die Intensitätsschwankungen, die durch Phasenmodulationen in der Hydrophonfaser erzeugt werden, zurückbleiben. Die Implementierung eines solchen Schemas erfordert $2N$ Sprossen für eine Anordnung **210** mit N Sensoren, wodurch sich das Tastverhältnis der einzelnen Signale um die Hälfte reduziert.

[0072] Wenn eine Desensibilisierung des Busabschnitts der Sensoranordnung **210** nicht erforderlich ist, kann eine einzelne leere Sprosse **300** in der Anordnung **210** angeordnet werden, um das verteilte Aufnahmesignal, das der Verzögerungsschleife **214** zugeordnet wird, zu messen, wobei nur $N + 1$ Sprossen (N Erfassungssprossen **212(i)** und eine leere Sprosse **300**) für N Sensoren erforderlich sind. Wenn eine leere Sprosse **300** das verteilte Aufnahmesignal für jede Erfassungssprosse **212(i)** nicht entsprechend mißt, können mehr leere Sprossen **300** in periodischen Intervallen entlang der Anordnung hinzugefügt werden, bis das verteilte Aufnahmesignal, das an jeder Erfassungssprosse **212(i)** vorhanden ist, durch die nächstgelegene dieser leeren Sprossen **300** entsprechend gemessen werden kann. Wenn weniger leere Sprossen verwendet werden, führt dies zu einem höheren Tastverhältnis für die einzelnen Signale. [Fig. 12](#) stellt das Extrem dar, bei dem für jede Erfassungssprosse eine leere Sprosse hinzugefügt wurde.

POLARISATION

[0073] Um einen maximalen Kontrast in jedem Interferometer-Sensor zu erreichen, muß der Zustand der Polarisation (SOP) der interferierenden Strahlen identisch sein, wenn sie rekombinieren. Wenn sie orthogonal sind, besteht keine Interferenz und somit kein amplitudenmoduliertes Signal. Dies wird als polarisationsinduziertes Signalfading bezeichnet. Da jeder Sensor in der Sagnac-Sensoranordnung eine Sagnac-Schleife ist, beziehen sich die Untersuchungen, die bisher zu polarisationsinduziertem Signalfading im Sagnac-Faser-Gyroskop durchgeführt worden sind, auch auf die Sagnac-Sensoranordnung. Eine vielversprechende Lösung besteht darin, einen Depolarisator in der Sagnac-Schleife anzuordnen. (Siehe beispielsweise K. Böhm et al., LOW-DRIFT FIBRE GYRO USING A SUPERLUMINESCENT DIODE, ELECTRONICS LETTERS, Vol. 17, Nr. 10, 14. Mai 1981, S. 352–353) Der Depolarisator stellt sicher, daß mindestens die Hälfte der optischen Leistung zum 3×3 -Koppler zu allen Zeiten im richtigen Polarisationszustand zurückkehrt. Dieser allgemeine Lösungsansatz führt zu einer konstanten Sichtbarkeit unabhängig von der Schleifendoppelbrechung. (Siehe beispiels-

weise William K. Burns et al., Fiber-Optic Gyroscopes with Depolarized Light, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 10, Nr. 7, Juli 1992, S. 992–999) Die einfachste Konfiguration verwendet eine nichtpolarisierte Quelle, zum Beispiel eine Faser-Superfluoreszenzquelle und einen Depolarisator in der Schleife. Wie in [Fig. 13](#) dargestellt, wird in der Sagnac-Sensoranordnung **200** ein Depolarisator **310** an einem Punkt angeordnet, den alle Sagnac-Schleifen gemeinsam haben. Der Depolarisator **310** stellt sicher, daß jeder Sensor **212(i)** seine eigene konstante Sichtbarkeit unabhängig von der Doppelbrechung hat, solange die Schleifendoppelbrechung konstant bleibt. Dies stellt eine große Vereinfachung bei der Handhabung des polarisationsinduzierten Signalfadings gegenüber denjenigen Verfahren dar, die bei Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnungen verwendet werden.

[0074] Obwohl langsame Änderungen der Doppelbrechung durch die reziproke Natur des Sagnac-Interferometers in ausreichendem Maß aufgehoben werden, erzeugen Doppelbrechungsmodulationen bei Frequenzen im akustischen Bereich von Interesse Polarisationsrauschen. Die meiste Doppelbrechungsmodulation in diesen Frequenzen tritt im Ergebnis einer physischen Faserbewegung auf. Somit sollte die Sagnac-Schleife stationär bleiben, um das Polarisationsrauschen (sowie das verteilte Aufnahmesignal) zu reduzieren.

RAUSCHQUELLEN, DIE DURCH DIE VERWENDUNG DES SAGNAC-INTERFEROMETERS ENTSTEHEN

THERMISCHES PHASENRAUSCHEN

[0075] Da der Brechungsindex der Faser sich mit der Temperatur ändert, erzeugen thermische Schwankungen in einer Faser Phasenschwankungen des Lichts, das diese durchläuft. Diese Indexschwankungen sind über die Länge der Faser nicht korreliert, und daher verändern sich die resultierenden Phasenschwankungen mit der Quadratwurzel der Länge. Da Mach-Zehnder-Interferometer normalerweise weniger als 100 Meter Faser in jedem Arm verwenden, ist die Stärke dieses thermischen Phasenrauschens vernachlässigbar. Das Sagnac-Interferometer hat sehr viel mehr Faser im Interferometer, und infolgedessen kann thermisches Phasenrauschen eine einschränkende Rauschquelle sein. Die Stärke dieses thermischen Phasenrauschens in einem Sagnac-Interferometer ist bisher theoretisch beschrieben und in Experimenten bestätigt worden. (Siehe beispielsweise Sverre Knudsen et al., Measurements of Fundamental Thermal Induced Phase Fluctuations in the Fiber of a Sagnac Interferometer, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 7, Nr. 1, 1995, S. 90–93; und Kjell Kråkenes et al., Comparison of Fiber-Optic Sagnac and Mach-Zehnder Interferometers with Respect to Thermal Processes in Fiber, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 13, Nr. 4, April 1995, S. 682–686) Bei Schleifen, die länger als 2 km sind, kann das thermische Phasenrauschen in dem Frequenzbereich von Interesse $1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ überschreiten, was in der Größenordnung der erforderlichen Ansprechempfindlichkeit der Sensoranordnung liegt.

[0076] Das thermische Phasenrauschen kann als eine Quelle des verteilten Aufnahmerauschens angesehen werden, ähnlich wie eine externe Modulation in der Verzögerungsschleife, und kann somit unter Verwendung leerer Sprossen reduziert werden, wie oben beschrieben. Das thermische Phasenrauschen kann auch durch Kürzung der Schleifenlänge reduziert werden. Wie oben beschrieben, kann die Schleifenlänge, ohne die Niedrigfrequenzansprechempfindlichkeit zu ändern, dadurch gekürzt werden, daß die Hydrophonfaserlänge um den gleichen Faktor erhöht wird wie der, um den die Verzögerungsschleife verringert wurde. Beispielsweise hat eine Verzögerungsschleife von 40 km mit 50 Meter Hydrophonfaser das gleiche Niedrigfrequenzverhalten wie eine Verzögerungsschleife von 20 km mit 100 Meter Faser. Die letztere Kombination ist jedoch einem geringeren thermischen Phasenrauschen ausgesetzt, da die gesamte Verzögerungsschleifenlänge um nahezu einen Faktor zwei kürzer ist.

KERREFFEKTINDUZIERTES PHASENRAUSCHEN

[0077] Kerrinduzierte Phasenverschiebungen, die in einem Sagnac-Interferometer erzeugt werden können, sind mit viel Aufmerksamkeit bei dem faseroptischen Gyroskop bedacht worden. (Siehe beispielsweise R. A. Bergh et al., Source statistics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscopes, OPTICS LETTERS, Vol. 7, Nr. 11, November 1982, S. 563–565; R. A. Bergh et al., Compensation of the optical Kerr effect in fiber-optic gyroscopes, OPTICS LETTERS, Vol. 7, Nr. 6, Juni 1982, S. 282–284; und N. J. Frigo et al., Optical Kerr effect in fiber gyroscopes: effects of nonmonochromatic sources, OPTICS LETTERS, Vol. 8, Nr. 2, Februar 1983, S. 119–121) Die Anforderungen an das Gyroskop und den Schallsensor sind jedoch anders, da das Gyroskop Gleichstrompegel mißt. Kleine Gleichstromverschiebungen, die durch kerrinduzierte Phasenverschiebungen erzeugt werden, die ein Fasergyroskop begrenzen würden, sind keine Probleme bei einem Schallsensor. Die kerrinduzierte Gleichstromphasenverschiebung ist solange kein Problem, wie sie nicht den Arbeitspunkt zu weit weg von der Quadratur verschiebt. Das Intensitätsrauschen in der Lichtquelle kann ein kerrinduziertes

Phasenrauschen im Ausgangssignal erzeugen. Die Stärke dieses kerrinduzierten Wechselstromphasenrauschens ist jedoch so lange klein, wie das kerrinduzierte Gleichstromphasenrauschen klein bleibt. Der Ursprung der kerrinduzierten Phasenverschiebungen in der Sagnac-Sensoranordnung ist anders als im Fasergyroskop. Die Asymmetrie der Sagnac-Sensoranordnung fördert eine solche Kerrphasenverschiebung viel eher, als es das nominal symmetrische Gyroskop tut. Diese Asymmetrie ist zurückzuführen auf den Sensoranordnungsabschnitt sowie auf eine beliebige Anordnung von EDFAs, die asymmetrisch sind, wobei ein Strahl eine Verstärkung erfährt, bevor er durch die Verzögerungsschleife läuft, dann einen Verlust erleidet, während der gegenläufige Strahl Verlust erleidet und dann Gewinn erfährt. Es ist möglich, diese Asymmetrien auszugleichen und die kerrinduzierte Phasenverschiebung auf null zu bringen, indem die entsprechende Stelle für EDFAs in der Verzögerungsschleife gewählt wird. Die Spezifik hängt ab von der genauen Sensoranordnungsanordnung und davon, welches Multiplexierungsschema verwendet wird.

NICHTLINEARE PHASENMODULATION, DIE AUF DIE EDFAS ZURÜCKZUFÜHREN IST

[0078] Die Populationsinversionen, die in den EDFAs entstehen, bewirken eine Phasenverschiebung im Signallicht, das diese durchläuft. (Siehe beispielsweise M. J. F. Digonnet et al., Resonantly Enhanced Nonlinearity in Doped Fibers for Low-Power All-Optical Switching: A Review, OPTICAL FIBER TECHNOLOGY, Vol. 3, Nr. 1, Januar 1997, S. 44–64) Dieses Phänomen ist verwendet worden, um rein optische Interferometer-Schalter zu erzeugen. In einer Sagnac-Sensoranordnung erzeugen die EDFAs im Interferometer eine nichtlineare Phasenverschiebung durch den gleichen Mechanismus. Schwankungen in der Populationsinversion infolge der Pump- oder Signalleistungsschwankungen erzeugen Phasenmodulationen, die in ein Intensitätsrauschen umgewandelt werden.

[0079] Um die Stärke dieser Rauschquelle zu schätzen, muß zuerst bestimmt werden, wie die umgekehrte Population auf Pump- und Signalleistungsschwankungen reagiert. Dies ist relativ einfach durchzuführen, indem die Bilanzgleichungen für ein Erbiumsystem aufgerufen werden:

$$N_1 + N_2 = N_0 \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} N_2 = \frac{I_p \sigma_p^a}{h\nu_p A_{eff}} N_1 + \frac{I_s \sigma_s^a}{h\nu_s A_{eff}} N_1 - \frac{I_p \sigma_p^e}{h\nu_p A_{eff}} N_2 - \frac{I_s \sigma_s^e}{h\nu_s A_{eff}} N_2 - \frac{N_2}{\tau_2} \quad (12)$$

wobei N_1 und N_2 Populationsdichten der unteren, beziehungsweise erregten Zustände sind, N_0 die Gesamtpopulationsdichte ist, I die Intensität, σ der Querschnitt, A_{eff} die effektive Modenfläche in der Faser und τ_2 die Lebensdauer der Ebene zwei. Die Indizes p und s bezeichnen Pumpe beziehungsweise Signal und die hochgesetzten Indizes a und e bezeichnen Absorption beziehungsweise Emission.

[0080] Durch Teilung von N_1 , N_2 , I_p und I_s in ihre stationären und zeitvariablen Komponenten, anschließendes Einsetzen derselben in die Gleichung 12 und Kombinieren der Gleichung 12 mit Gleichung 11 ergibt sich folgendes:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} N_2(t) = & \left[\frac{N_0 \sigma_p^a + N_2^{ss} (\sigma_p^e + \sigma_p^a)}{h\nu_p} \right] I_p(t) + \left[\frac{N_0 \sigma_s^a + N_2^{ss} (\sigma_s^e + \sigma_s^a)}{h\nu_s} \right] I_s(t) + \\ & \left[\frac{I_p^{ss} (\sigma_p^e + \sigma_p^a)}{h\nu_p} + \frac{I_s^{ss} (\sigma_s^e + \sigma_s^a)}{h\nu_s} + \frac{1}{\tau_2} \right] N_2(t) - \left[\frac{(\sigma_p^e + \sigma_p^a)}{h\nu_p} \right] I_p(t) N_2(t) - \\ & \left[\frac{(\sigma_s^e + \sigma_s^a)}{h\nu_s} \right] I_s(t) N_2(t) \end{aligned} \quad (13)$$

wobei der hochgestellte Index ss stationäre Werte bezeichnet und die zeitvariablen Komponenten nunmehr als explizite Funktionen der Zeit beschrieben werden: ($N_2 = N_2^{ss} + N_2(t)$). Wenn angenommen wird, daß $N_2(t)$ viel kleiner ist als N_2^{ss} , dann können die beiden letzten Terme in der Gleichung 13 vernachlässigt werden. Wenn man $I_p(t) = I_p^m \sin(f_p t)$ und $I_s(t) = I_s^m \sin(f_s t)$ setzt (wobei I_p^m und I_s^m die Modulationsamplituden von $I_p(t)$ beziehungsweise $I_s(t)$ bezeichnen und f_p und f_s die Pump- beziehungsweise Signalmodulationsfrequenzen bezeichnen) und die resultierenden Differentialgleichungen löst, kann man feststellen, daß:

$$\frac{|N_2(f_p)|}{N_2^{ss}} \approx \left(\frac{\sigma_p^a(\sigma_p^e + \sigma_p^a) - \sigma_p^a(\sigma_s^e + \sigma_s^a)}{(\sigma_p^e + \sigma_p^a)^2} \cdot \frac{v_p}{v_s} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{1 + f_p^2 / f_o^2}} \right) \cdot \frac{l_s^{ss} l_p^m}{l_p^{ss^2}} \quad (14)$$

$$\left| \frac{N_2(f_s)}{N_2^{ss}} \right| \approx \left(\frac{\sigma_s^a}{\sigma_p^a} - \frac{\sigma_s^e + \sigma_s^a}{\sigma_p^e + \sigma_p^a} \right) \cdot \frac{v_p}{v_s} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 + f_p^2 / f_o^2}} \right) \cdot \frac{l_s^m}{l_p^{ss}} \quad (15)$$

wobei:

$$f_o = \frac{\sigma_p^e + \sigma_p^a}{h\nu_p} l_p^{ss} + \frac{\sigma_s^e + \sigma_s^a}{h\nu_s} l_s^{ss} + \frac{1}{\tau_2} \approx \frac{\sigma_p^e + \sigma_p^a}{h\nu_p} l_p^{ss} \text{ wo } l_p^{ss} \gg l_s^{ss} \quad (16)$$

[0081] Wenn angenommen wird, daß $\lambda_p = 1480$ nm, $\lambda_s = 1550$ nm und $I_p^{ss} = 1$ W und wenn normale Erbium-siliziumoxid-Querschnitte angenommen werden, dann vereinfachen sich die Gleichungen 14 und 15 folgendermaßen:

$$\left| \frac{N_2(f_p)}{N_2^{ss}} \right| \approx \left(\frac{0,9}{\sqrt{1 + f_p^2 / 4,3 \text{ kHz}}} \right) \cdot \frac{l_s^{ss} l_p^m}{l_p^{ss^2}} \quad (17)$$

$$\left| \frac{N_2(f_p)}{N_2^{ss}} \right| \approx \left(\frac{1,2}{\sqrt{1 + f_s^2 / 4,3 \text{ kHz}}} \right) \cdot \frac{l_s^m}{l_p^{ss}} \quad (18)$$

[0082] Die pumpinduzierten Populationsinversionsfluktuationen (Gleichung 17) werden zuerst analysiert. Wenn $I_s^{ss} = 1$ mW und $I_p^{ss} = 1$ W und wenn angenommen wird, daß $I_p^m / I_p^{ss} = 10^{-6} / \sqrt{\text{Hz}}$ (120 dB/ $\sqrt{\text{Hz}}$ elektronischer SNR), dann ist bei Frequenzen weitgehend unter 4,3 kHz $|N_2(f_p)| / N_2^{ss} = 9 \times 10^{-10} / \sqrt{\text{Hz}}$. Um diese Zahl in eine Phasenmodulation umzuwandeln, kann die Tatsache, daß 10 mW Pumpleistung, die in einer erbiumdotierten Faser absorbiert wird, annähernd 7 rad Phasenverschiebung bei 1550 nm induziert, genutzt werden. (Siehe beispielsweise M. J. F. Digonnet et al., Resonantly Enhanced Nonlinearity in Doped Fibers for Low-Power All-Optical Switching: A Review, OPTICAL FIBER TECHNOLOGY, Vol. 3, Nr. 1, Januar 1997, S. 44–64) Unter Verwendung von Simulationen erbringen 10 mW absorbierte Pumpleistung in einer normalen erbiumdotierten Faser annähernd 6 dB Kleinsignalverstärkung bei 1550 nm, was nahe der Verstärkung ist, die von jedem Verstärker in einer Anordnung mit verteilten EDFAs gefordert wird. (Siehe beispielsweise Craig W. Hodgson et al., Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers – Part I: Signal-to-Noise Ratio; Craig W. Hodgson et al., Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers – Part II: Pump Power; Jefferson L. Wagener et al., Novel Fiber Sensor Arrays Using Erbium-Doped Fiber Amplifiers; und C. W. Hodgson et al., Large-scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers, oben zitiert) Daher liefert jeder Verstärker annähernd 7 rad Gleichspannungsphasenverschiebung. Da die nichtlineare Phasenverschiebung proportional zur oberen Zustandspopulation N_2 ist, kann sie folgendermaßen beschrieben werden: $\Delta N_2 / N_2^{ss} = \Delta \Phi / \Phi^{ss}$. Unter Verwendung dieser Beziehung und von Gleichung 17 wiederum für $I_s^{ss} = 1$ mW, $I_p^{ss} = 1$ W, $I_p^m / I_p^{ss} = 10^{-6} / \sqrt{\text{Hz}}$ und $f_s \ll 4,3$ kHz, ist das Niederfrequenzphasenrauschen, das von jedem EDFA induziert wird: $(7 \text{ rad}) \times (9 \times 10^{-10}) / \sqrt{\text{Hz}} = 6,3 \times 10^{-9} \text{ rad} / \sqrt{\text{Hz}}$. Wenn angenommen wird, daß insgesamt 500 solche Verstärker vorhanden sind und daß die Phasenmodulationen von allen 500 Verstärkern sich kohärent addieren, kann die gesamte pumprauschinduzierte Phasenverschiebung auf 3,2 $\mu\text{rad} / \sqrt{\text{Hz}}$ geschätzt werden. Das Soll-Phasengrundrauschen wird normalerweise auf 1 $\mu\text{rad} / \sqrt{\text{Hz}}$ gesetzt, was anzeigt, daß das nichtlineare Phasenrauschen, das von den EDFAs induziert wird, infolge der Pumpleistungsschwankungen nahe an dem erforderlichen Phasengrundrauschen liegt, aber nicht deutlich größer ist als dieses. In der Praxis addieren sich die Phasenmodulationen der Verstärker nicht kohärent, was die Zahl von 3,2 $\mu\text{rad} / \sqrt{\text{Hz}}$ reduzieren wird.

[0083] Berechnungen der induzierten Phasenverschiebung infolge von Signalleistungsschwankungen sind komplizierter, da die Signalleistung nicht nur Intensitätsrauschen hat, sondern auch mittels des Multiplexschemas moduliert ist. Wir betrachten wiederum den TDM-Fall im allgemeinen, während ein gegebener Impuls einen bestimmten EDFA durchläuft, dabei kann, muß aber nicht, ein gegenläufiger Impuls vorhanden sein, der diesen EDFA zur gleichen Zeit durchläuft. Wenn man den schlimmsten Fall annimmt, in dem immer ein gegenläufiger Impuls vorhanden ist, dann ist I_s^m das Doppelte des Intensitätsrauschens jedes einzelnen Impulses. Für die Verstärker ist I_s^m normalerweise das 1,5- bis 2fache des Intensitätsrauschens jedes einzelnen Impul-

ses. Wenn man annimmt, daß das Signallicht bei akustischen Frequenzen (das heißt $I_s^m/I_s^{ss} = 10^{-6}/\sqrt{\text{Hz}}$) einen elektronischen SNR von 120 dB/ $\sqrt{\text{Hz}}$ hat, und wenn man diese Zahl in die Gleichung 18 zusammen mit $I_p^{ss} = 1 \text{ W}$ und $I_s^m = 2 \text{ mW}$ einsetzt, kann berechnet werden, daß $|N_2(f_s)|/N_2^{ss}$ bei Frequenzen, die viel kleiner sind als 4,3 kHz, annähernd $2,4 \times 10^{-9}/\sqrt{\text{Hz}^{-1}}$ ist und daß das Phasenrauschen, das durch Signalintensitätsrauschen in jedem EDFA induziert wird, somit $1,68 \times 10^{-8} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ist. Wenn wir wiederum annehmen, daß 500 Verstärker und kohärente Addition aller EDFA-induzierten Phasenmodulation vorliegen, ist das gesamte EDFA-induzierte Phasenrauschen in jedem Impuls $8,4 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, ein Pegel, der wiederum die Leistungsfähigkeit der Sagnac-Sensoranordnung begrenzen könnte. Eine ausführlichere Untersuchung, die das Multiplexierungsschema und die genaue Zeitsteuerung der Sensoranordnung berücksichtigt, wird jedoch für eine genauere Berechnung benötigt.

MULTIPLEXIERUNGSSCHEMEN IN EINER SAGNAC-SENSORANORDNUNG

ZEIT-MULTIPLEX

[0084] Es ist bisher angenommen worden, daß die Sagnac-Sensoranordnung in einer TDM-Konfiguration betrieben wird. Man beachte, daß in der Sagnac-Sensoranordnung die Quellenanforderungen für ein solches TDM-System nicht so hoch sind wie die in einer Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung in einer TDM-Konfiguration. Der Grund dafür ist die Verwendung der Breitbandquelle in der Sagnac-Sensoranordnung. In der Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung ist das Licht von benachbarten Sprossen infolge der Quelle mit schmaler Linienbreite kohärent, und somit sind extrem hohe Extinktionsverhältnisse am Eingangsimpuls erforderlich, um kohärente Mehrwegeinterferenz zu verhindern. Diese hohen Anforderungen an das Extinktionsverhältnis werden erreicht, indem mehrere Modulatoren in Serie angeordnet werden, was zu einer komplizierten, verlustreichen und teuren Quelle führt. In der Sagnac-Sensoranordnung muß das erforderliche Extinktionsverhältnis nicht so hoch sein, da die Breitbandquelle jede Möglichkeit einer kohärenten Mehrwegeinterferenz ausschließt. Zusätzlich verhindern die schmalen Linienbreiten, die von der Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnung gefordert werden, die Verwendung einer gepulsten Laserquelle anstelle einer Dauerstrich-(CW-)Laserquelle, die mittels Lithiumniobatintensitätsmodulatoren extern moduliert wird. In der Sagnac-Sensoranordnung könnte entweder eine Dauerstrich-ASE-Quelle, die extern moduliert ist, eine gepulste ASE-Quelle oder eine bestimmte Kombination daraus verwendet werden, um die Quelle aufzubauen. Wie bereits erwähnt, ist der Grund dafür darin zu sehen, daß die Sagnac-Sensoranordnung keine Quelle mit schmaler Linienbreite erfordert. Obwohl die Sagnac-Sensoranordnung keine Quelle mit schmaler Linienbreite erfordert, ist zu beachten, daß die Sagnac-Sensoranordnung mit einer Quelle mit schmaler Linienbreite, zum Beispiel einem Laser, verwendet werden kann.

FREQUENZMULTIPLEXBETRIEB

[0085] Die Verwendung der Breitbandquelle ermöglicht auch, daß die Sagnac-Sensoranordnung in Nicht-TDM-Konfigurationen arbeitet, ohne den Aufbau zu ändern oder zusätzliche Quellen zu erfordern. Frequenzmultiplexbetrieb (FDM) wird normalerweise mit Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnungen unter Verwendung des phasenerzeugten Träger-(PGC-)Schemas verwendet, ist jedoch auch mit der Sagnac-Sensoranordnung kompatibel. [Fig. 14](#) zeigt eine grundlegende Sagnac-Sensoranordnung **400**, die ein FDM-Schema verwendet. Eine Faser-Superfluoreszenzquelle (SFS) **402** (oder eine andere Breitbandquelle zum Beispiel eine LED) erzeugt Eingangslicht. Eine Chirp-Intensitätsmodulation wird auf das Eingangslicht mittels eines Intensitätsmodulators **404** angewendet, der von einem Chirp-Frequenzgenerator **406** gesteuert wird. Das modulierte Licht tritt über einen 3×3 -Koppler **412** in eine Sensoranordnung **410** ein. Das Licht durchläuft eine Verzögerungsschleife **414** und mehrere Erfassungssprossen **416(i)** mit jeweiligen Sensoren **418(i)**. Leere Sprossen (nicht dargestellt) können bei Bedarf auch vorhanden sein. Nach dem Durchlaufen der Verzögerungsschleife **414** und der Sprossen **416(i)** tritt das Licht über den Koppler **412** aus der Sensoranordnung **410** aus und wird von einem Detektor **420** detektiert, der ein elektrisches Ausgangssignal erzeugt, das auf das detektierte Licht anspricht. Das elektrische Ausgangssignal vom Detektor **420** wird in einem Mischer **422** mit der gleichen Chirp-Frequenz gemischt, die von einer Verzögerungseinrichtung **424** zeitverzögert worden ist, die die Chirp-Frequenz um eine Zeit Δt verzögert. In dem in [Fig. 14](#) dargestellten Aufbau wird das Ausgangssignal des Mixers **422** an eine Spektrumanalyseeinrichtung **426** angelegt. In einer Betriebsausführungsform wird das Ausgangssignal des Mixers **422** an ein Signalverarbeitungsuntersystem (nicht dargestellt) angelegt, das das Ausgangssignal des Mixers **422** analysiert, um die akustischen Signale wiederzugeben, die an der Sensoranordnung **410** eintreffen.

[0086] Die Signale, die von den Sensoren **418(i)** in den verschiedenen Sprossen **416(i)** zurückkehren, werden weiter in bezug auf die verringerte Chirp-Frequenz verzögert. Dies ist in einem Diagramm in [Fig. 15](#) dar-

gestellt anhand der ursprünglichen Chirp-Frequenz **450**, der verzögerten Chirp-Frequenz **452** von der Verzögerungseinrichtung **424**, des Chirp-Rückführungssignals **460** von der ersten Sprosse, des Chirp-Rückführungssignals **462** von der zweiten Sprosse und des Chirp-Rückführungssignals **464** von der dritten Sprosse. Im Mischer **422** entstehen getrennte Überlagerungsfrequenzen f_{b1} **470**, f_{b2} **472** beziehungsweise f_{b3} **474** (in [Fig. 14](#) dargestellt) zwischen der sich mischenden Chirp-Frequenz **452** und jedem der Signale, die von verschiedenen Sprossen in der Sagnac-Sensoranordnung **410** zurückkehren. (Siehe beispielsweise S. F. Collins et al., A Multiplexing Scheme For Optical Fibre Interferometric Sensors Using An FMCW Generated Carrier, OFS '92 Conference Proceedings, S. 209–211) Obwohl nur drei Chirp-Rückführungssignale **460**, **462**, **464** in [Fig. 15](#) dargestellt sind, läßt sich denken, daß bis zu N Rückführungssignale vorhanden sein können, wobei N die Anzahl der Sprossen in der Anordnung **410** ist. Die Chirp-Rückführungssignale von der N-ten Sprosse bewirken eine Überlagerungsfrequenz f_{bN} im Mischer **422**.

[0087] Wie in einer bildlichen Darstellung eines spektralen Ausgangssignals in [Fig. 14](#) dargestellt, erscheint die akustische Modulation der Signale als obere Seitenbänder **480**, **481**, **482** und untere Seitenbänder **484**, **485**, **486** zu den Überlagerungsfrequenzen. Ein Vorteil dieses FDM-Schemas besteht darin, daß die Anforderungen an den Sensoranordnungstakt stark gegenüber denjenigen gelockert sind, die in einem TDM-System erforderlich sind. Ein TDM-System erfordert eine spezifische Laufzeitverzögerung zwischen benachbarten Sprossen, um zu verhindern, daß sich Impulse überlappen, und dies kann ein schwieriges technisches Problem sein. Bei FDM verschieben Änderungen der Faserlängen die Überlagerungsfrequenzen, bewirken jedoch keine Überlappung zwischen Signalen, solange diese Überlagerungsfrequenzen durch das zweifache des akustischen Detektionsbereichs getrennt sind. Das letztere erfolgt durch Wählen der richtigen Chirp-Rate. Anders als in einem TDM-System senden alle Wege zu allen Zeiten Licht zurück, was zu einem Phasenrauschen zwischen den verschiedenen inkohärenten Signalen führen kann. Die Breitband-ASE-Lichtquelle minimiert die Stärke dieses Phasenrauschens. (Siehe beispielsweise Moslehi, Analysis of Optical Phase Noise in Fiber-Optic Systems Employing a Laser Source with Arbitrary Coherence Time, Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-4, Nr. 9, September 1986, S. 1334–1351).

CODEMULTIPLEXBETRIEB

[0088] Der Codemultiplexbetrieb (CDM) hat wegen seiner Verwendung bei Sensoranordnungen in letzter Zeit eine verstärkte Aufmerksamkeit auf sich gezogen. (Siehe beispielsweise A. D. Kersey et al., Codedivision Multiplexed Interferometric Array With Phase Noise Reduction And Low Crosstalk, OFS '92 Conference Proceedings, S. 266–269; und H. S. Al-Raweshidy et al., Spread spectrum technique for passive multiplexing of interferometric optical fibre sensors, SPIE, Vol. 1314 Fibre Optics '90, S. 342–347) Wie bei einer Sagnac-Sensoranordnung **600** in [Fig. 16](#) dargestellt, wird bei CDM das Eingangslicht von einer Faser-Superfluoreszenzquelle **602** (oder einer anderen Breitbandquelle, zum Beispiel einer LED) in einem Intensitätsmodulator **604** entsprechend einem Pseudozufallscode moduliert, der von einem Codegenerator **606** erzeugt wird. Das modulierte Licht wird über einen 3×3 -Koppler **610** an eine Interferometerschleife **608** angelegt und durchläuft eine Verzögerungsschleife **614** und eine Vielzahl von Sprossen **616(i)** in einer Anordnung **612**. In der dargestellten Ausführungsform weist jede Sprosse **616(i)** einen jeweiligen Sensor **618(i)** auf. Leere Sprossen (nicht dargestellt) können bei Bedarf auch vorhanden sein. Das Licht kehrt von der Schleife über den 3×3 -Koppler **610** zurück und wird von einem Detektor **620** detektiert. Das elektrische Ausgangssignal des Detektors **620** wird an einen Korrelator **622** zusammen mit dem Ausgangssignal des Codegenerators **606** angelegt, der für eine Dauer τ_{cor} von einer Verzögerungseinrichtung **624** verzögert wird. Die Bit-Dauer des Pseudozufallscodes ist kürzer als die Laufzeitverzögerung zwischen benachbarten Sprossen in der Anordnung **612**. Wenn τ_{cor} gleich einer der Schleifenlaufzeiten τ_i durch eine jeweiligen Sprosse **616(i)** ist, dann wird das Signal, das von diesem Sensor in der Sprosse **616(i)** zurückkehrt, mit dem verzögerten Pseudozufallscode korreliert. Die anderen Signale werden mit null korreliert. Der Korrelationsprozeß schließt beispielsweise eine Multiplikation des detektierten Signals mit 1 oder -1 (oder eine logische Verknüpfung des Signals in einem elektronischen Gatter **630** mit den nichtinvertierenden und invertierenden Eingängen eines Differenzverstärkers **632**) in Abhängigkeit davon ein, ob der Korrelationscode ein- oder ausgeschaltet ist. Das Ausgangssignal des Differenzverstärkers in einer Leitung **634** ist das korrelierte Ausgangssignal. Das Signal wird dann über eine Periode t_{avg} , die der Dauer des Codes entspricht, zeitlich gemittelt. Die unkorrelierten Signale werden auf null zeitgemittelt, wodurch das Signal vom Sensor **618(i)** getrennt wird. τ_{cor} wird abgetastet, um die Signale von allen Sensoren sequentiell abzurufen.

[0089] Ein Vorteil von CDM gegenüber TDM besteht darin, daß die Verzögerung zwischen Sensoren nicht genau gesteuert werden muß. Jede Schleife verzögert τ_j , wobei $|\tau_j - \tau_j \pm 1| > \tau_{bit}$ akzeptabel ist (wobei τ_{bit} die Dauer eines Impulses im Code ist). Die Korrelation erfordert die Kenntnis von τ_j , die ohne weiteres gemessen werden können. Wie bei FDM profitiert eine Breitbandquelle von der Reduzierung des Phasenrauschens, das auf die

Addition aller Signale miteinander zurückzuführen ist.

[0090] Vorstehend wurde ein neuartiger Aufbau für eine Schallsensoranordnung auf der Grundlage des Sagnac-Interferometers beschrieben. Die Hauptvorteile dieses Aufbaus sind die Verwendung von Common-Path-Interferometern. Dies schließt die Umwandlung des Quellphasenrauschens in Intensitätsrauschen aus, das in Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoren vorherrscht, und ermöglicht die Verwendung einer billigen Hochleistungs-ASE-Quelle oder einer anderen Breitbandquelle. Das Frequenzverhalten der Sagnac-Sensoranordnung als eine Funktion der akustischen Frequenz ist so dargestellt, daß es mit dem Ozeangrundrauschen übereinstimmt. Der Aufbau ermöglicht auch, daß der dynamische Bereich dramatisch erhöht wird, ohne daß Hydrophone hinzugefügt werden, indem eine sehr kurze Verzögerungsschleife verwendet wird. Eine Technik zur Beseitigung des polarisationsinduzierten Signalfadings wurde oben beschrieben. Die Sagnac-Sensoranordnung ermöglicht auch die Verwendung von verschiedenen Multiplexschemen in einer einfacheren Form als sie mit einer Standard-Mach-Zehnder-Anordnung erreichbar ist. Wegen dieser Merkmale stellt der Aufbau der Sagnac-Sensoranordnung eine sehr vielversprechende Alternative gegenüber Mach-Zehnder-Interferometer-Sensoranordnungen dar.

GEKNICKTE SAGNAC-SENSORANORDNUNG

[0091] [Fig. 17–Fig. 20](#) stellen alternative Ausführungsformen einer verteilten Schallsensoranordnung dar, die auf dem Sagnac-Effekt beruht und eine Architektur hat, die so modifiziert ist, daß die verteilte Aufnahme von den Zuführungsfasern reduziert wird. Insbesondere stellt [Fig. 17](#) eine grundlegende geknickte Sagnac-Schallfasersensoranordnung **700** dar, die eine Quelle **702**, einen ersten Detektor **704** und einen zweiten Detektor **706** umfaßt. Vorzugsweise befinden sich die Quelle **702**, der erste Detektor **704** und der zweite Detektor **706** im trockenen Ende der Sensoranordnung **700** (zum Beispiel an der Küste oder an Bord eines Schiffes).

[0092] Die Quelle **702** erzeugt Lichtimpulse, die über eine Zuführungsfaser **708** in einen 3×3 -Koppler **710** eingekoppelt werden. Wie dargestellt, befindet sich der 3×3 -Koppler im nassen Ende (zum Beispiel nahe des Ozeangrundes). Der 3×3 -Koppler **710** hat einen ersten Ausgangsanschluß, der mit einem Ende einer gemeinsamen Fasersprosse (Sprosse 0) **712** gekoppelt ist, hat einen zweiten Ausgangsanschluß, der mit einer Eingangs/Ausgangs-Sensoranordnungsfaser **714** einer Anordnung **716** gekoppelt ist, und hat einen dritten Ausgangsanschluß, der nichtreflektierend abgeschlossen ist. Annähernd 33% des Lichts von der Quelle **702** wird in jeden, nämlich den ersten und den zweiten Anschluß des 3×3 -Kopplers, eingekoppelt, und somit läuft annähernd 33% des Lichts zur gemeinsamen Fasersprosse **712**, und annähernd 33% des Lichts läuft zur Anordnung **716**. Obwohl, wie oben beschrieben, hier ein 3×3 -Koppler **710** beschrieben ist, können andere $n \times m$ -Koppler (zum Beispiel ein 2×2 -Koppler, ein 4×4 -Koppler und so weiter) mit der Ausführungsform in [Fig. 17](#) und den alternativen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, die nachstehend beschrieben werden, verwendet werden.

[0093] Die Anordnung **716** umfaßt eine Vielzahl von Sprossen **718(i)** (das heißt **718(1)**, **718(2)** ... **718(N)**), die zwischen die erste Eingangs/Ausgangsfaser **714** der Anordnung und eine zweite Eingangs/Ausgangsfaser **720** der Anordnung gekoppelt sind. Jede Sprosse **718(i)** weist einen jeweiligen Schallsensor (das heißt Hydrophon) **722(i)** auf. Die Anordnung **716** weist vorteilhafterweise verteilte erbiumdotierte Faserverstärker (EDFAs) **724** auf, wie oben in Verbindung mit [Fig. 3](#) beschrieben. (Die Pumpquelle für die EDFAs **724** ist nicht in [Fig. 17](#) dargestellt.) Weitere Anordnungsconfigurationen können auch vorteilhaft verwendet werden.

[0094] Die zweite Eingangs/Ausgangsfaser **720** der Anordnung koppelt die Anordnung **716** mit dem ersten Anschluß eines 2×2 -Kopplers **730**. Ein zweites Ende der gemeinsamen Sprosse (Sprosse 0) **712** ist mit einem zweiten Anschluß des 2×2 -Kopplers **730** gekoppelt. Obwohl hier als Anordnung **716** mit mehreren Sensoren **722(i)** beschrieben, ist verständlich, daß die vorliegende Erfindung Anwendungsmöglichkeiten für ein Sensorsystem mit nur einem Sensor **722** hat.

[0095] Ein dritter Anschluß des 2×2 -Kopplers **730** ist nichtreflektierend mit einem Abschluß **732** abgeschlossen. Ein vierter Anschluß des 2×2 -Kopplers **730** ist mit einer Verzögerungsschleifenzuführungsfaser **740** gekoppelt. Die Verzögerungsschleifenzuführungsfaser **740** koppelt den vierten Anschluß des 2×2 -Kopplers mit dem ersten Ende einer Verzögerungsschleife **750**. Die Verzögerungsschleife **750** kann sich entweder im trockenen Ende, wie dargestellt, oder im nassen Ende befinden. Ein zweites Ende der Verzögerungsschleife **750** ist mit einem Reflektor **752** gekoppelt, so daß Licht, das das zweite Ende der Verzögerungsschleife **750** verläßt, wieder in die Verzögerungsschleife **750** reflektiert wird, die Verzögerungsschleife **750** durchläuft und **740** zurück zum vierten Anschluß des 2×2 -Kopplers **730** die Verzögerungsschleifenzuführungsfaser durchläuft. Das Licht, das von der Schleifenzuführungsfaser **740** zurückkehrt, wird vom 2×2 -Koppler **730** geteilt, wobei

im wesentlichen gleichen Teile sich in der gemeinsamen Sprosse **712** und in der Anordnung **716** ausbreiten, wobei beide Teile sich in Richtung des 3×3 -Kopplers **710** ausbreiten. Die Teile werden im 3×3 -Koppler **710** kombiniert, wo Lichtimpulse, die die gleiche Strecke durch die Anordnung **716** und durch die gemeinsame Sprosse **712** zurückgelegt haben, interferieren, und Lichtimpulse, die verschiedene Strecken zurückgelegt haben, nicht interferieren. Die Signale, die durch die Interferenz entstehen, werden vom 3×3 -Koppler **710** als erste und zweite Ausgangssignale ausgegeben, die sich zum ersten Detektor **704** über eine erste Detektorzuführungsfaser **770** ausbreiten beziehungsweise zum zweiten Detektor **706** über eine zweite Detektorzuführungsfaser **772** ausbreiten. Die Detektoren **704**, **706** erzeugen elektrische Ausgangssignale, die von der Elektronik (nicht dargestellt) auf eine herkömmliche Weise analysiert werden, um die akustischen Signale, die an den Sensoren **722(i)** eintreffen, wiederzugeben. Wie oben beschrieben, kehren die Signale, die im 3×3 -Koppler **710** interferieren, von jedem Sensor **722(i)** zu verschiedenen Zeiten zurück und können daher durch Zeitmultiplexbetrieb, Frequenzmultiplexbetrieb, Codemultiplexbetrieb und und dergleichen getrennt werden, wie oben beschrieben. Die nicht interferierenden Signale erzeugen keine detektierbaren Ausgangssignale und werden ignoriert.

[0096] Die Ausführungsform in [Fig. 17](#) kann ferner dadurch modifiziert werden, daß ein Depolarisator (nicht dargestellt) in eines der Fasersegmente **712**, **714** oder **720** in Verbindung mit einer nichtpolarisierten Quelle eingefügt wird, wie oben in Verbindung mit dem Sagnac-Interferometer beschrieben. Solche Ausführungsformen werden nachstehend in Verbindung mit [Fig. 23A](#), [Fig. 23B](#) und [Fig. 23C](#) beschrieben.

[0097] Das Licht in einem einzelnen Impuls von der Quelle **702** wird nachstehend durch die Sensoranordnung **700** verfolgt. Ein Quellenimpuls von der Quelle **702** wird eingekoppelt und läuft entlang der Quellenzuführungsleitung **708** und durch den 3×3 -Koppler **710** zu der gemeinsamen Sprosse **712** und zur Anordnung **716**. Zusammengenommen weisen die gemeinsame Sprosse **712** und die N Sprossen **718(i)** in der Anordnung **716** $N + 1$ getrennte Wege auf auf denen die Quellenimpulse zum 2×2 -Koppler **730** laufen. Da es $N + 1$ getrennte Wege für die Quellenimpulse gibt, auf denen sie laufen können, wird der Quellenimpuls in $N + 1$ getrennte Impulse geteilt, die den 2×2 -Koppler **730** durchlaufen und entlang der Verzögerungsschleifenzuführungsleitung **740** zur Verzögerungsschleife **750** laufen. Nach Durchlaufen der Verzögerungsschleife **750** werden die $N + 1$ Impulse vom Reflektor **752** reflektiert und laufen dann zurück durch die Verzögerungsschleife **750**, entlang der Verzögerungsschleifenzuführungsleitung **740** zum 2×2 -Koppler **730** im nassen Ende, immer noch als $N + 1$ getrennte Impulse. Jeder der $N + 1$ Impulse wird wiederum in der gemeinsamen Sprosse **712** und den N Sprossen **718(i)** in $N + 1$ Impulse getrennt. Nach dem erneuten Durchlaufen der gemeinsamen Sprosse **712** und der Sprossen **718(i)** werden die $(N + 1)^2$ Impulse im 3×3 -Koppler **710** kombiniert und kehren dann entlang der Detektorzuführungsleitungen **770**, **772** zurück zum trockenen Ende, wo die Impulse von dem ersten und dem zweiten Detektor **704**, **706** detektiert und analysiert werden.

[0098] Da es $(N + 1)^2$ mögliche getrennte Kombinationen von Wegen von der Quelle **702** zum Reflektor **752** und zurück zu den Detektoren **704**, **706** gibt, gibt es $(N + 1)^2$ zurückgekehrte Impulse. Die einzigen Impulse, die in einer nützlichen Weise interferieren, sind Paare von Impulsen, die die gleiche genaue Weglänge durchlaufen, aber in entgegengesetzter Reihenfolge. Zum Zwecke der nachstehenden Beschreibung ist ein Impuls durch zwei Zahlen gekennzeichnet, wobei die erste Zahl den Weg bezeichnet, den der Impuls von der Quelle **702** zum Reflektor **752** nimmt, und die zweite Zahl den Weg bezeichnet, den der Impuls vom Reflektor **752** zurück zu den Detektoren **704**, **706** nimmt. Beispielsweise läuft der Impuls 0,1 durch die gemeinsame Sprosse (Sprosse 0) **712**, dann durch die Verzögerungsschleife **750**, zum Reflektor **752**, zurück durch die Verzögerungsschleife **750** und dann durch die Sprosse **718(1)**. Der Impuls 1,0 läuft zuerst durch die Sprosse **718(1)**, dann durch die Verzögerungsschleife **750**, zum Reflektor **752**, zurück durch die Verzögerungsschleife **750** und dann durch die gemeinsame Sprosse (Sprosse 0) **712**. Da die Strecke, die der Impuls 0,1 zurücklegt, mit der Strecke identisch ist, die der Impuls 1,0 zurücklegt, interferieren der Impuls 0,1 und der Impuls 1,0, wenn sie im 3×3 -Koppler **710** kombiniert werden, und definieren dadurch ein Common-Path-Interferometer (das heißt ein geknicktes Sagnac-Interferometer), so wie die oben beschriebenen Sagnac-Interferometer. Akustische Erfassung ist auf das Hydrophon **722(1)** zurückzuführen, das sich in der Sprosse 1 befindet und das auf die akustische Modulation anspricht. Die interferierenden Impulse 0,1 und 1,0 treffen auf das Hydrophon **722(1)** zu verschiedenen Zeiten, und nehmen somit eine Phasendifferenz infolge der zeitlich variierenden akustischen Modulation des Hydrophons **722(1)** auf. Im 3×3 -Koppler **710** wird diese Phasendifferenz in eine Intensitätsmodulation umgewandelt, die entlang der Detektorzuführungsleitungen **770**, **772** zu den Detektoren **704**, **706** übertragen wird. Der gleiche Effekt tritt bei den Impulsen 0,2 und 2,0, bei den Impulsen 0,3 und 3,0 und so weiter auf.

[0099] Da das geknickte Sagnac-Interferometer ein Common-Path-Interferometer ist, kann die Quelle **702** eine Kurzkohärenzlänge haben, was bedeutet, daß die Interferenz nur zwischen Impulsen auftritt, die nahezu

identische Wege durchlaufen haben. Deshalb interferiert der Impuls i,j nur mit dem Impuls j,i . Wie oben ausgeführt, gibt es N Interferometer von Interesse (Impuls $0,i$ interferiert mit Impuls $i,0$ bei $i = 1$ bis N). Es gibt außerdem die vielen anderen Interferometer, die keine gemeinsame Sprosse (Sprosse 0) **712** aufweisen (zum Beispiel interferiert der Impuls 1,2 mit dem Impuls 2,1, der Impuls 1,3 mit dem Impuls 3,1 und so weiter). Solche interferierenden Impulse führen den Nutzimpulse Rauschen zu und werden hier als Rauschimpulse bezeichnet. Diese Rauschimpulse transportieren zwei Typen von Rauschen. Wie bei allen Impulsen transportieren sie zusätzliches Schrotrauschen, ASE-Signal-Überlagerungsrauschen (in einer verstärkten Anordnung), Phasentrauschen und so weiter, die das detektierte Rauschen erhöhen. Die Rauschimpulse, die ein unerwünschtes Interferometer bilden (Impuls 1,2 interferiert mit Impuls 2,1 und so weiter) transportieren auch Intensitätsmodulation, die durch die interferometrische Erfassung von Schallwellen bedingt ist. Diese Intensitätsmodulation ist ein unerwünschtes Signal und kann als Rauschquelle angesehen werden. Es ist wichtig zu bemerken, daß diese unerwünschten Interferometer ihre Interferenzpunktkoppler **280(1)** bis **280(N)** haben, wo die Sprossen **218(1)** bis **218(N)** mit der ersten Eingangs/Ausgangsfaser **714** der Anordnung **716** gekoppelt sind, wogegen die Signalimpulse im 3×3 -Koppler **710** interferieren. Da die Rauschimpulse interferieren, bevor sie den 3×3 -Koppler **710** erreichen, wird die Intensitätsmodulation der Rauschimpulse an beide Detektoren **704** und **706** symmetrisch übergeben. Die Signalimpulse, die im 3×3 -Koppler **710** interferieren, erzeugen jedoch eine asymmetrische Intensitätsmodulation. Deshalb führt durch Differenzverstärkung der Ströme von den Detektoren **704**, **706** die Intensitätsmodulation der Signalimpulse zur Addition und die Intensitätsmodulation der Rauschimpulse zur Subtraktion, wodurch der Rauschbeitrag der unerwünschten Interferometer reduziert wird.

[0100] Um das gesamte Rauschen, das durch diese Impulse hinzugefügt wird, vollständig zu beseitigen, können die Impulse von Interesse von den Rauschimpulsen unter Verwendung eines Zeitmultiplexschemas und durch richtige Wahl der Verzögerungslängen getrennt werden. Insbesondere wird die optische Weglänge vom 3×3 -Koppler **710** über die gemeinsame Sprosse **712** bis zu dem 2×2 -Koppler **730** so gewählt, daß sie einer Laufzeit τ entspricht. Die optische Weglänge eines Faserabschnitts vom 3×3 -Koppler bis zum Koppler **780(1)** über die erste Sprosse **718(1)** zu einem entsprechenden Koppler **790(1)** und zum 2×2 -Koppler **730** wird so gewählt, daß sie $(N + 1)\tau$ ist. Ein Abschnitt der optischen Weglänge ist ein gemeinsamer Weg vom 3×3 -Koppler **710** bis zum Koppler **780(1)** und vom Koppler **790(1)** bis zum 2×2 -Koppler **730**, und ein Abschnitt der optischen Weglänge führt durch die Sprosse **718(1)**. Die optischen Weglängen durch jede der Sprossen **718(i)** werden vorzugsweise so gewählt, daß sie annähernd gleich sind. Die Gesamtlänge des optischen Wegs vom Koppler **780(1)** zum Koppler **780(2)** und der optische Weg von einem Koppler **790(2)** zum Koppler **790(1)** wird so gewählt, daß er τ ist, so daß die gesamte optische Weglänge vom 3×3 -Koppler **710** bis zum 2×2 -Koppler **730** über die zweite Sprosse **718(2)** um τ länger ist als die gesamte optische Weglänge vom 3×3 -Koppler **710** bis zum 2×2 -Koppler **730** über die erste Sprosse **718(1)** (das heißt die gesamte optische Weglänge zwischen den beiden Kopplern **710**, **730** über die zweite Sprosse **718(2)** ist $(N + 2)\tau$). Die gesamte zusätzliche optische Weglänge für jede aufeinanderfolgende Sprosse wird so gewählt, daß sie τ ist. Die Laufzeit des Lichts vom 3×3 -Koppler **710** über eine Sprosse **718(i)** bis zum 2×2 -Koppler **730** ist also definiert als die Laufzeitverzögerung T_i der Sprosse **718(i)**. Entsprechend der vorstehenden Beschreibung ist T_i durch die optischen Weglängen über die Sprossen bestimmt wie folgt:

$$T_i = \tau$$

$i = 0$ (bei der gemeinsamen Sprosse **712**)

$$T_i = (N + i)\tau$$

$1 \leq i \leq N$ (bei jeder der Erfassungssprossen **718(1)**, **718(2)** und so weiter)

[0101] Daraus kann man erkennen, daß die optische Weglänge über die am weitesten entfernte Sprosse N folgende ist: $(N + N)\tau$ oder $2N\tau$.

[0102] Die Dauer jedes Impulses wird so gewählt, daß er nicht größer als τ ist. Somit ist, wie in [Fig. 18](#) dargestellt, der erste Impuls **800**, der zum 3×3 -Koppler **710** zurückkehrt, der Impuls, der durch die gemeinsame Sprosse **712** (das heißt Sprosse 0) von der Quelle **702** bis zum Reflektor **752** und zurück zu den Detektoren **704**, **706** läuft. Dieser Impuls hat eine Gesamtlaufzeit von 2τ . (Beim Vergleich der Laufzeiten wird die Laufzeit jedes Impulses zum Reflektor **752** durch die Verzögerungsschleife **750** und zurück ignoriert, da die Laufzeit allen Impulsen gemeinsam ist und einfach als Verschiebung (nicht dargestellt) im Zeitdiagramm in [Fig. 18](#) wirkt.) Die nächste Gruppe **810** von Impulsen, die zu den Detektoren **704**, **706** zurückkehren, sind Impulse, die die gemeinsame Sprosse **712** in einer Richtung durchlaufen und eine Erfassungssprosse **718(i)** in der entgegengesetzten Richtung durchlaufen (das heißt die Impulse $0,1$ und $1,0$; $0,2$ und $2,0$; $0,3$ und $3,0$ bis $0,N$ und

$N, 0$). Diese Impulse haben jeweilige Laufzeiten von $2\tau + N\tau$, $3\tau + N\tau$, $4\tau + N\tau$ bis $(N + 1)\tau + N\tau$. Somit werden alle Nutzimpulse zwischen einer Zeit $(N + 2)\tau$ und einer Zeit $(2N + 2)\tau$ (einschließlich der Dauer τ des letzten empfangenen Impulses) empfangen. Im Gegensatz dazu werden die interferierenden Impulse, die eine Erfassungssprosse **718(i)** in beiden Richtungen durchlaufen (das heißt die Impulse 1,1, 1,2 und 2,1, 1,3 und 3,1 ... 2,2, 2,3 und 3,2 ... und so weiter) als eine Gruppe von Impulsen **820** zwischen einer Zeit $2(N + 2)\tau$ und einer Zeit $(4N + 1)\tau$ empfangen. Die Signalimpulse werden also von den Rauschimpulsen getrennt.

[0103] Beispielsweise ist in [Fig. 18](#) die Anzahl der zurückgekehrten Impulse als Funktion der Zeit für $N = 50$ dargestellt. Wie dargestellt, wird ein einzelner Impuls zu einer Zeit 2τ empfangen. Danach werden während des Intervalls 3τ bis 52τ keine Impulse empfangen. Dann werden von 52τ bis 102τ zwei Impulse während jedes Zeitintervalls empfangen. Die Rauschimpulse kehren dann von einer Zeit 102τ bis zu einer Zeit 201τ zurück. Auf diese Weise werden die Signalimpulse zeitlich von den Rauschimpulsen getrennt, wobei verhindert wird, daß die Rauschimpulse den Signalimpulsen Rauschen hinzufügen. Die Elektronik (nicht dargestellt) kann ohne weiteres so synchronisiert werden, daß lediglich diejenigen Impulse Beachtung finden, die zwischen der Zeit 52τ und der Zeit 102τ empfangen werden.

[0104] Man beachte, daß die Quelle **702** so aktiviert werden kann, daß sie den nächsten Impuls in einem Zeitintervall von 150τ relativ zum vorherigen Impuls aussendet, da das Intervall 0τ bis 50τ als Antwort auf den nächsten Impuls das Intervall von Rauschimpulsen 150τ bis 200τ überlappen kann, die als Antwort auf den vorherigen Quellenimpuls zurückkehren. Somit kann die Ankunft einer nächsten Gruppe **830** von Nutzimpulsen zu einer Zeit 201τ beginnen. Deshalb hat die Ausführungsform in [Fig. 17](#) und [Fig. 18](#) ein Gesamttastrhältnis von etwa 1:3 für die Nutzsignalinformation.

[0105] Der Vorteil des geknickten Sagnac-Schallfasersensors **700** gegenüber der Sagnac-Schleife, die in den vorherigen Figuren dargestellt ist, besteht darin, daß die Verzögerungsfaser **750** gegen Modulation unempfindlich ist. Da die Zuführungsleitungen häufig sehr lang sind und großen Bewegungen und Schwingungen ausgesetzt sind, ist eine verteilte Zuführungsleitungsaufnahme eine potentiell ernste Begrenzung für einen akustischen Sagnac-Fasersensor. Im geknickten Sagnac-Schallfasersensor **700** sind die Quelle **702** und die Detektorzuführungsleitungen **770**, **772** unempfindlich, da sie sich außerhalb des Interferometers befinden. Die Verzögerungsschleifenzuführungsleitung **740** ist unempfindlich, da alle interferierenden Impulse, die diese gleiche Faser durchlaufen, um kleine Laufzeitverzögerungen (annähernd 1 Mikrosekunde) getrennt sind und somit die gleichen Störungen erfahren. Jede Modulation mit niedriger Frequenz (viel kleiner als annähernd 1 MHz) in der Verzögerungsschleifenzuführungsleitung und der Verzögerungsschleife selbst wirkt sich im wesentlichen bei beiden interferierenden Impulsen gleich aus und trägt somit nicht zu einer Phasendifferenz bei. Der Anordnungsabschnitt **716** und die gemeinsame Sprosse **712** umfassen die einzigen empfindlichen Fasern im Interferometer **700**.

[0106] Wie in [Fig. 17](#) gezeigt, können sich die ferngepumpten, verteilten erbiumdotierten Faserverstärker (EDFAs) **724** in der gesamten Anordnung **716** befinden, um Leistung zu regenerieren, wie oben beschrieben.

[0107] Der 3×3 -Koppler **710** wird verwendet, um jeden Sensor **722(i)** passiv in den Arbeitszustand nahe der Quadratur zu versetzen und um Quellenrauschsubtraktion zu ermöglichen. Die Rauschsubtraktion ergibt sich aus der Tatsache, daß jeder Detektor **704**, **706** in einen entgegengesetzten Kurvenverlauf versetzt wird (wegen der Möglichkeit, die Signale, die den 3×3 -Koppler **710** verlassen, aufeinander phasenmäßig abzustimmen), was bewirkt, daß die Phasenmodulation die Intensität in jedem Detektor asymmetrisch beeinflusst, während ein Quellenzusatzrauschen die Intensität in jedem Detektor symmetrisch beeinflusst. Dadurch werden durch Differenzverstärkung der Detektorausgangssignale die phasenmodulationsinduzierten Intensitätsänderungen addiert und das Intensitätsrauschen der Quelle wird auf die gleiche Weise subtrahiert, wie die Signale von den unerwünschten Interferometern subtrahiert würden.

[0108] Man beachte mit Bezug auf [Fig. 17](#) und [Fig. 18](#), daß ein ähnlicher Zeitmultiplexeffekt auftreten kann, wenn eine längere optische Weglänge durch die gemeinsame Sprosse **712** und kürzere optische Weglängen durch die Erfassungssprossen **718(i)** bereitgestellt werden. Beispielsweise kann die gemeinsame Sprosse **712** vorteilhafterweise so gewählt werden, daß sie eine optische Weglänge von $2N\tau$ (das heißt $T_0 = 2N$) haben kann, und die optischen Wege durch die Sprossen können vorteilhafterweise so gewählt werden, daß sie τ , 2τ , 3τ ... $N\tau$ entsprechen. Das Vorstehende kann folgendermaßen zusammengefaßt werden:

$$T_i = 2N\tau$$

$i = 0$ (für die gemeinsame Sprosse **712**)

$$T_i = i\tau$$

$1 \leq i \leq N$ (für jede der Erfassungssprossen **718(1)**, **718(2)** und so weiter)

[0109] Somit hat das Signal, das zuerst zurückkehrt, eine optische Laufzeit (wobei die Laufzeit durch die Verzögerungsschleife **750**, die allen Signalen gemeinsam ist, wiederum subtrahiert wird) von 2τ , was der Zeit entspricht, die erforderlich ist, um die erste Sprosse **718(1)** in beiden Richtungen zu durchlaufen. Die längste Laufzeitverzögerung jedes Signals, das eine der Erfassungssprossen **718(i)** in beiden Richtungen durchläuft, ist $2N$ für einen Signalimpuls, der in beiden Richtungen die am weitesten entfernte Erfassungssprosse **718(N)** durchläuft. Das Nutzsignal, das zuerst zurückkehrt, ist ein Signal, das sich aus der Interferenz eines Signals, das über die gemeinsame Sprosse **712** zum Reflektor **752** läuft und durch die erste Erfassungssprosse **718(1)** zurückkehrt, mit einem Signal ergibt, das über die erste Erfassungssprosse **718(1)** zum Reflektor **752** läuft und über die gemeinsame Sprosse **712** zurückkehrt. Das Interferenzsignal trifft zu einer Zeit $(2N + 1)\tau$ ein, die später ist als das letzte unerwünschte Signal. Das letzte Nutzsignal trifft zu einer Zeit $(2N + N)\tau$ ein (das heißt $3N\tau$). Schließlich trifft ein Signal, das durch einen Impuls erzeugt wird, der in der gemeinsamen Sprosse **712** zum Reflektor **752** hin und von ihm weg läuft, zu einer Zeit $4N\tau$ ein, die sehr wohl von den nutzbaren Interferenzsignalen getrennt ist.

[0110] Es ist erwünscht, daß Schallsensoren einen so großen dynamischen Bereich (einen Bereich von detektierbaren akustischen Modulationsamplituden) wie möglich haben. Ohne Demodulationstechniken, zum Beispiel das phasenerzeugte Trägerschema, zu verwenden, ist die kleinste detektierbare Phasenmodulation durch die Rauschleistung der Anordnung festgelegt, und die größte detektierbare Phasenmodulation (annähernd 1 rad) ist durch die nichtlineare Ansprechfunktion eines Interferometers festgelegt. In einem Mach-Zehnder-Sensor ist die Umsetzung der akustischen Modulation in Phasenmodulation eine Funktion lediglich der Ansprechempfindlichkeit des Hydrophons. Somit ergeben diese Grenzen der detektierbaren Phasenmodulation zusammen mit dieser Umsetzung der akustischen Modulation in Phasenmodulation den Bereich der akustischen Modulation, den der Sensor detektieren kann.

[0111] In einer geknickten akustischen Sagnac-Fasersensoranordnung ist die Umsetzung der akustischen Modulation in Phasenmodulation eine Funktion sowohl der Ansprechempfindlichkeit jedes der Hydrophone (Sensoren) **722(i)** als auch der Länge der Verzögerungsschleife **750**. Wenn die Länge der Verzögerungsschleife **750** geändert wird, kann somit der dynamische Bereich der Sensoren **722(i)** korrigiert werden, ohne die Hydrophone **722(i)** selbst zu modifizieren. Wenn zwei Reflektoren **742(1)** und **752(2)** verwendet werden, kann außerdem jeder Sensor **718(i)** zwei verschiedene Verzögerungsschleifen **750(1)** und **750(2)** haben, wie in einem Sensor **850** in [Fig. 19](#) gezeigt. Dadurch ist es möglich, daß jeder Sensor **722(i)** zwei Signale zurücksendet, die verschiedene dynamische Bereiche haben, wie oben mit Bezug auf [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#) beschrieben, wodurch der gesamte dynamische Bereich jedes Sensors **722(i)** stark erhöht wird. Der Preis dafür ist eine Verringerung des Tastverhältnisses für jedes einzelne Signal um einen Faktor $1/(\text{Anzahl der Verzögerungsschleifen})$.

[0112] [Fig. 20](#) stellt einen Sensor **900** dar, der eine Phasennullabgleichstechnik implementiert, die der Technik gleicht, die bisher in Fasergyroskopen verwendet worden ist. Der Verzögerungsschleifenreflektor **752** von [Fig. 17](#) wird im Sensor **900** von [Fig. 20](#) nicht verwendet. Vielmehr werden stattdessen Impulse über eine Rückleitung **910** in den bisher unbenutzten Anschluß des 2×2 -Kopplers **730** zurückgesendet. Ein optischer Isolator **912** wird in die Rückleitung **910** eingefügt, um zu verhindern, daß Licht die Verzögerungsschleife **750** in beiden Richtungen durchläuft. Der Sensor **900** von [Fig. 20](#) verhält sich genauso wie der Sensor **700** von [Fig. 17](#) mit dem Reflektor **752**. Der Sensor **900** erlaubt jedoch die Einfügung eines Phasenmodulators **920** in die Rückleitung **910**. Der Phasenmodulator **920** wird so aktiviert, daß jedem Impuls einzeln eine Phasenverschiebung hinzugefügt wird. Durch Zuführung der detektierten Phasenverschiebung in den Phasenmodulator **920** über einen Differenzverstärker **922** werden Phasenänderungen auf null abgeglichen, und die erforderliche angewendete Phasenverschiebung im Phasenmodulator **920** wird zum Signal. Bei diesem Phasennullabgleichsverfahren ist der dynamische Bereich der Anordnung **900** nur durch die höchste Phasenverschiebung begrenzt, die der Phasenmodulator **920** ermöglichen kann.

[0113] [Fig. 21](#) stellt eine weitere alternative Ausführungsform von [Fig. 19](#) dar, bei der die beiden Verzögerungsschleifen **750(1)** und **750(2)** nicht mit der gleichen Verzögerungsschleifenzuführungsleitung verbunden sind. Vielmehr ist das erste Ende der ersten Verzögerungsschleife **750(1)** mit einer ersten Verzögerungsschleifenzuführungsleitung **740(1)** verbunden, die mit dem vierten Anschluß des 2×2 -Kopplers **730** wie in [Fig. 19](#) verbunden ist. Das zweite Ende der ersten Verzögerungsschleife **750(1)** ist mit dem ersten Reflektor **752(1)** wie oben gekoppelt. Das erste Ende der zweiten Verzögerungsschleife **750(2)** ist mit dem dritten Anschluß des 2×2 -Kopplers **730** über eine zweite Verzögerungsschleifenzuführungsleitung **740(2)** verbunden, und das

zweite Ende der zweiten Verzögerungsschleife **750(2)** ist mit dem zweiten Reflektor **752(2)** gekoppelt. Annähernd die Hälfte des Lichts vom 2×2 -Koppler **730** wird in jede der Zuführungsleitungen **740(1)**, **740(2)** eingekoppelt. Das Licht in jeder Zuführungsleitung **740(1)**, **740(2)** wird in der jeweiligen Verzögerungsschleife **750(1)**, **750(2)** verzögert und wieder zum 2×2 -Koppler **730** reflektiert wie oben. Das reflektierte Licht wird in die gemeinsame Sprosse **712** und in die Anordnung **716** eingekoppelt. Die Laufzeitverzögerungen der Verzögerungsschleifen **750(1)**, **750(2)** werden so gewählt, daß keiner der $N + 1$ Impulse, die vom vierten Anschluß des 2×2 -Kopplers **730** über die erste Verzögerungsschleife **750(1)** laufen, mit irgendeinem der $N + 1$ Impulse, die vom dritten Anschluß des 2×2 -Kopplers **730** über die zweite Verzögerungsschleife **750(2)** laufen, zeitlich überlappt. Somit ermöglicht die Ausführungsform in [Fig. 21](#) eine ähnliche Funktionalität wie die Ausführungsform in [Fig. 19](#); aber die Ausführungsform in [Fig. 21](#) nutzt das Licht, das aus dem dritten Anschluß des 2×2 -Kopplers **730** in [Fig. 19](#) ausgekoppelt wurde und ungenutzt blieb.

[0114] [Fig. 22](#) stellt eine alternative Ausführungsform eines faseroptischen akustischen Sensorsystems **1000** dar, das eine geknickte Sagnac-Sensoranordnung verwendet. In dem System **1000** ist eine Quelle **1004** mit einem ersten Anschluß eines polarisationserhaltenden 2×2 -Kopplers **1006** über einen X-Polarisator **1008** gekoppelt. Ein Detektor **1002** ist mit einem zweiten Anschluß des 2×2 -Kopplers **1006** über einen X-Polarisator **1010** verbunden. Ein zweiter Detektor (nicht dargestellt) kann in die Ausführungsform von [Fig. 22](#) vorteilhaft eingefügt sein, wenn Licht aus der Faser, die zur Quelle **1004** führt, eingekoppelt wird. Der X-Polarisator **1008** gibt nur Licht von der Quelle **1004** mit einer ersten Polarisation weiter (zum Beispiel einer X-Polarisation). Somit empfängt der polarisationserhaltende Koppler **1006** Licht mit einer X-Polarisation von der Quelle **1004** und koppelt das Licht über einen dritten Anschluß in eine gemeinsame Sprosse **1020** und über einen vierten Anschluß in eine Sensoranordnung **1022** ein. Die Sensoranordnung **1022** hat eine ähnliche Struktur wie die Sensoranordnung **716** von [Fig. 17](#), und demzufolge sind gleiche Elemente gleich bezeichnet.

[0115] Man beachte, daß die beiden X-Polarisatoren **1008**, **1010** durch einen oder mehrere X-Polarisatoren an alternativen Stellen im System **1000** ersetzt werden können.

[0116] Die gemeinsame Sprosse **1020** ist über einen X-Polarisator **1030** mit einem ersten Anschluß eines zweiten polarisationserhaltenden 2×2 -Kopplers **1032** gekoppelt. Das Licht, das zur Anordnung **1022** läuft, läuft zuerst durch einen Depolarisator **1034** und dann zur ersten Eingangs/Ausgangsfaser **714**. Der Depolarisator **1034** koppelt im wesentlichen gleiche Mengen des X-polarisierten Lichts wie das Y-polarisierte Licht in das Y-polarisierte Licht ein. Somit breitet sich annähernd 50% des Lichts in der Anordnung **1022** als X-polarisiertes Licht und annähernd 50% in der Anordnung **1022** als Y-polarisiertes Licht aus.

[0117] Nach dem Durchlaufen der Sprossen der Anordnung **1022** läuft das Licht über die zweite Eingangs/Ausgangsfaser **720** und einen Y-Polarisator **1040** zu einem zweiten Anschluß des zweiten Kopplers **1032**. Der Y-Polarisator **1040** läßt nur Y-polarisiertes Licht in den zweiten Koppler **1032** eintreten. Der Koppler **1032** kombiniert das Licht aus der Anordnung **1022** und aus der gemeinsamen Sprosse **1020**. Annähernd die Hälfte des Lichts, das in den Koppler **1032** eintritt, wird über einen dritten Anschluß des Kopplers **1032** in einen lichtabsorbierenden Abschluß **1042** eingekoppelt, und annähernd die Hälfte des Lichts wird in eine Zuführungsfaser **1050** eingekoppelt, die das Licht zu einem ersten Ende einer Verzögerungsschleife **1052** durchläßt.

[0118] Das Licht läuft durch die Verzögerungsschleife **1052** bis zu einem Faraday-Drehspiegel (FRM) **1054**. Der Betrieb des Faraday-Drehspiegels **1054** ist bekannt, und auf dessen ausführliche Beschreibung wird hier verzichtet. Wenn Licht in einer Polarisation auf den Faraday-Drehspiegel **1054** fällt, wird es grundsätzlich in der orthogonalen Polarisation reflektiert. Somit wird das X-polarisierte Licht, das die gemeinsame Sprosse **1020** durchläuft, als Y-polarisiertes Licht reflektiert, und das Y-polarisierte Licht, das die Anordnung durchläuft, wird als X-polarisiertes Licht reflektiert.

[0119] Das reflektierte Licht läuft zurück durch die Verzögerungsanordnung **1052** und tritt in den vierten Anschluß des Kopplers **1032** ein. Das Licht wird in die gemeinsame Sprosse **1020** und die Anordnung **1022** eingekoppelt. Der X-Polarisator **1030** in der gemeinsamen Sprosse gibt nur das Licht in der X-Polarisation weiter, das sich ursprünglich durch die Anordnung **1022** ausgebreitet hat. Ebenso gibt der Y-Polarisator **1040** in der Anordnung **1022** nur Y-polarisiertes Licht weiter, das sich ursprünglich über die gemeinsame Sprosse **1020** ausgebreitet hat.

[0120] Nach Durchlaufen der Anordnung **1022** wird das zurückkehrende Y-polarisierte Licht im Depolarisator **1034** depolarisiert, um sowohl X-polarisiertes Licht als auch Y-polarisiertes Licht zu erzeugen. Das Licht von der gemeinsamen Sprosse **1020** tritt in den dritten Anschluß des Kopplers **1006** ein, und das Licht vom Depolarisator **1034** tritt in den vierten Anschluß des Kopplers **1006** ein. Das Licht wird im Koppler kombiniert, und

das X-polarisierte Licht von den beiden Anschlüssen, das die gleiche optische Strecke durchlaufen hat, interferiert und wird in den ersten und zweiten Anschluß eingekoppelt. Der Teil, der in den zweiten Anschluß eingekoppelt wird, läuft durch den X-Polarisator **1010** zum Detektor **1002**, wo die interferierenden Signale detektiert werden.

[0121] Man beachte, daß nur das Licht, das ursprünglich verschiedene Wege zum und vom Faraday-Drehspiegel **1054** durchlaufen hat, im Koppler **1006** interferiert. Das einzige Licht, das die gemeinsame Sprosse **1020** in der reflektierten Richtung durchlaufen kann, ist X-polarisiertes Licht, das sich ursprünglich in der Anordnung **1022** als Y-polarisiertes Licht ausgebreitet hat. Ebenso ist das einzige Licht, das irgendeine der Sprossen der Anordnung **1022** in der reflektierten Richtung durchläuft, Y-polarisiertes Licht, das sich ursprünglich in der gemeinsamen Sprosse **1020** als X-polarisiertes Licht ausgebreitet hat. Potentiell interferierendes Licht kann die Sprossen nicht in beiden Richtungen durchlaufen, um die Rauschsignale zu erzeugen, die oben in Verbindung mit den oben beschriebenen Ausführungsformen beschrieben sind. Somit kann jeder der Impulse, der in der Anordnung **1022** aus dem reflektierten Impuls erzeugt wird, der ursprünglich die gemeinsame Sprosse **1020** durchlaufen hat, mit nur einem der Impulse interferieren, der ursprünglich in der Anordnung **1022** erzeugt wurde und der die gemeinsame Sprosse **1020** durchläuft, nachdem er reflektiert worden ist. Somit ist es in der Ausführungsform von [Fig. 22](#) nicht notwendig, daß zusätzliche Verzögerungseinrichtungen enthalten sind, um die Nutzsignalimpulse von Rauschsignalimpulsen zu trennen.

[0122] [Fig. 23A](#), [Fig. 23B](#) und [Fig. 23C](#) stellen weitere alternative Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung dar. Eine Sensoranordnung **1100** in den Ausführungsformen von [Fig. 23A](#), [Fig. 23B](#) und [Fig. 23C](#) ist der Sensoranordnung **700** in der Ausführungsform von [Fig. 17](#) ähnlich, und gleiche Elemente sind dementsprechend bezeichnet. Die Ausführungsformen von [Fig. 23A](#), [Fig. 23B](#) und [Fig. 23C](#) weisen eine nichtpolarisierte Quelle **1102** auf. Der 2×2 -Koppler **730** von [Fig. 17](#) ist durch einen Polarisationsstrahlteiler (PBS) **1104** in [Fig. 23A](#), [Fig. 23B](#) und [Fig. 23C](#) ersetzt. Der Reflektor **752** in [Fig. 17](#) ist durch einen Faraday-Drehspiegel (FRM) **1106** ersetzt, der dem Faraday-Drehspiegel **1054** von [Fig. 22](#) gleicht. Der 3×3 -Koppler **710** in [Fig. 23A](#), [Fig. 23B](#) und [Fig. 23C](#) muß kein polarisationserhaltender Koppler sein.

[0123] Jede der [Fig. 23A](#), [Fig. 23B](#) und [Fig. 23C](#) weist einen Depolarisator **1110** auf. In [Fig. 23A](#) befindet sich der Depolarisator an der ersten Eingangs/Ausgangsfaser **714** der Anordnung. In [Fig. 23B](#) befindet sich der Depolarisator **1110** an der gemeinsamen Sprosse **712**. In [Fig. 23C](#) befindet sich der Depolarisator **1110** an der zweiten Eingangs/Ausgangsfaser **720** der Anordnung.

[0124] In der Ausführungsform von [Fig. 23A](#) tritt Licht von der nichtpolarisierten Quelle **1102** in den 3×3 -Koppler **710** ein und wird in annähernd gleichen Teilen in die gemeinsame Sprosse **712** und die erste Eingangs/Ausgangsfaser **714** der Anordnung eingekoppelt. Das Licht, das sich in der ersten Eingangs/Ausgangsfaser **714** der Anordnung ausbreitet, durchläuft den Depolarisator **1110**, was die Wirkung hat, daß im wesentlichen die Hälfte des Lichts in die Anordnung in einer Polarisation (zum Beispiel in der X-Polarisation) eintritt, um in die orthogonale Polarisation (zum Beispiel die Y-Polarisation) eingekoppelt zu werden, und ebenso wird die Hälfte des Lichts, die in die Anordnung in der Y-Polarisation eintritt, in die X-Polarisation eingekoppelt. Somit stammt nach dem Depolarisator **1110** die Hälfte des Lichts in der X-Polarisation aus der X-Polarisation und die andere Hälfte des Lichts in der X-Polarisation stammt aus der Y-Polarisation. Ebenso stammt nach dem Depolarisator **1110** die Hälfte des Lichts in der Y-Polarisation aus der Y-Polarisation und die andere Hälfte des Lichts in der Y-Polarisation stammt aus der X-Polarisation. Im Endeffekt verschlüsselt der Depolarisator **1110** das nichtpolarisierte Licht.

[0125] Das Licht durchläuft die Anordnung **716** auf die Weise, die oben in Verbindung mit den anderen Ausführungsformen beschrieben worden ist. Das Licht, das aus der Anordnung **716** austritt, läuft durch die zweite Eingangs/Ausgangsfaser **720** der Anordnung bis zu einem ersten Anschluß **1121** des Polarisationsstrahlteilers **1104**. Der Polarisationsstrahlteiler **1104** teilt das einfallende Licht in die zwei orthogonalen Polarisationen (das heißt die X-Polarisation und die Y-Polarisation). Zum Zwecke dieser Beschreibung wird angenommen, daß der Polarisationsstrahlteiler **1104** wie ein polarisationsabhängiger Spiegel arbeitet, der in einem Winkel von 45° ausgerichtet ist, wobei Licht, das in den ersten Anschluß **1121** in einer Polarisation (zum Beispiel X-Polarisation) eintritt, zu einem zweiten Anschluß **1122** reflektiert wird, und Licht, das in den ersten Anschluß **1121** in der anderen Polarisation (zum Beispiel Y-Polarisation) eintritt, zu einem dritten Anschluß **1123** durchgelassen wird. In der dargestellten Ausführungsform wird das Licht, das aus dem zweiten Anschluß **1122** austritt, nichtreflektierend vom Anschluß **732** absorbiert. Das Y-polarisierte Licht, das aus dem dritten Anschluß **1123** austritt, läuft durch die Verzögerungsschleifenzuführungsfaser **740** über die Verzögerungsschleife **750** zum Faraday-Drehspiegel **1106**. Man beachte, daß dieses Y-polarisierte Licht von dem Anordnungsabschnitt **716** den Depolarisator **1110** durchlief, und die Hälfte davon war ursprünglich X-polarisiertes Licht und die Hälfte davon war ur-

sprünglich Y-polarisiertes Licht. Wie oben beschrieben, bewirkt der Faraday-Drehspiegel **1106**, daß das einfallende Licht in die orthogonale Polarisation eingekoppelt wird. Somit wird Y-polarisiertes Licht in die X-Polarisation eingekoppelt.

[0126] Das X-polarisierte Licht, das vom Faraday-Drehspiegel **1106** reflektiert wird, läuft durch die Verzögerungsschleife **750** und die Verzögerungsschleifenzuführungsfaser **740** zurück zum dritten Anschluß **1123** des Polarisationsstrahlteilers. Da das Licht nunmehr in der X-Polarisation ist, wird das Licht zu einem vierten Anschluß **1124** reflektiert und nicht zum ersten Anschluß **1121** durchgelassen. Somit wird das Y-polarisierte Licht, das ursprünglich von der Anordnung **716** in den Polarisationsstrahlteiler einfiel, in die gemeinsame Sprosse **712** eingekoppelt, um sich zum 3×3 -Koppler **710** zurück in der X-Polarisation zu laufen.

[0127] Nichtpolarisiertes Licht, das vom 3×3 -Koppler **710** über die gemeinsame Sprosse **712** zum Polarisationsstrahlteiler **1104** läuft, tritt über den vierten Anschluß **1124** in den Polarisationsstrahlteiler **1104** ein. Die Komponenten des Lichts in der Y-Polarisation werden zum zweiten Anschluß **1122** durchgelassen und nicht-reflektierend vom Abschluß **732** abgeschlossen. Die Komponenten des Lichts in der X-Polarisation werden zum dritten Anschluß **1123** reflektiert und laufen über die Verzögerungsschleifenzuführungsfaser **740** und die Verzögerungsschleife **750** zum Faraday-Drehspiegel **1106**. (Der Grund für die Einbeziehung des Depolarisators **1110** wird nunmehr verständlich. Da nur das X-polarisierte Licht von der gemeinsamen Sprosse **712** in die Verzögerungsschleifenzuführungsfaser **740** eingekoppelt wird, stellt der Depolarisator **1110** sicher, daß das Licht, das von der Anordnung **716** in die Verzögerungsschleifenzuführungsfaser **740** eingekoppelt wird, auch einen Teil des Lichts aufweist, das ursprünglich X-polarisiert war) Der Faraday-Drehspiegel **1106** reflektiert das Licht als Y-polarisiertes Licht, und das Y-polarisierte Licht läuft durch die Verzögerungsschleife und die Zuführungsfaser zum dritten Anschluß **1123** des Polarisationsstrahlteilers **1104**.

[0128] Das Y-polarisierte Licht, das in den dritten Anschluß **1123** des Polarisationsstrahlteilers **1104** eintritt, wird zum ersten Anschluß **1121** und somit zur zweiten Eingangs/Ausgangsfaser **720** der Anordnung durchgelassen. Das Y-polarisierte Licht läuft über die Anordnung **716** zur ersten Eingangs/Ausgangsfaser **714** der Anordnung und läuft dann durch den Depolarisator **1110** bis zum 3×3 -Koppler **710**. Der Depolarisator **1110** setzt annähernd 50% des Y-polarisierten Lichts in X-polarisiertes Licht um. Das X-polarisierte Licht vom Depolarisator **1110** interferiert mit dem X-polarisierten Licht von der gemeinsamen Sprosse **712**. Das resultierende kombinierte Licht wird vom Detektor **704** oder dem Detektor **706** entsprechend der Phasenbeziehung zwischen den interferierenden Lichtsignalen im 3×3 -Koppler **710** detektiert.

[0129] Man beachte, daß das X-polarisierte Licht, das vom Depolarisator **1110** in den 3×3 -Koppler **710** eintritt, und das X-polarisierte Licht von der gemeinsamen Sprosse **712** identische Weglängen zurücklegen. Beispielsweise läuft Licht, das zuerst die gemeinsame Sprosse **712** durchläuft, in der X-Polarisation durch die gemeinsame Sprosse **712** und dann in der Y-Polarisation durch die Anordnung **716**. Andererseits läuft das Licht, das zuerst die Anordnung **716** durchläuft, in der Y-Polarisation durch die Anordnung **716** und dann in der X-Polarisation durch die gemeinsame Sprosse. Da die beiden "gegenläufigen" Lichtsignale in der gleichen Polarisation sind, wenn sie die entsprechenden Abschnitte des Interferometerwegs durchlaufen, sind die Lauflängen identisch, außer bei der Auswirkung des einfallenden Rauschens, das von der Anordnung **716** erfaßt wird.

[0130] Man beachte, daß der Abschluß **732**, der mit dem zweiten Anschluß **1122** des Polarisationsstrahlteilers **1104** gekoppelt ist, durch eine zweite Verzögerungsschleife (nicht dargestellt) und einen zweiten Faraday-Drehspiegel (nicht dargestellt) ersetzt werden kann, um einen zweiten Interferometerweg für das Licht bereitzustellen, das in der Y-Polarisation interferiert. Durch Anpassung der Laufzeitverzögerung, die durch die zweite Verzögerungsschleife bewirkt wird, kann verhindert werden, daß das Rücklaufsignal vom zweiten Interferometerweg sich mit dem Rücklaufsignal vom ersten Interferometerweg überlappt.

[0131] Die Ausführungsform in [Fig. 23B](#) gleicht der Ausführungsform in [Fig. 23A](#), außer daß der Depolarisator **1110** in der gemeinsamen Sprosse **712** positioniert ist. Die Wirkung des Depolarisators **1110** in [Fig. 23B](#) besteht darin, (1) zu bewirken, daß ein Teil des Lichts in der gemeinsamen Sprosse **712**, das vom Polarisationsstrahlteiler **1104** in einer einzigen Polarisation (zum Beispiel in der X-Polarisation) zurückkehrt, in die orthogonale Polarisation eingekoppelt wird, und (2) das nichtpolarisierte Licht, das vom 3×3 -Koppler **710** über die gemeinsame Sprosse **712** in Richtung des Polarisationsstrahlteilers **1104** läuft, zu verschlüsseln. Dadurch wird sichergestellt, daß das Licht interferiert, wenn es im 3×3 -Koppler **710** rekombiniert wird (der gleiche Grund, warum der Depolarisator **1110** der Faser **714** in [Fig. 23A](#) hinzugefügt wurde).

[0132] Die Ausführungsform in [Fig. 23C](#) gleicht auch der Ausführungsform in [Fig. 23A](#), außer daß der Depolarisator **1110** in der Eingangs/Ausgangsfaser **720** der zweiten Anordnung positioniert ist. Die Anordnung von

Fig. 23C ist funktionell der Ausführungsform in **Fig. 23A** äquivalent, da es unwesentlich ist, ob das Licht durch den Anordnungsabschnitt **716** und dann durch den Depolarisator **1110** läuft oder durch den Depolarisator **1110** und dann durch den Anordnungsabschnitt **716** läuft. Somit ist die Funktion der Ausführungsform in **Fig. 23C** im wesentlichen die gleiche wie die Funktion der Ausführungsform in **Fig. 23A**, wie oben beschrieben.

[0133] Obwohl die vorstehende Beschreibung der Anordnung gemäß der vorliegenden Erfindung sich mit der Unterwasserschallerfassung beschäftigt, ist es verständlich, daß die vorliegende Erfindung auch verwendet werden kann, um beliebige Meßgrößen zu erfassen, die dazu gebracht werden können, nichtreziproke Phasenmodulationen in einer Faser hervorzurufen. Wenn beispielsweise die Hydrophone durch eine alternative Erfassungsvorrichtung ersetzt würden, die auf eine andere Meßgröße anspricht, dann würde die Anordnung diese Meßgröße auf die gleiche Weise detektieren, wie Schallwellen detektiert werden. Die Anordnung der vorliegenden Erfindung kann vorteilhaft verwendet werden, um Vibrationen, Einwirkungen, Einschläge, Chemikalien, Temperatur, Flüssigkeitsstände und Verschmutzung zu erfassen. Die Anordnung der vorliegenden Erfindung kann auch verwendet werden, um eine Anzahl verschiedener Sensoren zu kombinieren, die sich entweder an der gleichen Stelle oder an verschiedenen Stellen befinden (zum Beispiel bei der Detektion verschiedener Fehler an verschiedenen Punkten entlang dem Körper eines Schiffs oder eines Gebäudes). Andere exemplarische Anwendungen sind u. a. die Detektion und Verfolgung von sich bewegendenden Kraftfahrzeugen auf Autobahnen oder Flugzeugen auf Landebahnen zur Verkehrsüberwachung und -kontrolle.

[0134] Obwohl die Ausführungsformen in Verbindung mit bestimmten Ausführungsformen gemäß der vorliegenden Erfindung oben beschrieben sind, versteht es sich, daß die Beschreibungen der Ausführungsformen die Erfindung veranschaulichen und nicht dazu bestimmt sind, sie einzuschränken. Verschiedene Modifikationen und Anwendungen sind für den Fachmann offenkundig, ohne vom Schutzbereich der Erfindung abzuweichen, wie er in den beigefügten Ansprüchen definiert ist.

Patentansprüche

1. Sensor, umfassend:

einen ersten optischen Koppler (**710; 1006**), um Eingangslicht zu empfangen und das Eingangslicht an einen ersten optischen Pfad (**712; 1020**) mit einer ersten optischen Ausbreitungsverzögerung und an ein Feld (**716; 1022**) von Sensoren zu koppeln, wobei das Feld von Sensoren wenigstens einen ersten Sensor (**722(1)**) in einem zweiten optischen Pfad (**718(1)**) umfasst, wobei der zweite optische Pfad eine zweite optische Ausbreitungsverzögerung aufweist, die sich von der ersten optischen Ausbreitungsverzögerung unterscheidet; einen zweiten optischen Koppler (**730; 1032**), um Licht von dem ersten optischen Pfad und von dem zweiten optischen Pfad zu empfangen, um das Licht an einen Verzögerungspfad (**740, 750, 752; 1050, 1052, 1054**) zu koppeln, und um Licht, das von dem Verzögerungspfad zurückkehrt, zurück an den ersten optischen Pfad und den zweiten optischen Pfad zu koppeln, um das Licht zu veranlassen sich an den ersten optischen Koppler auszubreiten, um dort erneut kombiniert zu werden, wobei Teile des Lichts in dem ersten optischen Koppler interferieren, wenn die Teile des Lichts sich über gleiche Gesamtentfernungen durch den ersten optischen Pfad und den zweiten optischen Pfad vor Rückkehr an den ersten Koppler bewegt haben; und einen Detektor (**704, 706; 1002**), der Veränderungen in der Intensität des Lichts, herrührend von Lichtimpulsen, die in dem ersten Koppler interferieren, erfasst.

2. Sensor nach Anspruch 1, wobei der Verzögerungspfad (**740, 750, 752; 1050, 1052, 1054**) eine Länge von optischer Faser (**750; 1052**) und einen Reflektor (**752; 1054**) umfasst, wobei die Länge von optischer Faser gewählt ist, um eine optische Verzögerungszeit bereitzustellen, wobei das Licht sich durch die Länge von optischer Faser von dem zweiten optischen Koppler (**1032**) an den Reflektor ausbreitet, wobei der Reflektor Licht in die Länge von optischer Faser hinein reflektiert, um sich durch die Länge von optischer Faser zu dem zweiten optischen Koppler auszubreiten.

3. Sensor nach Anspruch 2, wobei der Reflektor einen Faraday-Drehspiegel (**1054**) umfasst, wobei das Licht, das auf den Faraday-Drehspiegel in einer ersten Polarisation einfällt, in einer orthogonalen zweiten Polarisation reflektiert wird und das Licht, das in der zweiten Polarisation einfällt, in der ersten Polarisation reflektiert wird.

4. Sensor nach Anspruch 3, ferner umfassend einen ersten Polarisator (**1030**), um dem Licht zu ermöglichen sich in der ersten Polarisation in dem ersten optischen Pfad (**1020**) zwischen dem ersten optischen Koppler (**1006**) und dem zweiten optischen Koppler (**1032**) auszubreiten, und einen zweiten Polarisator (**1040**), um Licht zu ermöglichen sich in der zweiten Polarisation in dem zweiten optischen Pfad (**718(2)**) auszubreiten, wobei der Faraday-Drehspiegel (**1054**) bewirkt, dass sich Licht, das sich in dem ersten optischen Pfad in der ers-

ten Richtung ausbreitet, nur in dem zweiten optischen Pfad in der zweiten Richtung ausbreitet, und bewirkt, dass sich Licht, das sich in dem zweiten optischen Pfad in der ersten Richtung ausbreitet, nur in dem ersten optischen Pfad in der zweiten Richtung ausbreitet, wobei Teile des Lichts, die sich in der zweiten Richtung in dem ersten optischen Pfad ausbreiten, an dem ersten optischen Koppler mit Teilen des Lichts interferieren, die sich in der zweiten Richtung in dem zweiten optischen Pfad ausbreiten, die sich im wesentlichen über gleiche gesamte optische Pfadlängen in den ersten und zweiten Richtungen bewegen.

5. Sensor nach Anspruch 1, wobei der Verzögerungspfad (**740, 750**) das Licht von einem ersten Anschluss des zweiten optischen Kopplers (**730**) empfängt und Licht an einen zweiten Anschluss des zweiten optischen Kopplers zurückgibt.

6. Sensor nach Anspruch 1, wobei der Verzögerungspfad (**740, 750**) einen Phasenmodulator (**920**) einschließt, der Licht moduliert, das sich in dem Verzögerungspfad ausbreitet, wobei der Phasenmodulator auf das Ausgangssignal von dem Detektor (**704, 706**) reagiert, um das Licht, das sich in dem Verzögerungspfad ausbreitet, zu modulieren, um das Ausgangssignal von dem Detektor auf Null zu bringen.

7. Sensor nach Anspruch 1, ferner umfassend eine Quelle (**702; 1004**), um das Eingangslicht zu erzeugen.

8. Sensor nach Anspruch 1, ferner umfassend eine nicht polarisierte Quelle (**1102**), um das Eingangslicht zu erzeugen, und einen Depolarisator (**1110**), um Licht zu depolarisieren, das durch die nicht polarisierte Quelle erzeugt wird.

9. Sensor nach Anspruch 1, ferner umfassend einen zweiten Sensor (**722(2)**) in dem Feld (**716; 1022**), wobei der zweite Sensor in einem dritten optischen Pfad (**718(2)**) ist, der eine dritte optische Ausbreitungsverzögerung aufweist, die sich von der ersten optischen Ausbreitungsverzögerung und der zweiten optischen Ausbreitungsverzögerung unterscheidet.

10. Sensor nach Anspruch 1, wobei Licht, welches sich durch den ersten optischen Pfad (**712; 1020**) ausbreitet, im wesentlichen durch ein akustisches Signal nicht beeinflusst wird und wobei wenigstens ein Teil des zweiten optischen Pfads (**718(1)**) durch das akustische Signal beeinflusst wird, um eine Phase des Lichts, welches durch den zweiten optischen Pfad (**718(1)**) geht, zu modulieren.

11. Sensor nach Anspruch 1, wobei:
das Licht von dem ersten optischen Pfad (**712; 1020**) und Licht von dem zweiten optischen Pfad (**718(1)**) sich in einer ersten Richtung von dem ersten optischen Koppler (**710, 1006**) zu dem zweiten optischen Koppler (**730; 1032**) ausbreiten und einen jeweiligen ersten Teil des Lichts und einen jeweiligen zweiten Teil des Lichts umfassen, die zeitlich voneinander getrennt sind in Übereinstimmung mit Differenzen in der ersten optischen Ausbreitungsverzögerung und der zweiten optischen Ausbreitungsverzögerung;
wobei der erste Teil des Lichts und der zweite Teil des Lichts von dem Verzögerungspfad (**740, 750, 752; 1050, 1052, 1054**) als ein jeweiliger erster verzögerter Teil des Lichts und ein jeweiliger zweiter verzögerter Teil des Lichts zurückkehren;
der zweite optische Koppler einen ersten Teil des ersten verzögerten Teils des Lichts an den ersten optischen Pfad koppelt und einen zweiten Teil des ersten verzögerten Teils des Lichts an den zweiten optischen Pfad koppelt, wobei die ersten und zweiten Teile des ersten verzögerten Teils des Lichts sich in einer zweiten Richtung von dem zweiten optischen Koppler zu dem ersten optischen Koppler ausbreiten;
der zweite optische Koppler einen ersten Teil des zweiten verzögerten Teils des Lichts an den ersten optischen Pfad koppelt und einen zweiten Teil des zweiten verzögerten Teils des Lichts an den zweiten optischen Pfad koppelt, wobei sich die ersten und zweiten Teile des zweiten verzögerten Teils des Lichts in der zweiten Richtung von dem zweiten optischen Koppler zu dem ersten optischen Koppler ausbreiten;
die Teile des Lichts, die sich in der zweiten Richtung zu dem ersten optischen Koppler bewegen, in dem ersten optischen Koppler neu kombiniert werden und von dem ersten optischen Koppler an den Detektor (**705, 706; 1002**) ausgegeben werden; und
der Detektor eine Interferenz zwischen Teilen des Lichts erfasst, die sich im wesentlichen über gleiche Gesamtpfadlängen in den ersten und den zweiten Richtungen bewegen.

12. Verfahren zum Erfassen von akustischen Signalen, umfassend die folgenden Schritte:
Erzeugen eines Eingangslichtsignals;
Koppeln des Eingangslichtsignals an einen ersten optischen Pfad (**712**) und an eine Feld (**716**) von Sensoren, um sich darin in jeweiligen ersten Richtungen auszubreiten, wobei das Feld von Sensoren wenigstens einen ersten Sensor (**722(1)**) in einem zweiten optischen Pfad (**718(1)**) umfasst, wobei der erste optische Pfad eine

erste optische Ausbreitungsverzögerung aufweist, wobei der zweite optische Pfad eine zweite optische Ausbreitungsverzögerung aufweist, die sich von der ersten optischen Ausbreitungsverzögerung unterscheidet; Ausgeben von jeweiligen ersten und zweiten Ausgangslichtteilen von den ersten und zweiten optischen Pfaden, wobei die ersten und zweiten Ausgangslichtteile von den ersten und zweiten optischen Pfaden zu unterschiedlichen Zeiten in Übereinstimmung mit Differenzen in den ersten und zweiten optischen Ausbreitungsverzögerungen ausgegeben werden;

Modulieren des zweiten Ausgangslichtteils in dem ersten Sensor (**722(1)**) in dem zweiten optischen Pfad (**718(1)**) durch ein akustisches Signal, das auf den zweiten optischen Pfad (**718(1)**) einfällt;

Koppeln der ersten und zweiten Ausgangslichtteile an einen Verzögerungspfad (**740, 750, 752**), wobei der Verzögerungspfad erste und zweite verzögerte Lichtteile entsprechend zu den ersten und zweiten Ausgangslichtteilen ausgibt;

Koppeln der ersten und zweiten verzögerten Lichtteile an die ersten und zweiten optischen Pfade, um sich darin in einer zweiten Richtung, entgegengesetzt zu der ersten Richtung, auszubreiten;

Ausgeben eines ersten Satzes von Rückkehrlichtteilen von dem ersten optischen Pfad, wobei der erste Satz von Rückkehrlichtteilen einen jeweiligen Rückkehrlichtteil für jeden der ersten und zweiten verzögerten Lichtteile umfasst;

Ausgeben eines zweiten Satzes von Rückkehrlichtteilen von dem zweiten optischen Pfad, wobei der zweite Satz von Rückkehrlichtteilen einen jeweiligen Rückkehrlichtteil für jeden der ersten und zweiten verzögerten Lichtteile umfasst; und

Koppeln der ersten und zweiten Sätze von Rückkehrlichtteilen an wenigstens einen Detektor (**704, 706**), wobei die Rückkehrlichtteile, die sich über identische gesamte optische Pfadlängen in den ersten und zweiten Richtungen bewegen, interferieren, um erfassbare Ausgangssignale zu erzeugen.

13. Verfahren nach Anspruch 12, ferner umfassend ein selektives Erfassen nur von Ausgangssignalen, die das Ergebnis einer Interferenz von Lichtteilen, die sich in dem ersten optischen Pfad in der ersten Richtung und in dem zweiten optischen Pfad in der zweiten Richtung ausgebreitet haben, mit Lichtteilen, die sich in dem zweiten optischen Pfad in der ersten Richtung und in dem ersten optischen Pfad in der zweiten Richtung ausgebreitet haben, sind.

Es folgen 25 Blatt Zeichnungen

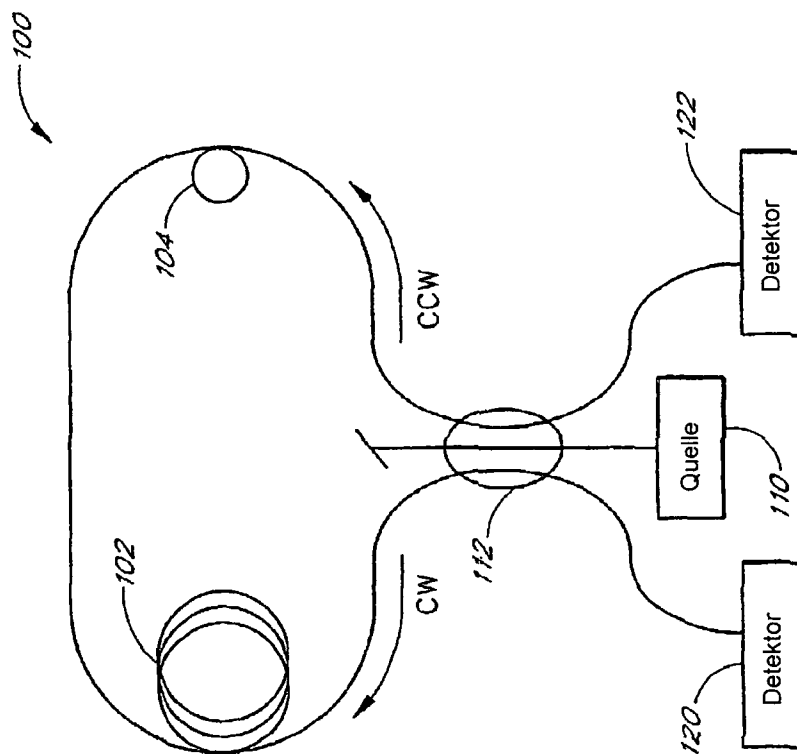


FIG. 1

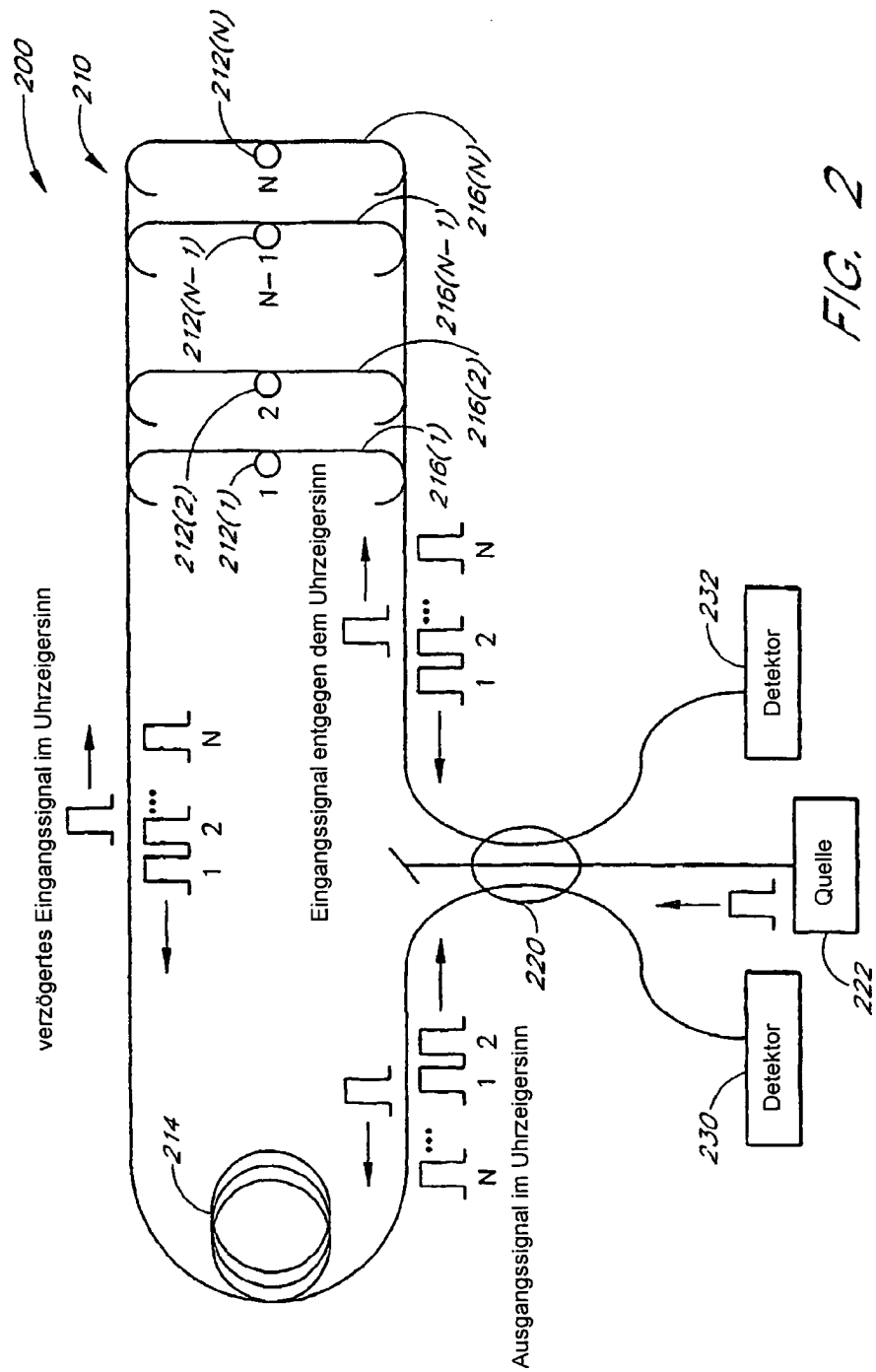


FIG. 2

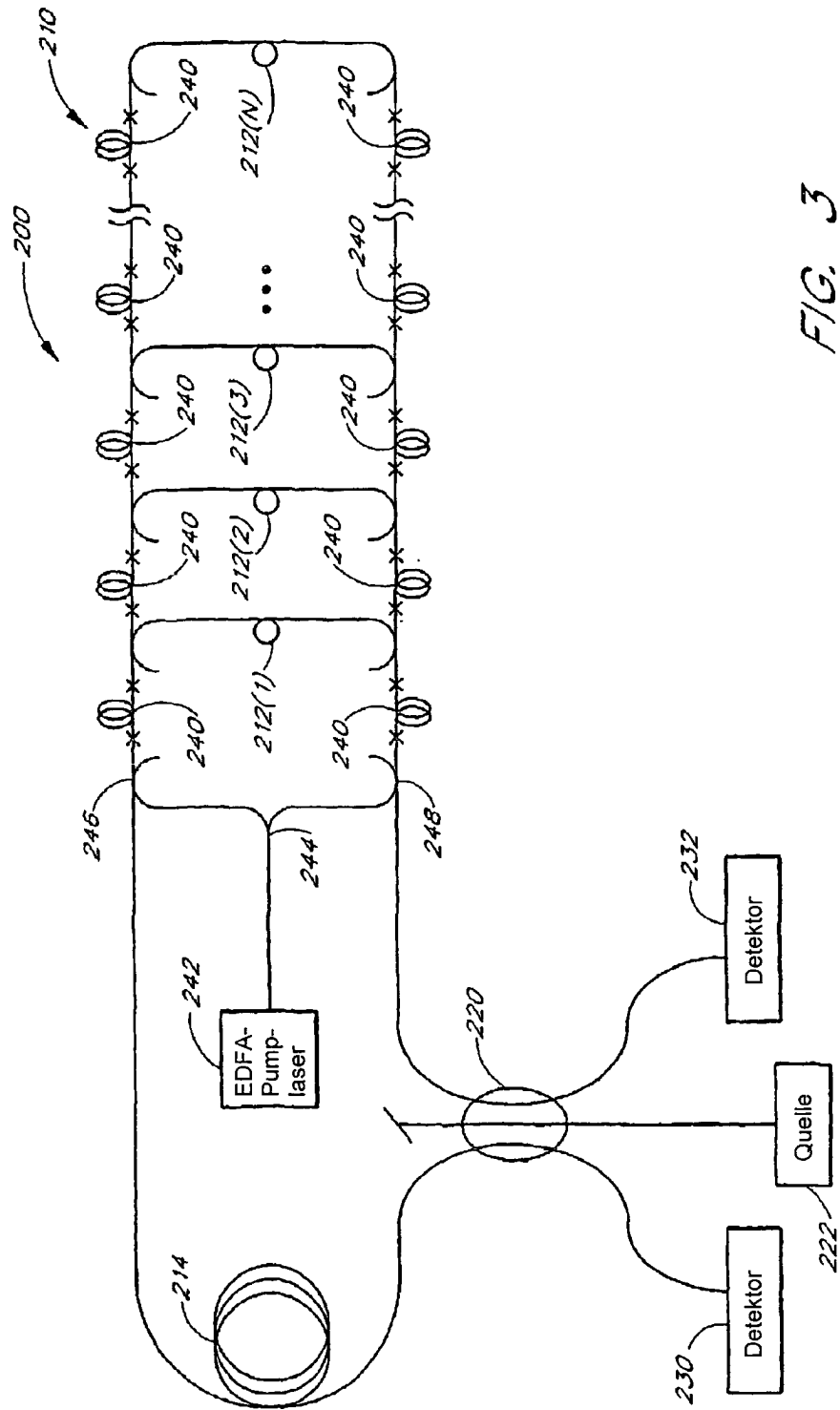


FIG. 3

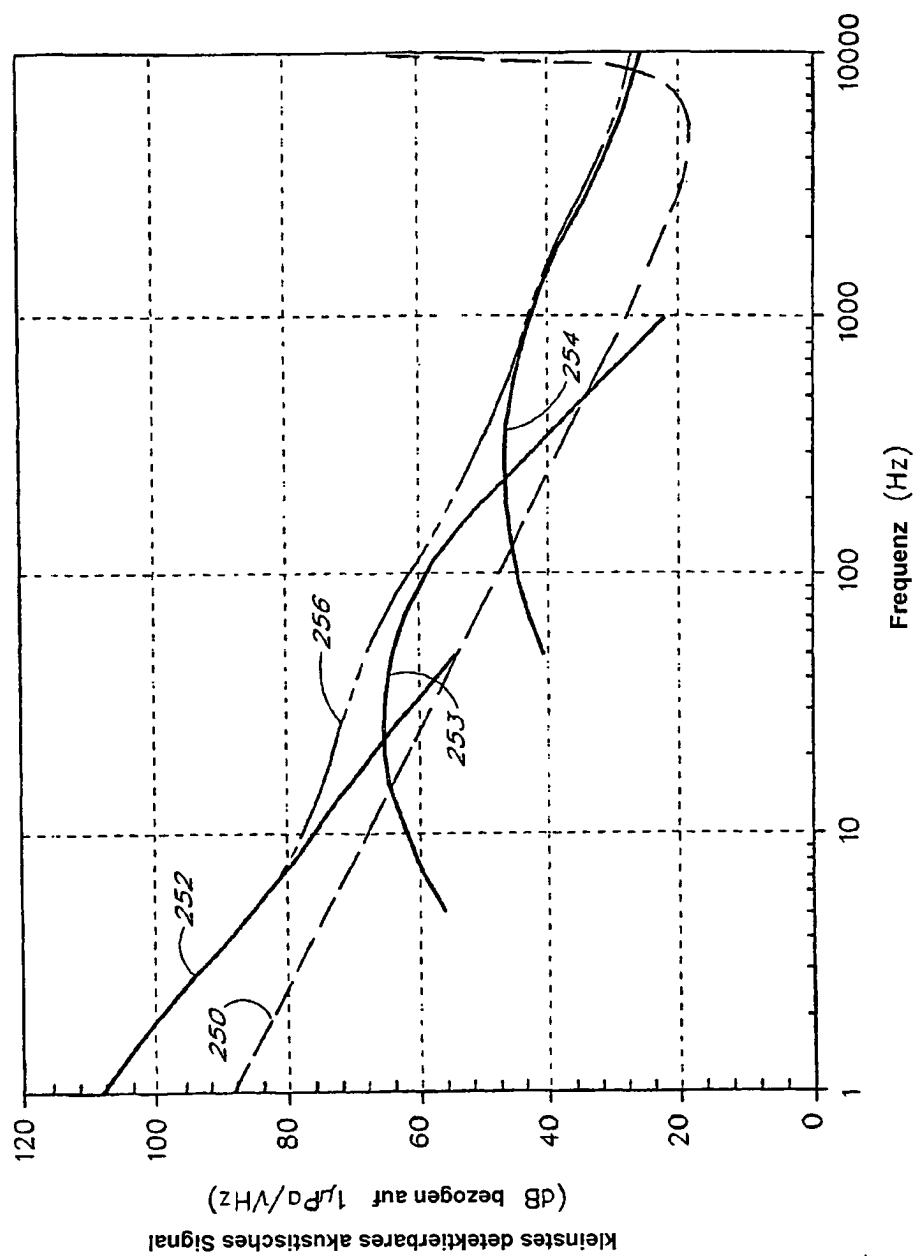


FIG. 4

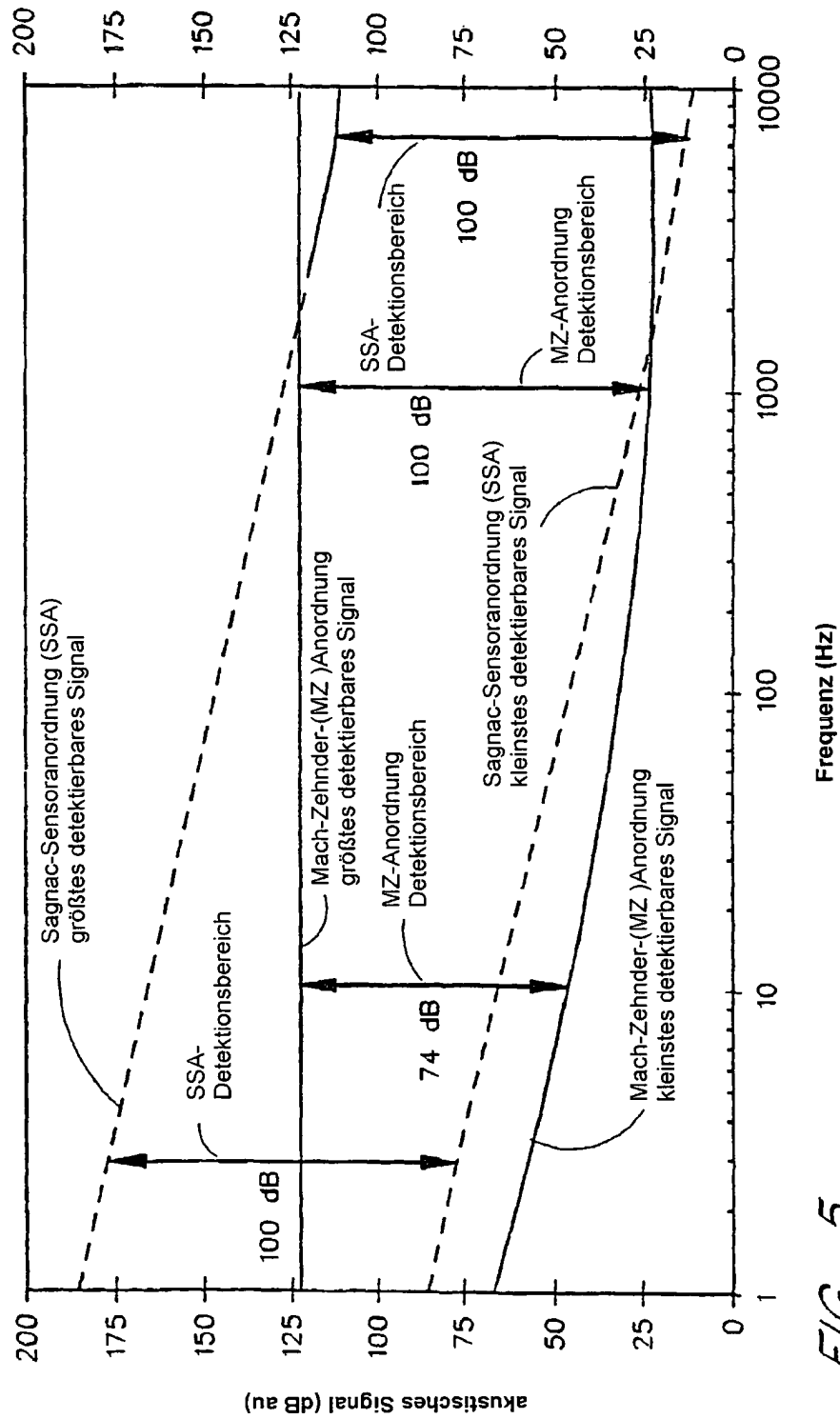


FIG. 5

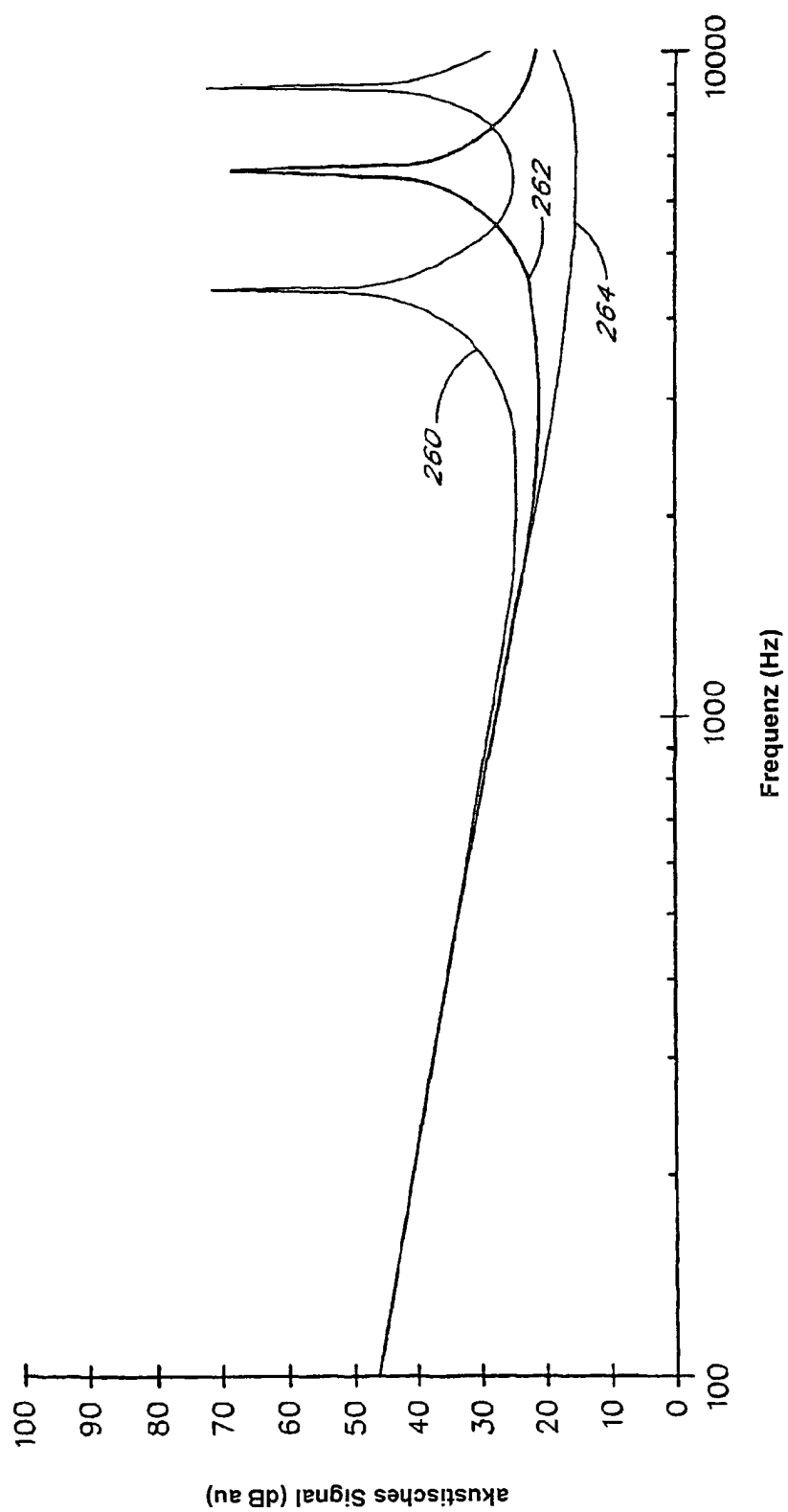


FIG. 6

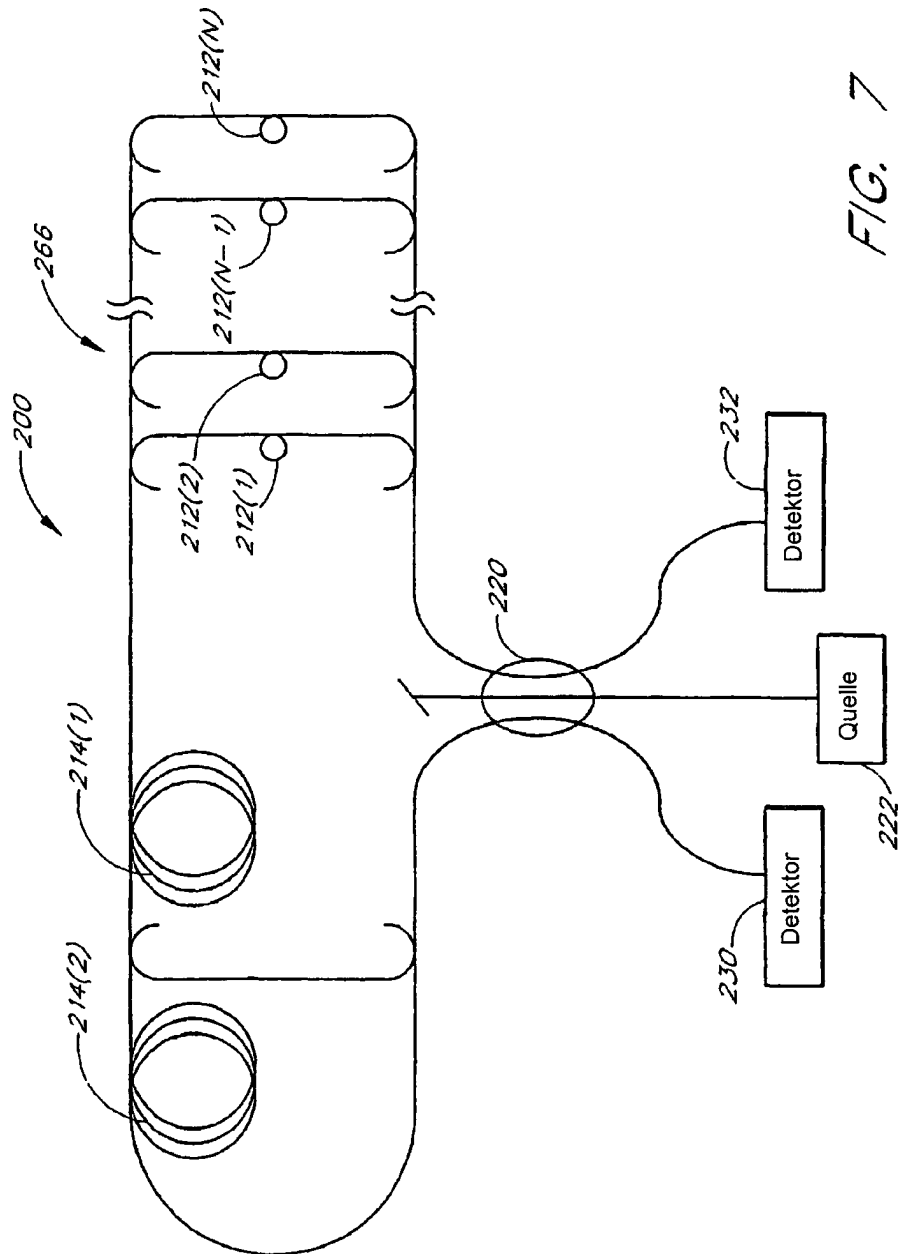


FIG. 7

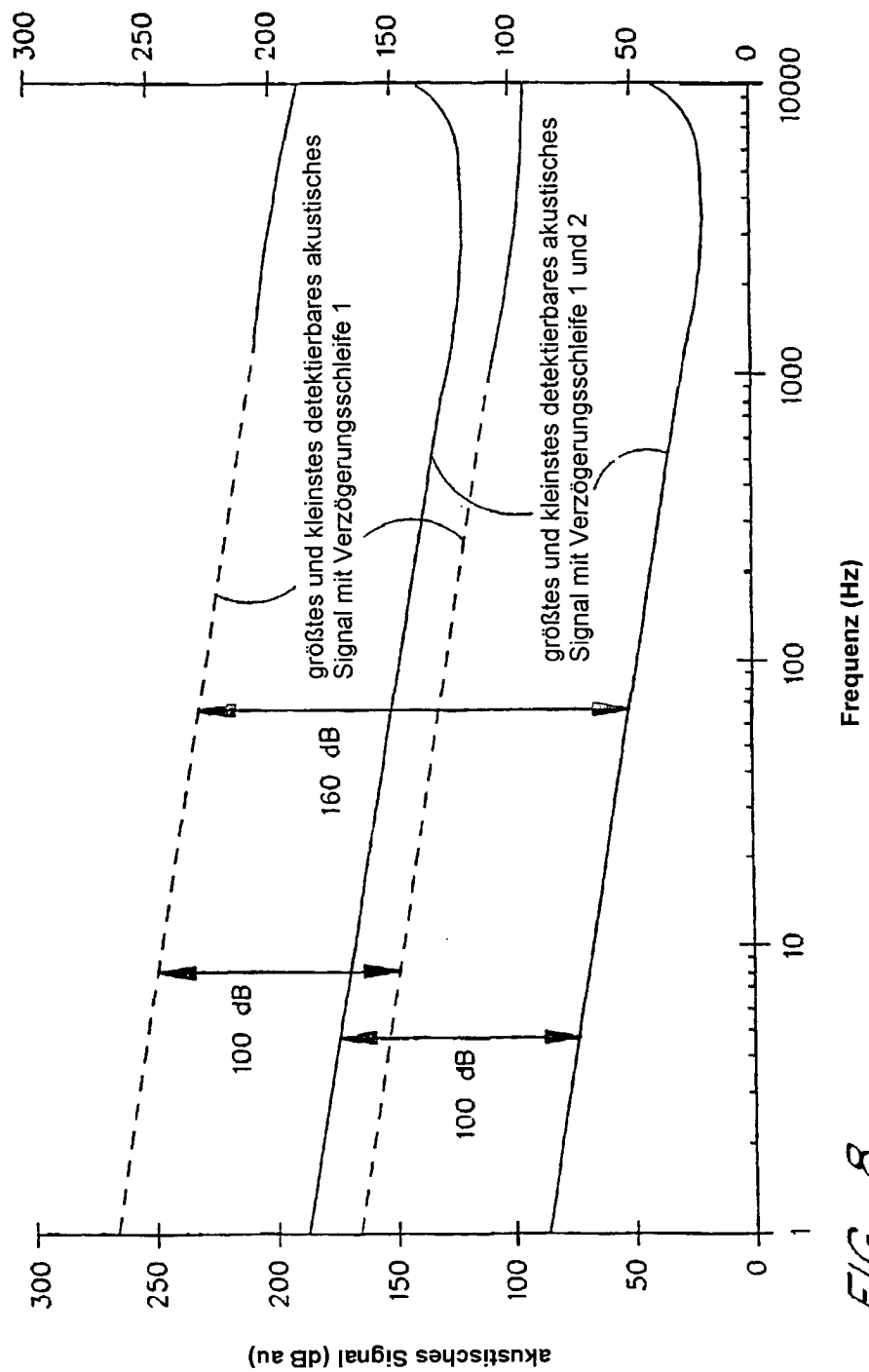
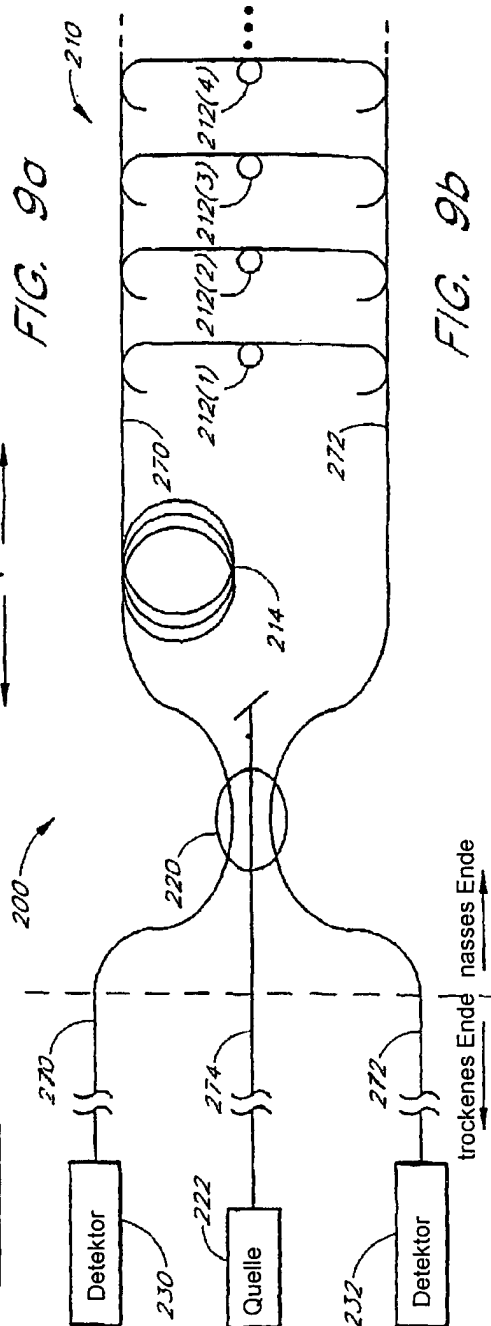
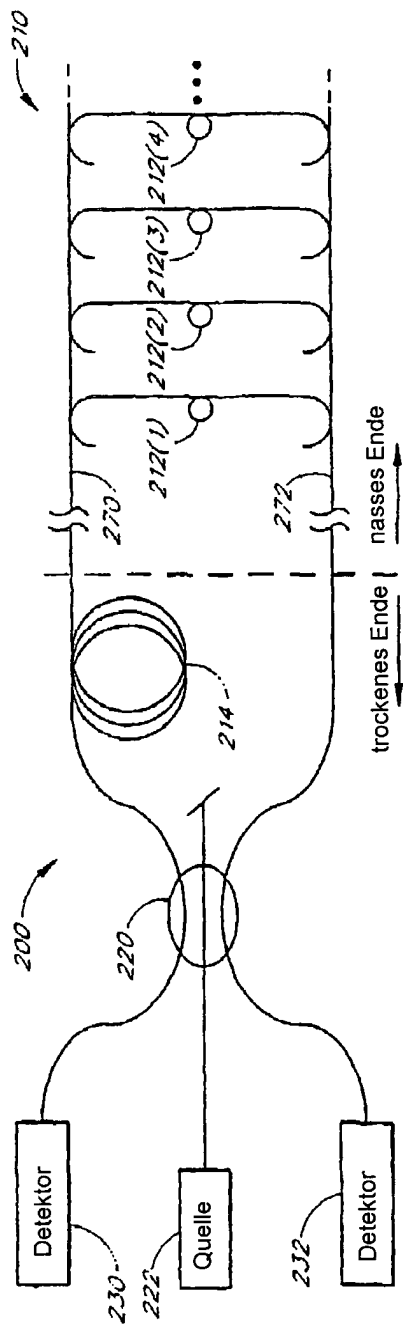


FIG. 8



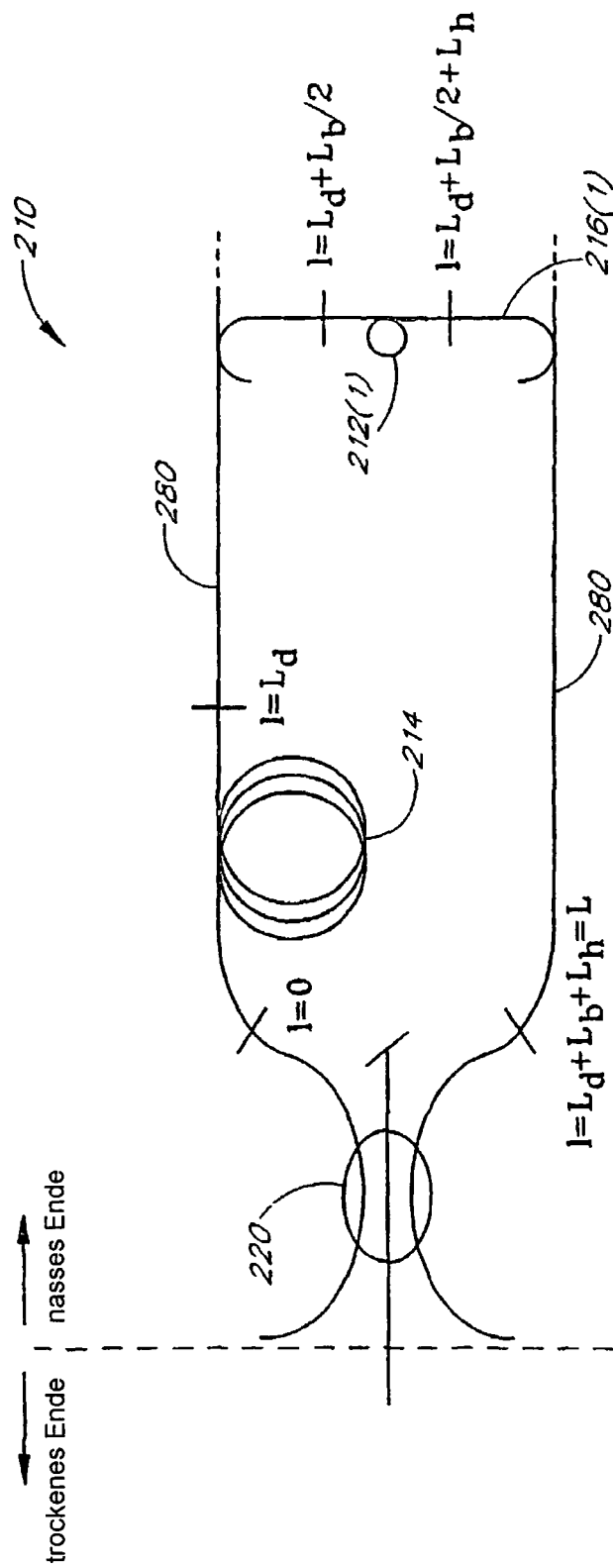


FIG. 10

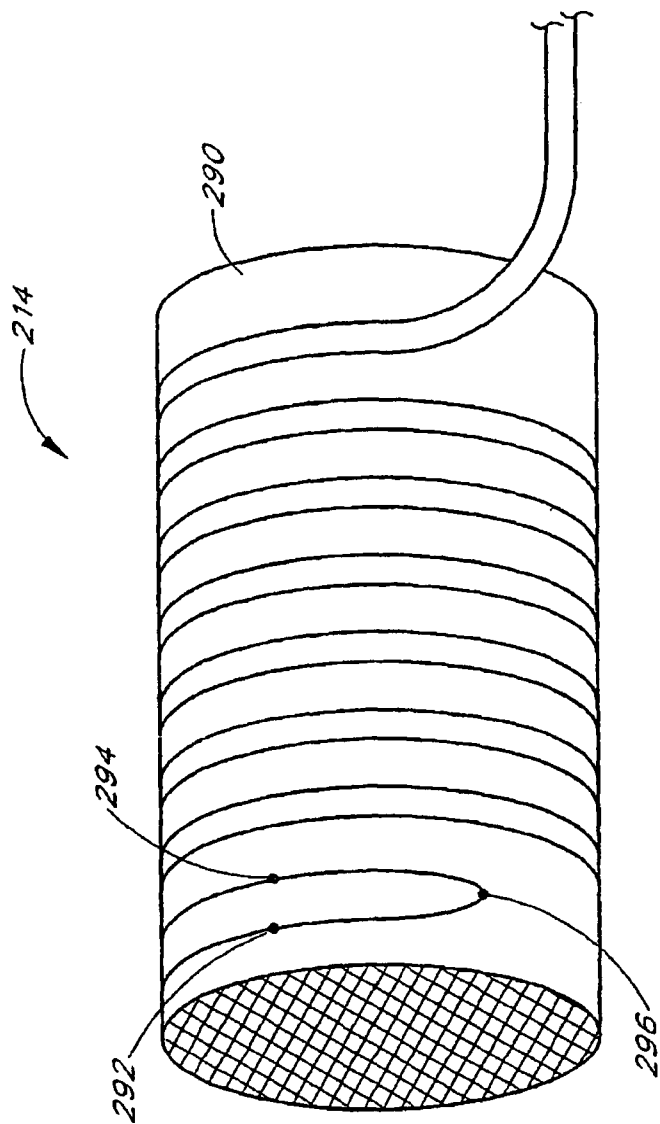


FIG. 11

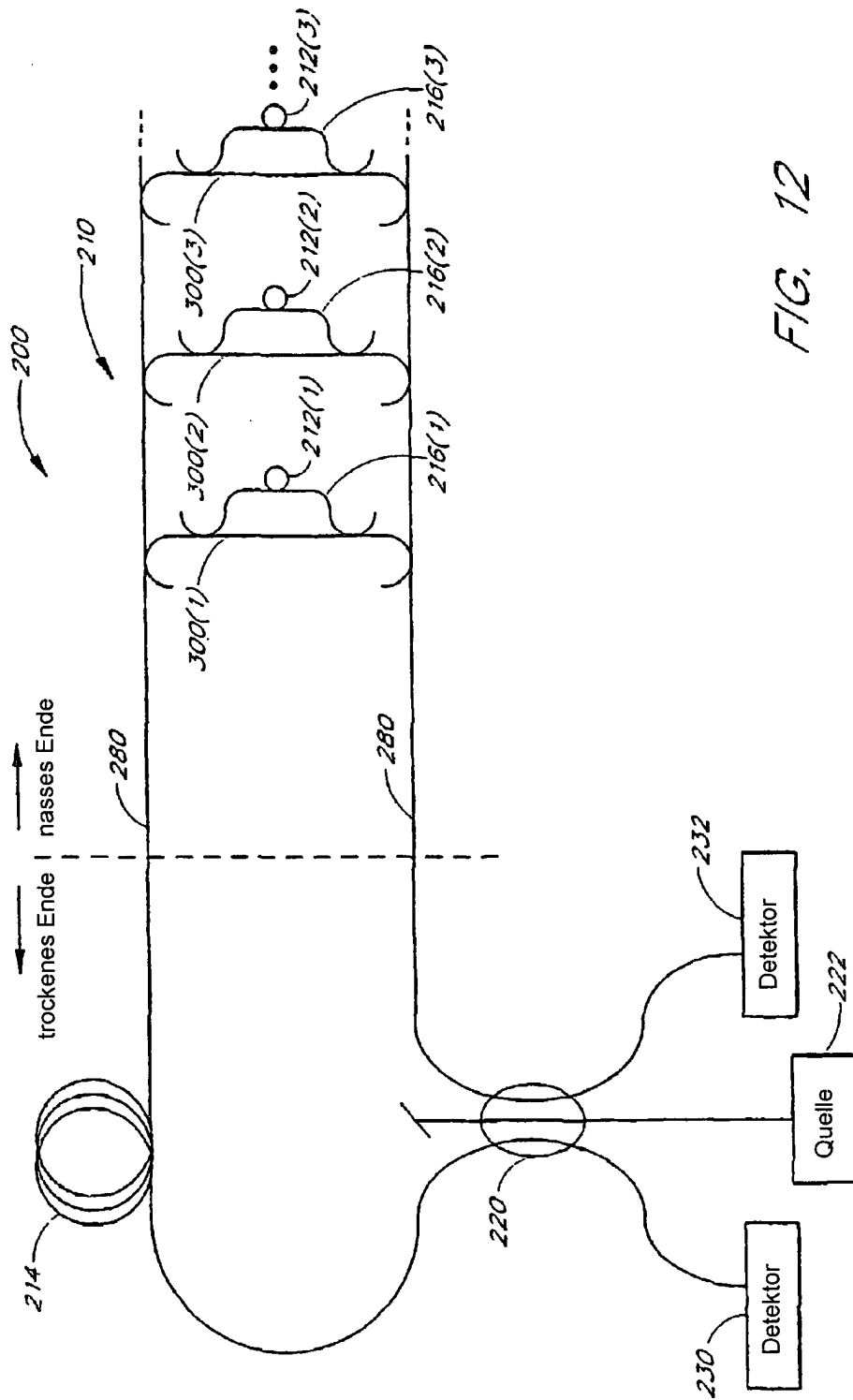


FIG. 12

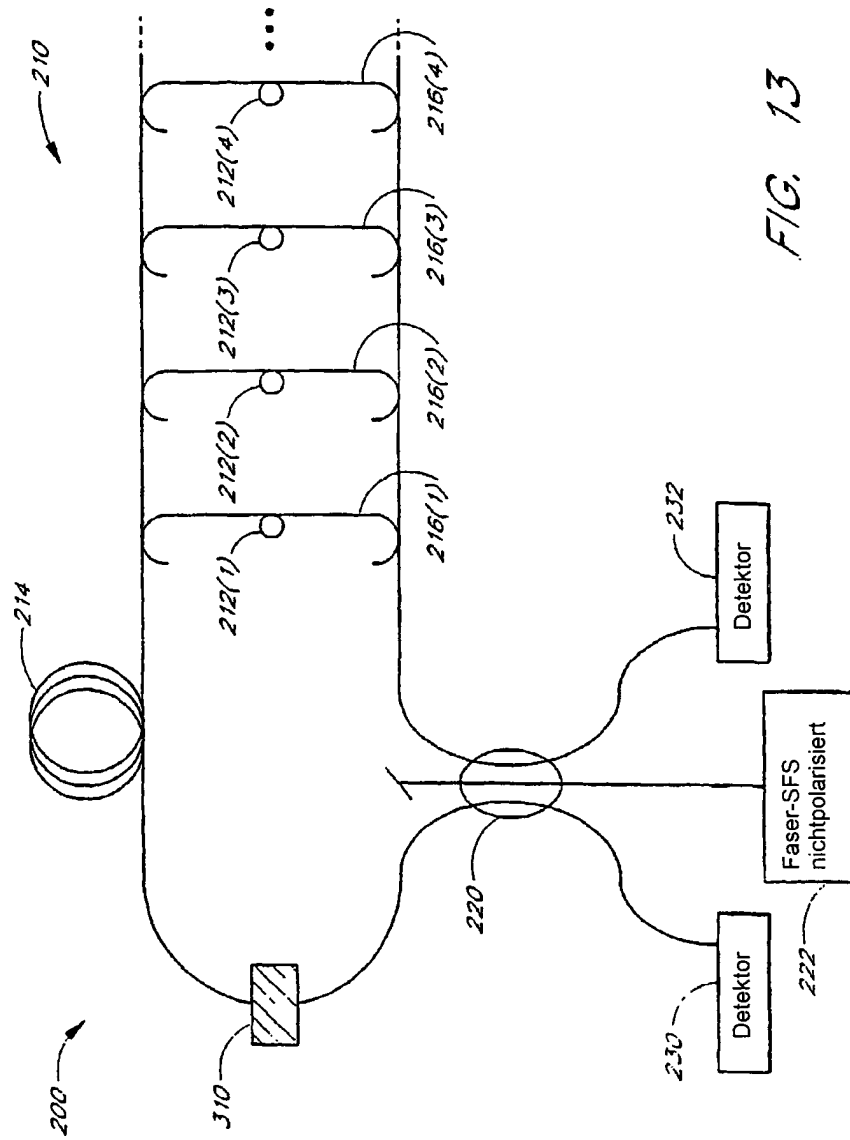


FIG. 13

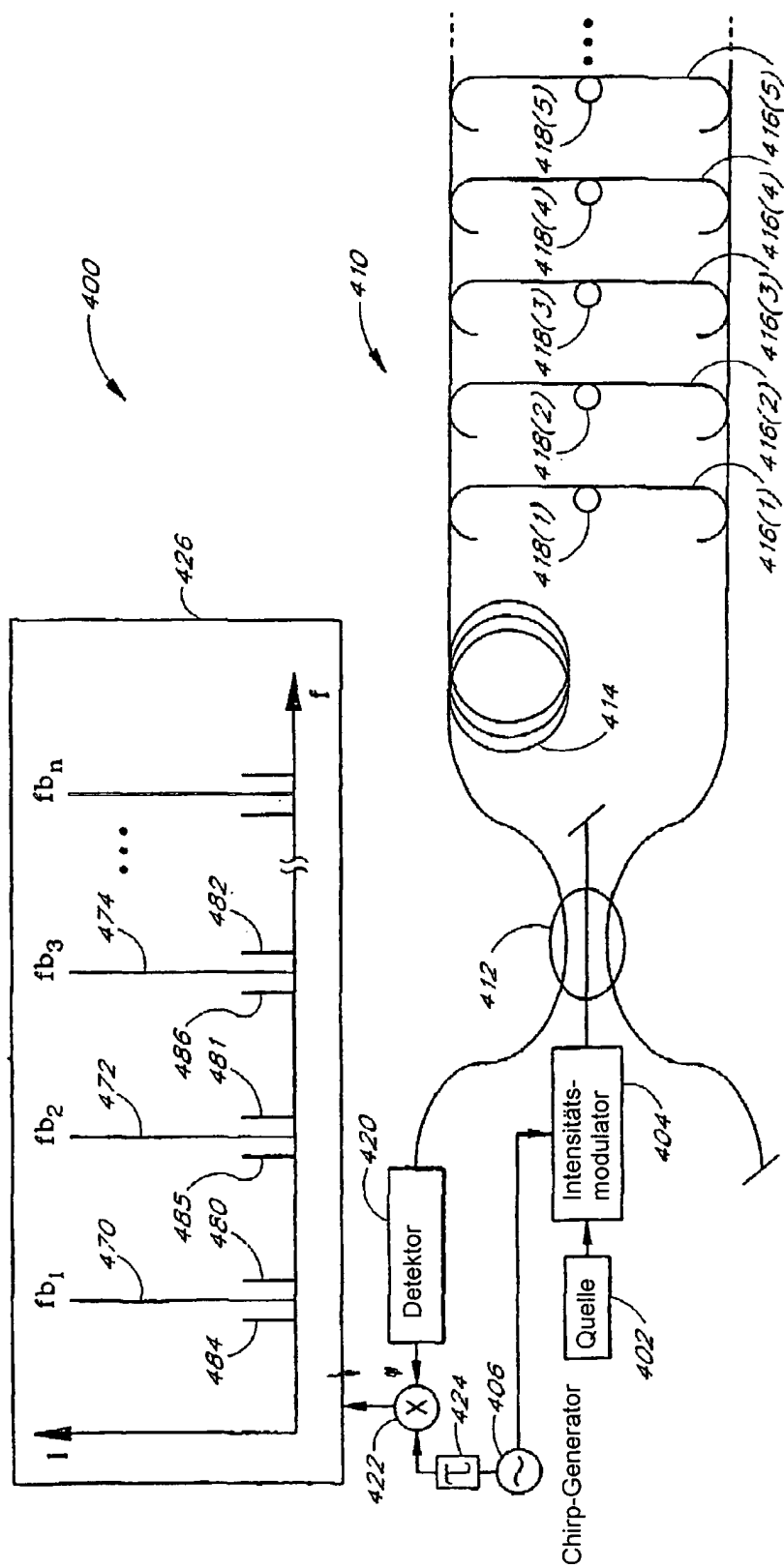


FIG. 14

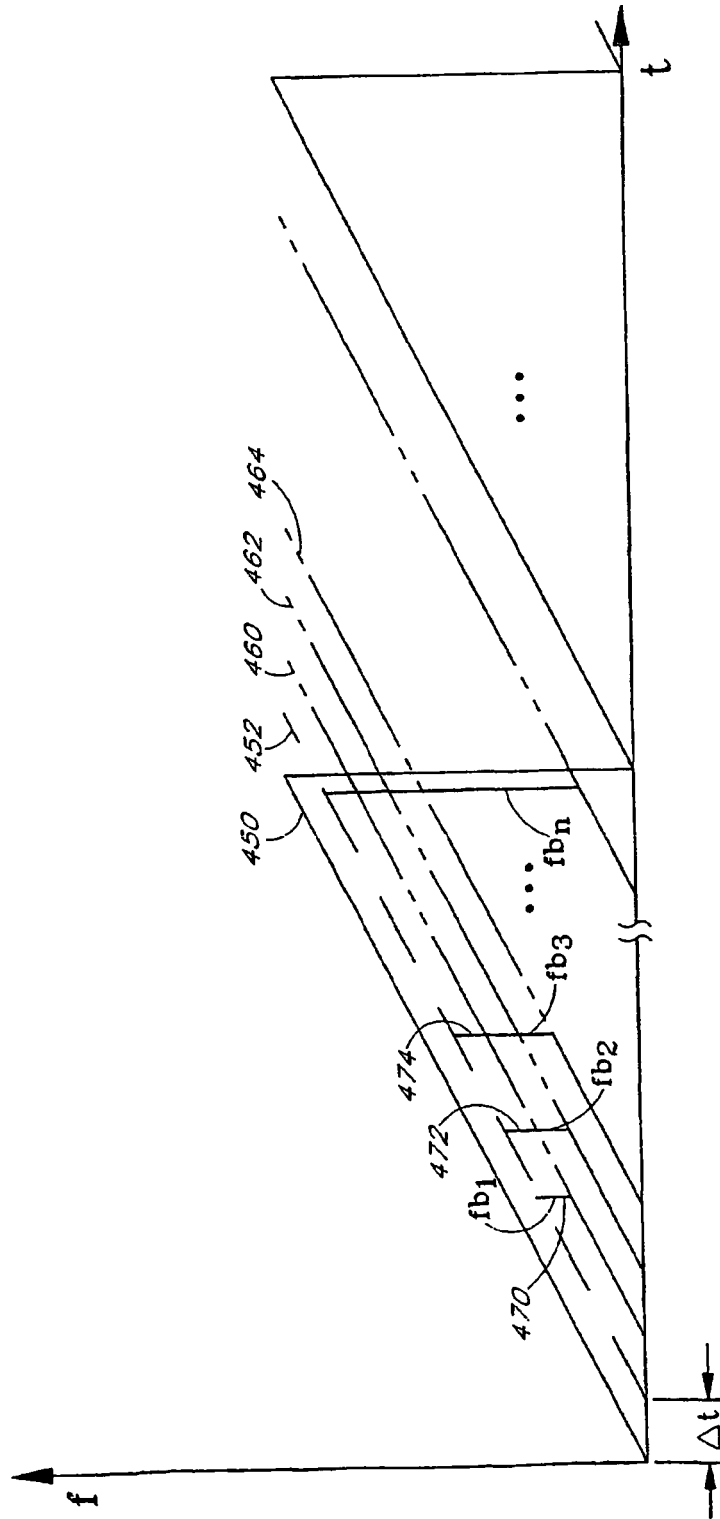


FIG. 15

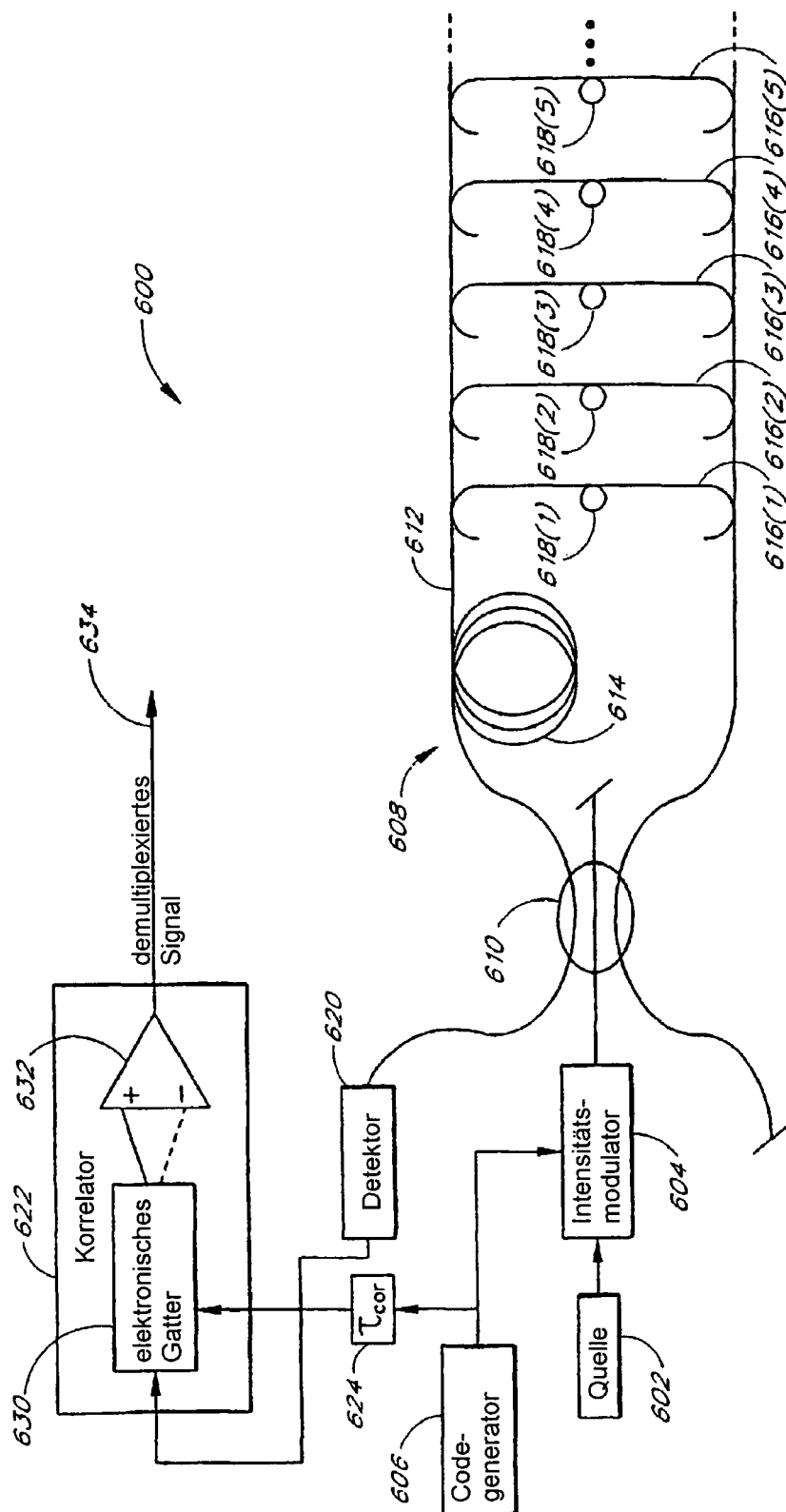


FIG. 16

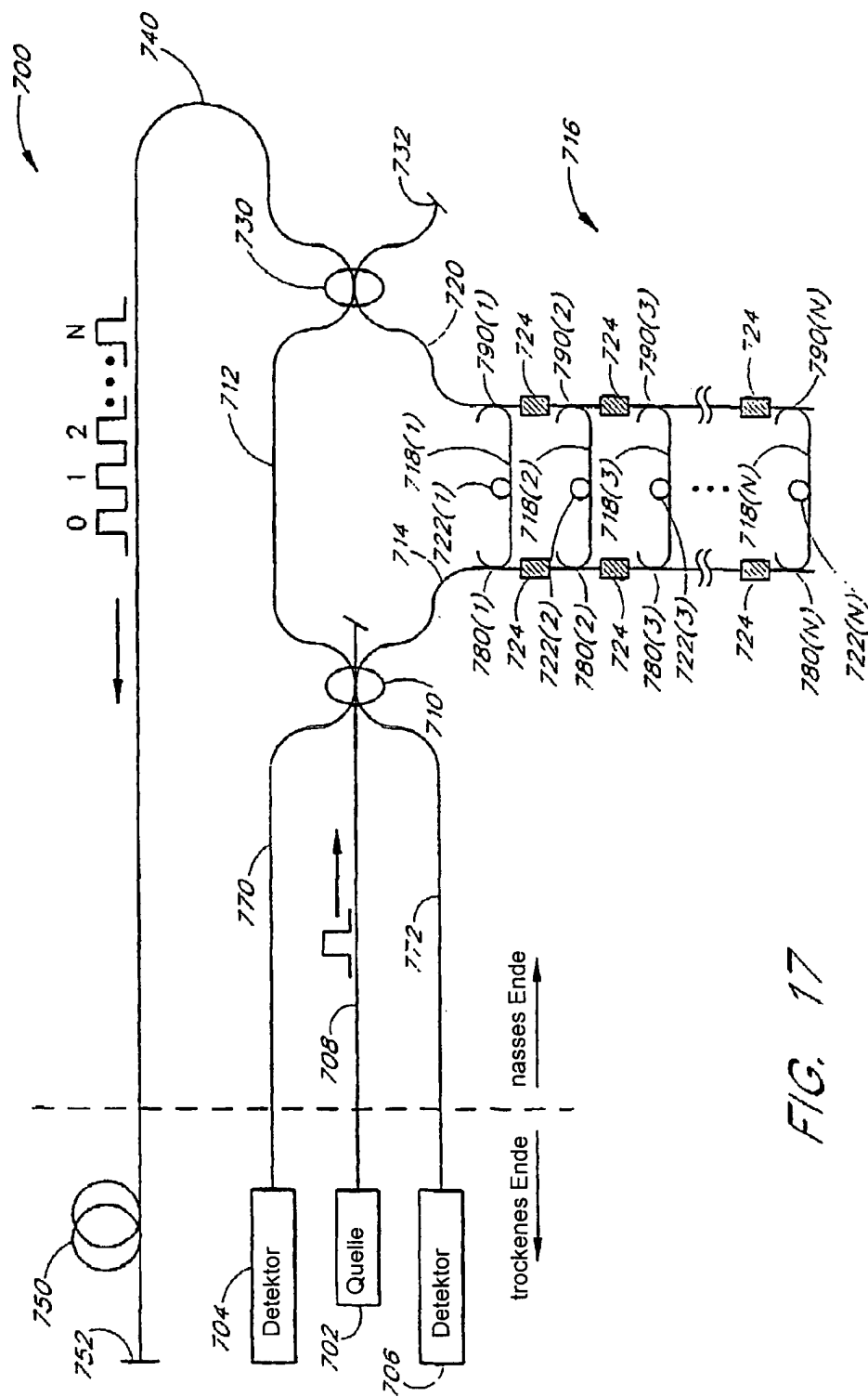


FIG. 17

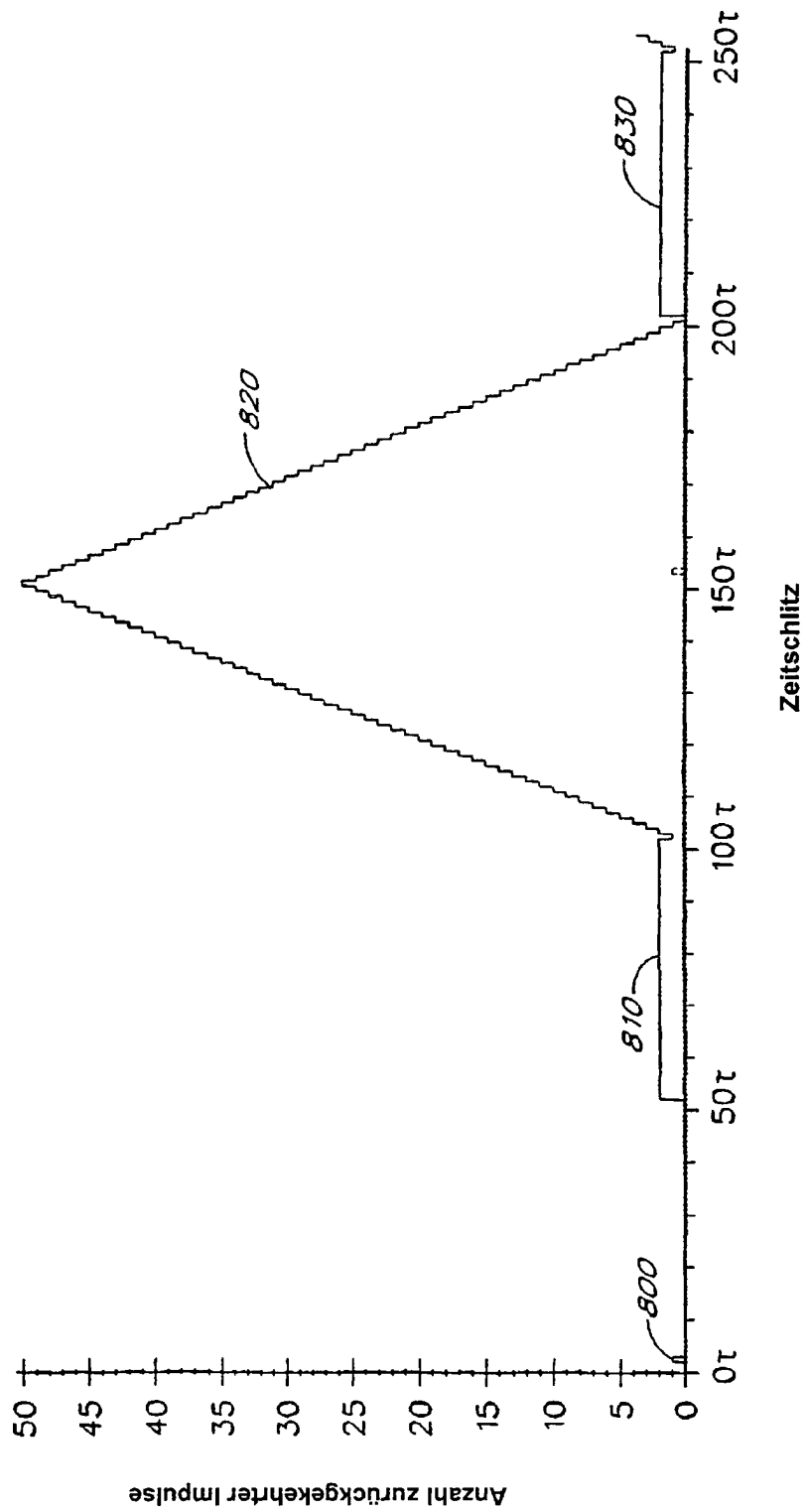


FIG. 18

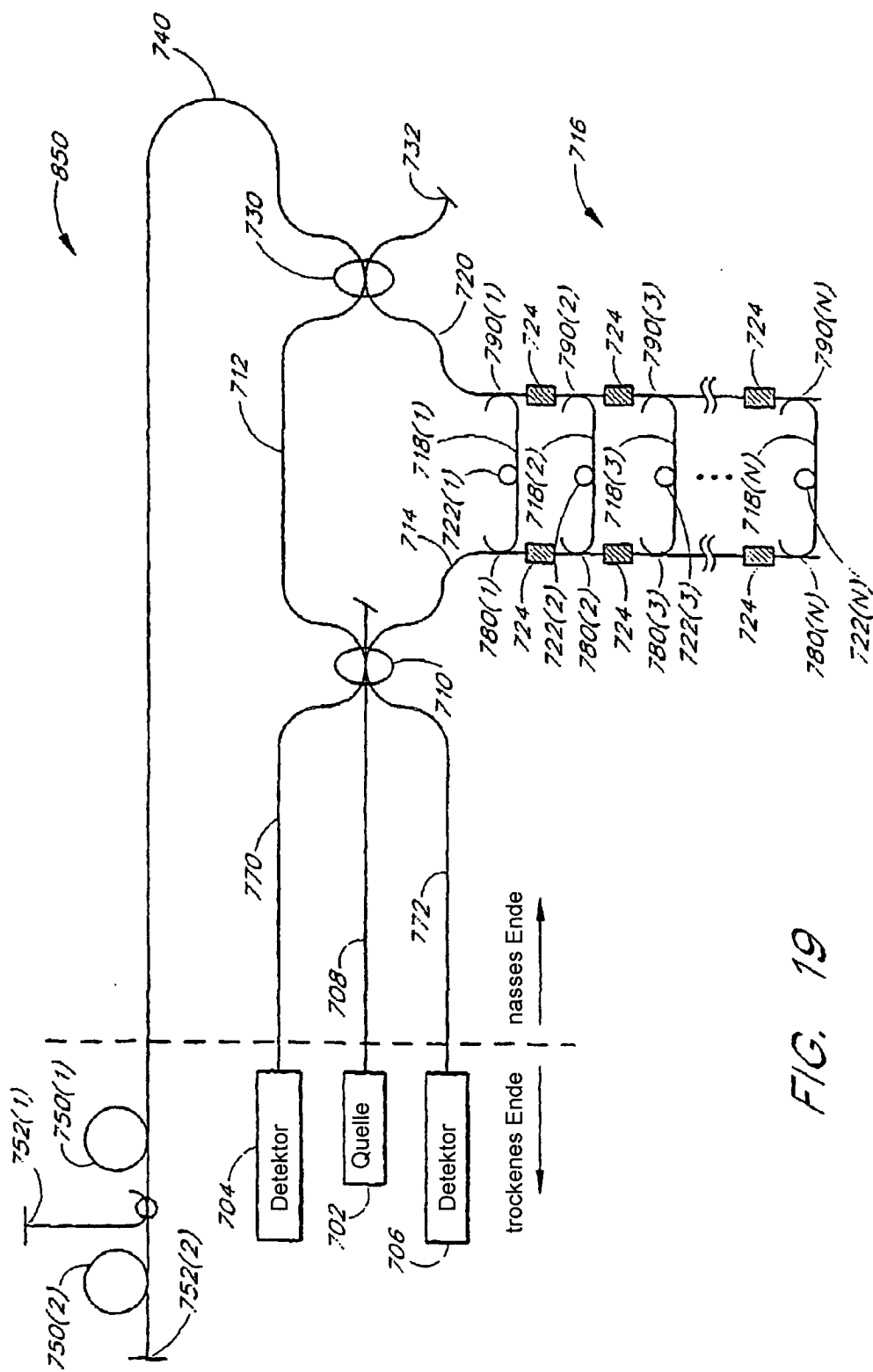


FIG. 19

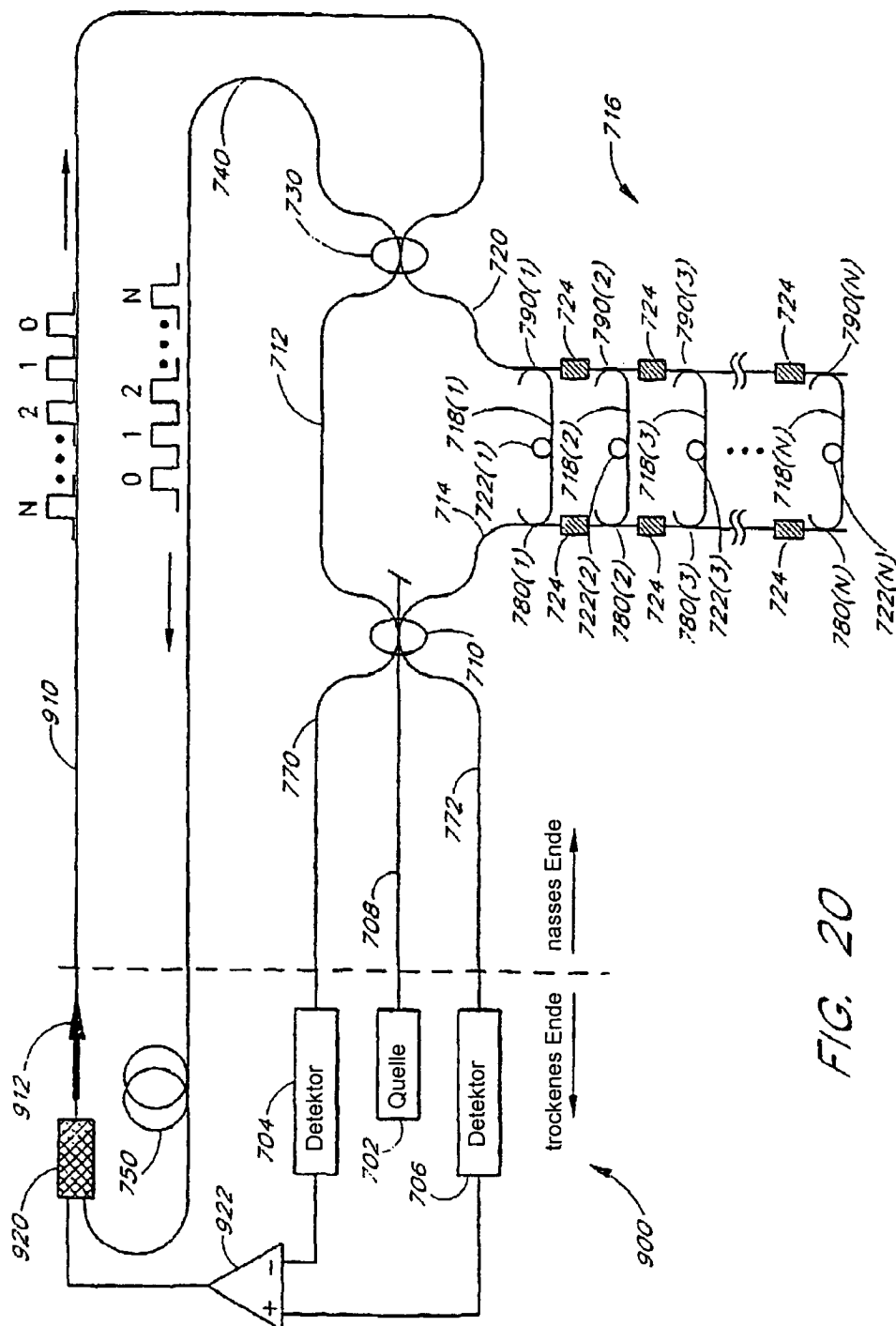


FIG. 20

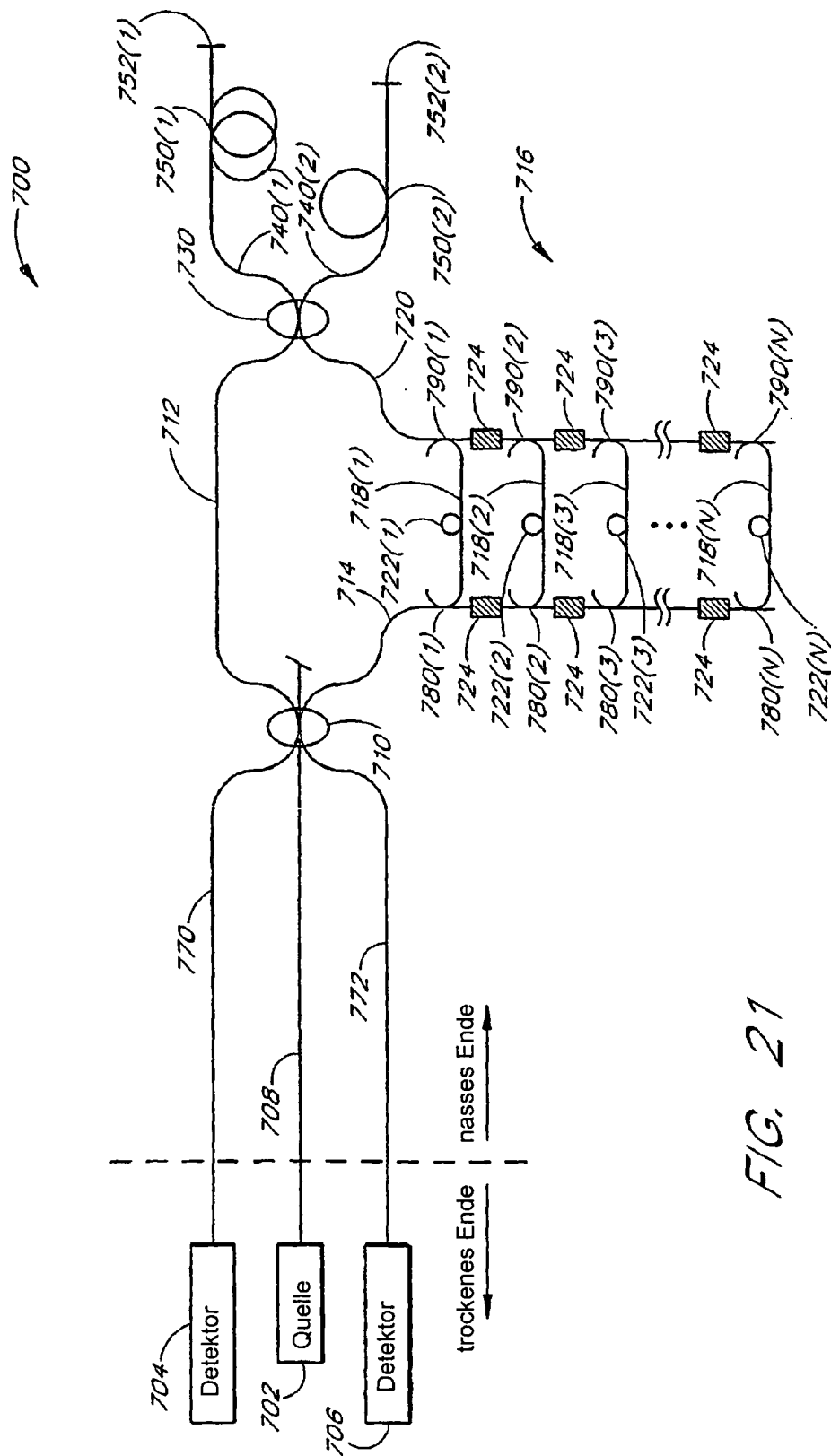


FIG. 21

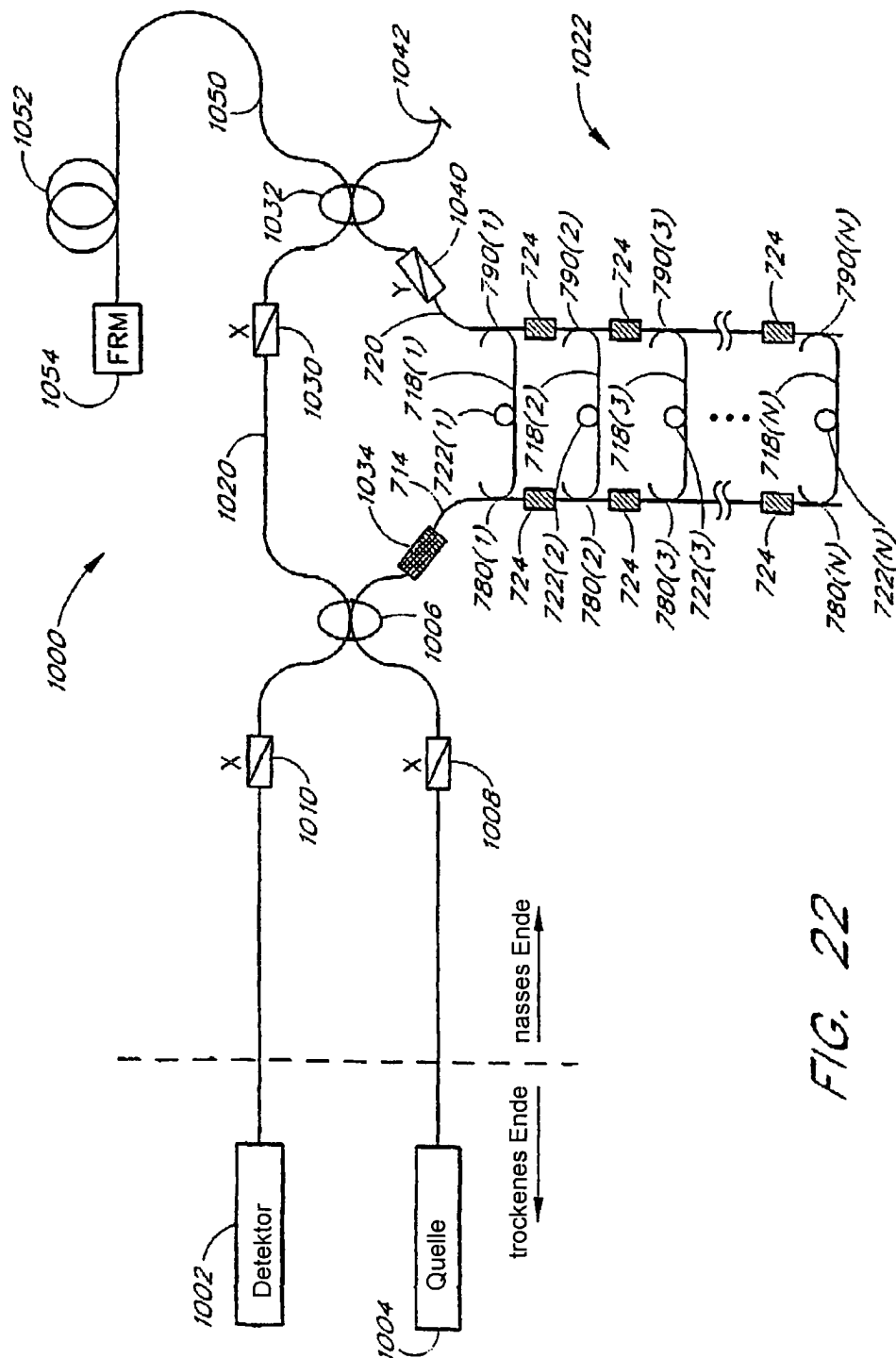


FIG. 22

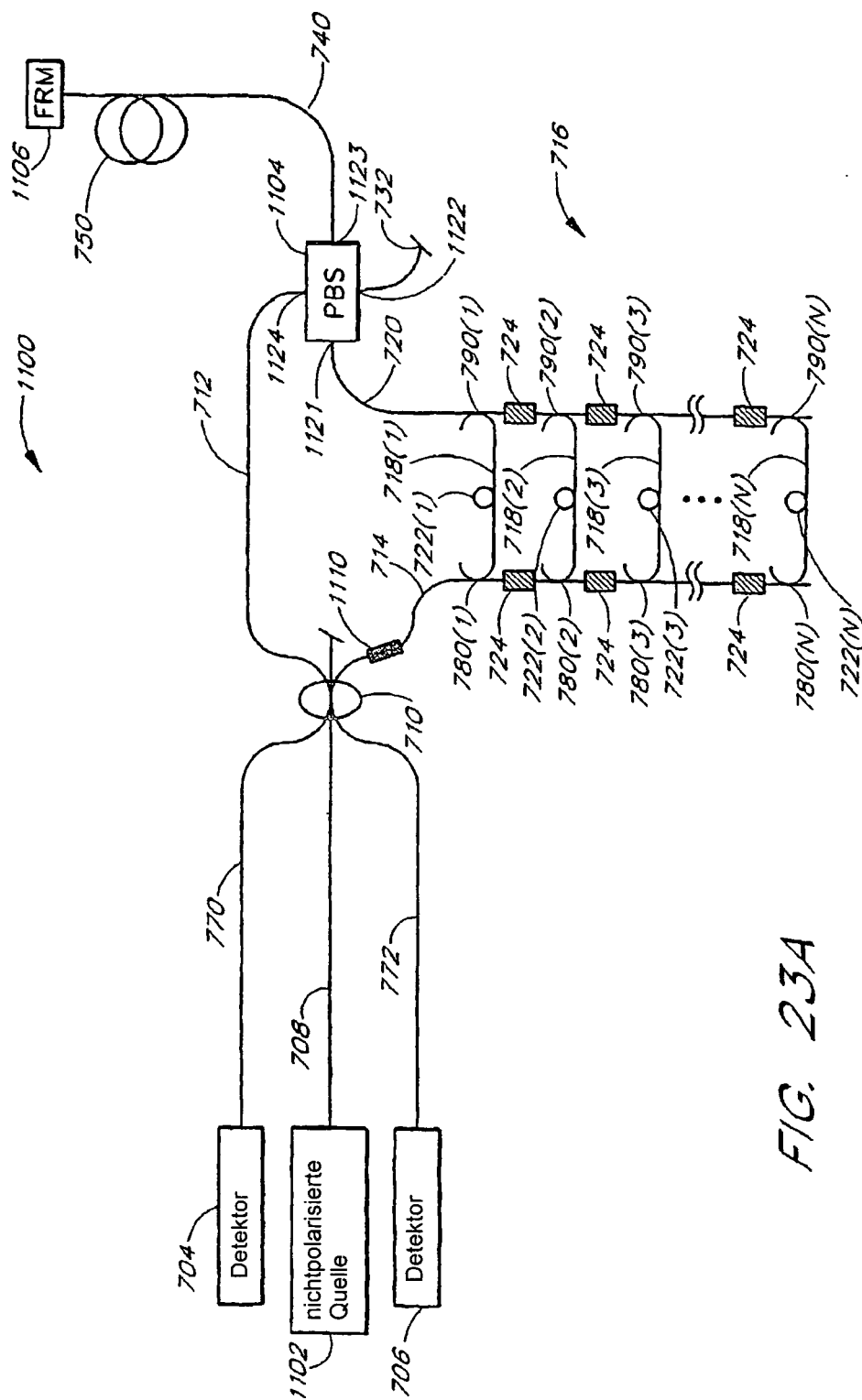


FIG. 23A

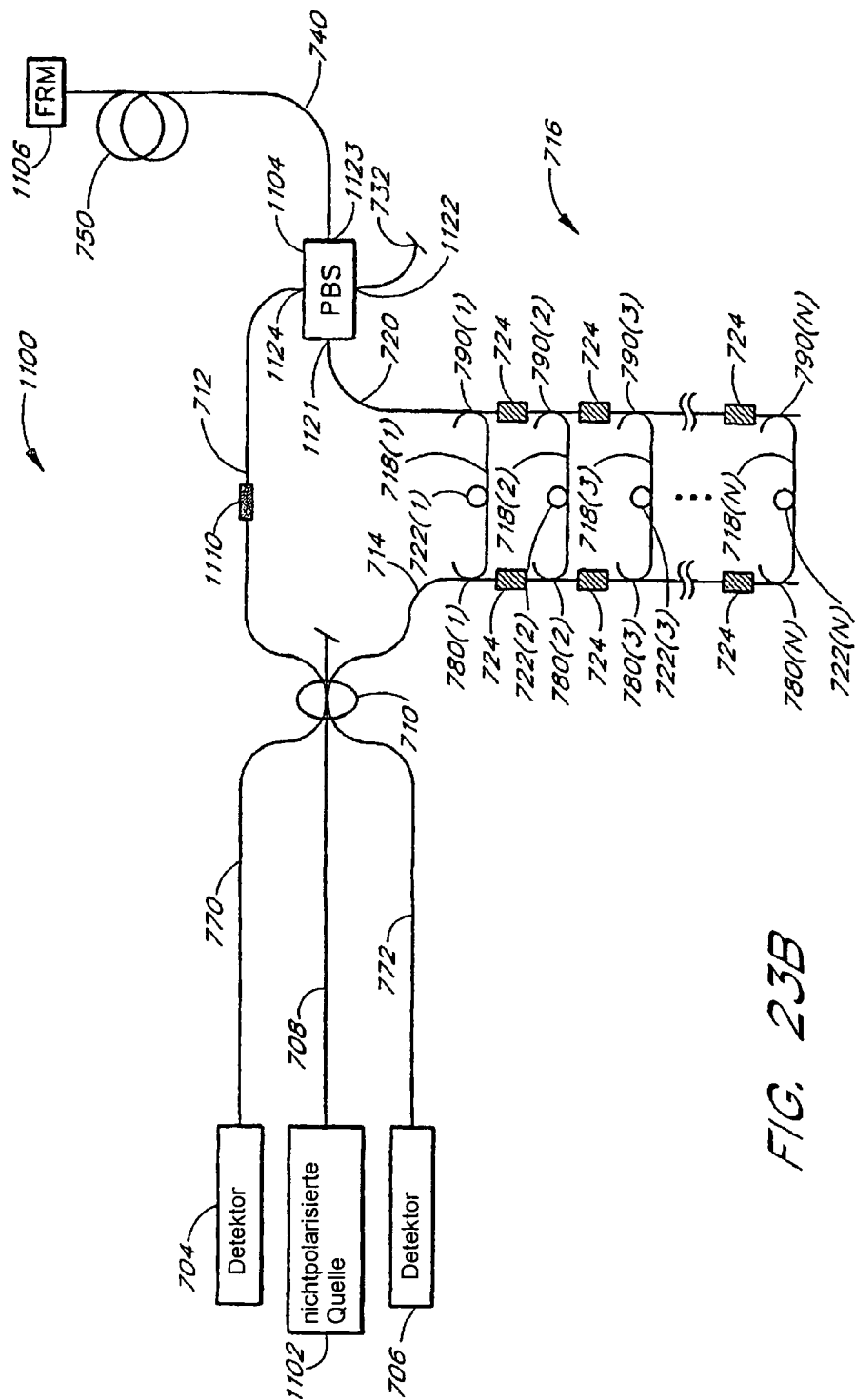


FIG. 23B

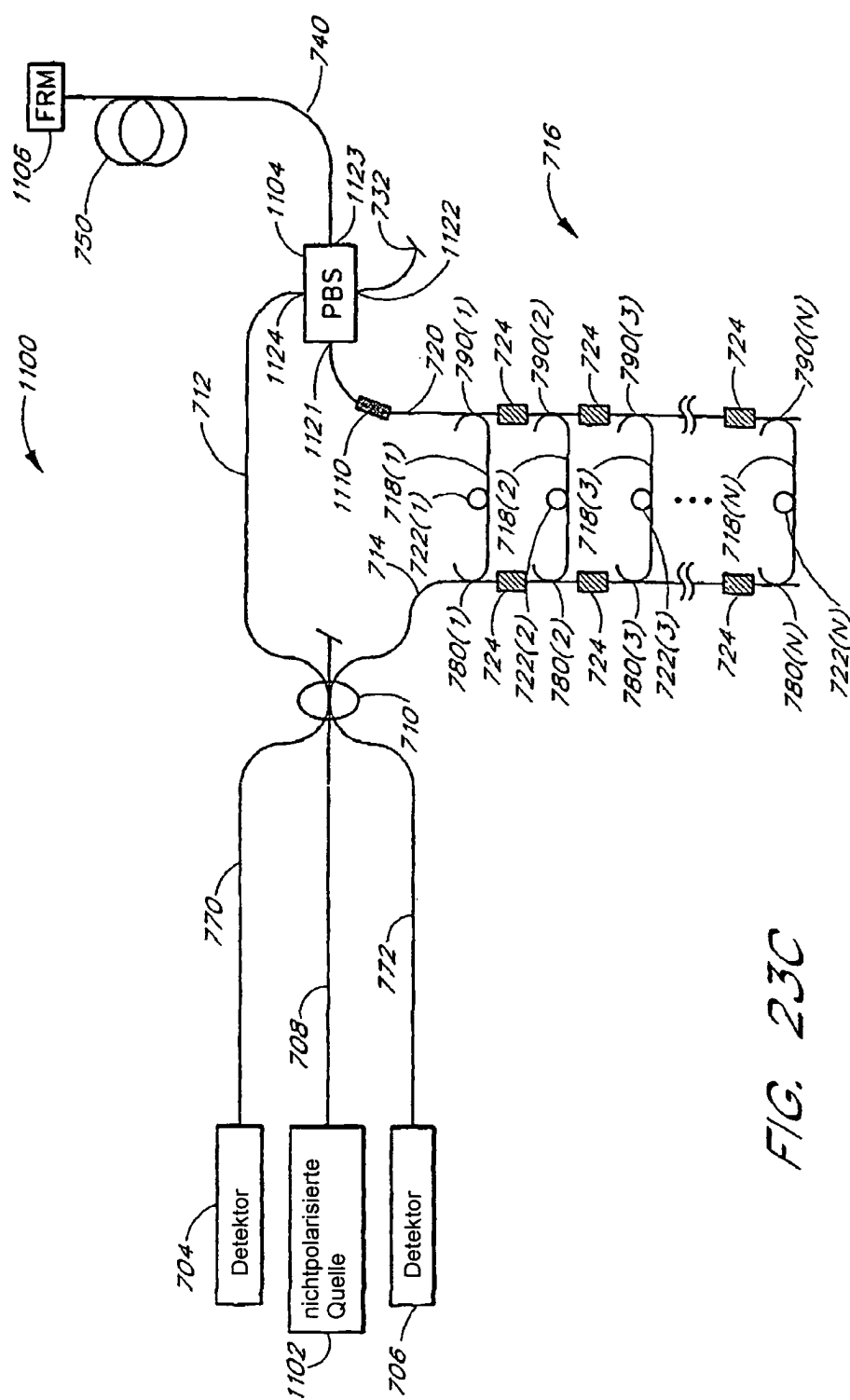


FIG. 23C