



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 21 794 T2** 2005.12.15

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 068 492 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 21 794.6**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US99/06763**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 912 929.9**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 99/051942**

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

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

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **17.01.2001**

(97) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: **10.11.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **15.12.2005**

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: **G01D 5/353**  
**G01C 19/72**

(30) Unionspriorität:

<b>80542 P</b>	<b>03.04.1998</b>	<b>US</b>
<b>253446</b>	<b>19.02.1999</b>	<b>US</b>

(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, NL**

(72) Erfinder:

**VAKOC, J., Benjamin, San Mateo, US; DIGONNET,  
J., Michel, Palo Alto, US; KINO, S., Gordon,  
Stanford, US; SHAW, John, H., Stanford, US**

(54) Bezeichnung: **FOLDED SAGNAC SENSOR ARRAY**

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 betrifft das Gebiet der faseroptischen akustischen Sensormatrixanordnungen, wobei Licht sich in den Matrixanordnungen ausbreitet und die Auswirkungen akustischer Signale auf das aus den Matrixanordnungen zurückkehrende Licht analysiert werden, um die Eigenschaften der akustischen Signale zu bestimmen.

## BESCHREIBUNG DES STANDES DER TECHNIK

**[0002]** Faseroptische akustische Sensoren sind vielversprechende Alternativen zu herkömmlichen elektronischen Sensoren. Zu ihren Vorteilen gehören eine hohe Empfindlichkeit, großer Dynamikbereich, leichtes Gewicht und kompakte Größe. Die Fähigkeit, eine große Anzahl faseroptischer Sensoren einfach auf gemeinsame Busse zu multiplexieren, macht faseroptische Sensoren auch für großflächige Matrixanordnungen attraktiv. Die kürzlich erfolgreiche Aufnahme mehrerer erbiumdotierter Faserverstärker (EDFAs) mit geringer Verstärkung in eine faseroptische Sensormatrixanordnung, um die Anzahl der Sensoren zu erhöhen, die durch ein einziges Faserpaar unterstützt werden können, hat großflächige faseroptische Sensormatrixanordnungen sogar noch wettbewerbsfähiger gemacht.

**[0003]** Für akustisches Detektieren war der Mach-Zehnder-Interferometersensor der richtig gewählte faseroptische Sensor. In jedem Interferometersensor wird die Phasenmodulation durch eine Cosinusquadrat-Funktion in eine Intensitätsmodulation umgesetzt. Wegen dieser nichtlinearen Übertragungsfunktion erzeugt eine sinusförmige Phasenmodulation Harmonische höherer Ordnung. Ein auf 90° Phasenverschiebung eingestelltes Interferometer (2 außer Phase) hat ein maximiertes Verhalten bei der Harmonischen erster Ordnung und ein minimiertes Verhalten bei der Harmonischen zweiter Ordnung. Aus diesem Grund ist 90° Phasenverschiebung der bevorzugte Arbeitspunkt. Wenn der Arbeitspunkt von der 90°-Phasenverschiebung wegdriftet (zum Beispiel aufgrund äußerer Temperaturänderungen), nimmt das Verhalten bei der Harmonischen erster Ordnung ab und das Verhalten bei der Harmonischen zweiter Ordnung nimmt zu. Wenn das Interferometer auf 0 eingestellt oder außer Phase ist, verschwindet die Harmonische erster Ordnung vollständig. Dieses verringerte Verhalten bei der Harmonischen erster Ordnung (das aus Arbeitspunkten ungleich 90° Phasenverschiebung herrührt) wird als Signalschwund bezeichnet.

**[0004]** Da Mach-Zehnder-Interferometersensoren einen instabilen Arbeitspunkt haben, sind sie für das eben erwähnte Problem des Signalschwunds besonders empfindlich. Um Signalschwund zu überwinden, ist eine Demodulation des zurückgegebenen Signals erforderlich. Die typische Demodulationsmethode ist das Prinzip des phasenerzeugten Trägers (PGC), das einen Mach-Zehnder-Interferometersensor mit ungleichem Weg benötigt. (Siehe zum Beispiel: Anthony Dandridge et al, Multiplexing of Interferometric Sensors Using Phase Carrier Techniques, Journal of Lightwave Technology, Vol. LT 5, Nr. 7, Juli 1987, Seiten 947–952.) Diese Wege-Ungleichheit verursacht auch die Umwandlung von Laser-Phasenrauschen in Intensitätsrauschen, was das Leistungsvermögen der Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnungen bei niedrigen Frequenzen begrenzt und strenge Forderungen an die Linienbreite der Quelle stellt. Diese Forderung nach schmaler Linienbreite hat die Entwicklung verstärkter Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnungen bei 1,55 µm verlangsamt.

**[0005]** Das Sagnac-Interferometer hat in den faseroptischen Gyroskopen verbreitete Anwendung gefunden. (Siehe zum Beispiel: B. Culshaw et al, Fibre optic gyroscopes, Journal of Physics E Scientific Instruments, Vol. 16, Nr. 1, 1983, Seiten 5–15.) Es ist vorgeschlagen worden, daß das Sagnac-Interferometer verwendet werden könnte, um akustische Wellen zu detektieren. (Siehe zum Beispiel: E. Udd, Fibre-optic acoustic sensor based on the Sagnac interferometer, Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, Vol. 425, 1983, Seiten 90-91; Kjell Kråkenes et al, Sagnac interferometer for underwater sound detection: noise properties, OPTICS LETTERS, Vol. 14, Nr. 20, 15. Oktober, 1989, Seiten 1152-1145; und Svene Knudsen et al, An Ultrasonic Fiber-Optic Hydrophon Incorporating a Push-Pull Transducer in a Sagnac Interferometer, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 12, Nr. 9, September 1994, Seiten 1696-1700.) Aufgrund seines Aufbaus mit gemeinsamem Weg ist das Sagnac-Interferometer umkehrbar und hat deshalb einen stabilen Arbeitspunkt, was Signalschwund beseitigt und die Umwandlung von Quellen-Phasenrauschen in Intensitätsrauschen verhindert. Daher ist das Sagnac-Interferometer nicht anfällig für das Phasenrauschen, das die Mach-Zehnder-Interferometersensoren bei niedrigen Frequenzen begrenzt.

**[0006]** Sagnac-Interferometer wurden auch in Erfassungssystemen verwendet. Zum Beispiel offenbart das US-Patent 5 694 114 von Udd ein kohärentes Warnsignal für ein sicheres Kommunikationssystem, das ein Paar von Monomodefaser-Optikkabeln in Verbindung mit einer oder mehreren Lichtquellen, Phasenmodulatoren, Detektoren und Polarisations-Verwürfelungselementen nutzt, um ein Sagnac-Interferometer zu bilden. Wie zum Beispiel in **Fig. 13A** und 19 von US-Patent 5 694 114 dargestellt, können sich zwei Sagnac-Interferometer ein gemeinsames Erfassungselement teilen, indem zwei Lichtquellen mit unterschiedlichen optischen Wellenlängen verwendet werden.

## ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

**[0007]** Ein Aspekt der vorliegenden Erfindung ist ein akustisches Sensorsystem, das eine Lichtquelle umfaßt. Ein Koppler empfängt das Licht von der Quelle, koppelt einen ersten Teil des Lichts in einen ersten Koppler-Port ein und koppelt einen zweiten Teil in den zweiten Koppler-Port ein. Ein erstes Ende einer interferometrischen Schleife ist mit dem ersten Koppler-Port verbunden, um den ersten Teil des Lichts zu empfangen, und ein zweites Ende ist mit dem zweiten Koppler-Port verbunden, um den zweiten Teil des Lichts zu empfangen. Die interferometrische Schleife läßt den ersten Teil des Lichts sich in eine Richtung zum zweiten Koppler-Port ausbreiten und läßt den zweiten Teil des Lichts sich in eine zweite Richtung entgegengesetzt zur ersten Richtung zum ersten Koppler-Port ausbreiten. Die Interferometerschleife umfaßt einen Verzögerungsabschnitt. Der Verzögerungsabschnitt hat ein erstes Ende am ersten Ende der interferometrischen Schleife und hat ein zweites Ende. Der Verzögerungsabschnitt ermöglicht eine zeitliche Verzögerung für Licht, das den Verzögerungsabschnitt vom ersten Ende des Verzögerungsabschnitts zum zweiten Ende des Verzögerungsabschnitts durchläuft, und für Licht, das den Verzögerungsabschnitt vom zweiten Ende des Verzögerungsabschnitts zum ersten Ende des Verzögerungsabschnitts durchläuft. Eine Matrixanordnung hat ein erstes Ende, das mit dem zweiten Ende des Verzögerungsabschnitts verbunden ist, und ein zweites Ende, das mit dem zweiten Ende der Schleife verbunden ist. Die Matrixanordnung umfaßt mindestens einen ersten akustischen Sensor und einen zweiten akustischen Sensor, die zwischen das erste Ende der Matrixanordnung und das zweite Ende der Matrixanordnung geschaltet sind. Der zweite akustische Sensor ist weiter entfernt vom zweiten Ende des Verzögerungsabschnitts und weiter entfernt vom zweiten Ende der Schleife angeordnet als der erste akustische Sensor, um den zweiten akustischen Sensor zu veranlassen, Licht zu einem anderen Zeitpunkt als der erste akustische Sensor zu empfangen. Der erste akustische Sensor und der zweite akustische Sensor sprechen auf ein eintreffendes akustisches Signal an, um Licht zu modulieren, das sie in der ersten und zweiten Richtung durchläuft. Mindestens ein Detektor empfängt Licht, das von der interferometrischen Schleife zum Koppler zurückgekehrt ist. Der Detektor detektiert Licht, das durch den ersten akustischen Sensor zu einem ersten Zeitpunkt moduliert wurde, und detektiert Licht, das durch den zweiten akustischen Sensor zu einem zweiten Zeitpunkt nach dem ersten Zeitpunkt moduliert wurde. Der Detektor erzeugt ein Detektor-Ausgangssignal. Für jeden Sensor tun die Lichtimpulse, die sich durch den Sensor in entgegengesetzten Richtungen ausbreiten, dies zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Da das zu detektierende akustische Signal sich während der durch die Schleife eingeführten Zeitverzögerung verändert, erfahren die zwei optischen Signale, die sich in entgegengesetzten Richtungen durch jeden Sensor ausbreiten, unterschiedliche Phasenverschiebungen, die durch das akustische Signal verursacht werden. Wenn die optischen Signale am Schleifenkoppler kombiniert werden, erzeugt die differentielle Phasenverschiebung eine Amplitudenmodulation, die durch den Detektor detektiert wird.

**[0008]** In gewissen Ausführungsformen umfaßt das akustische Sensorsystem ferner einen zweiten Verzögerungsabschnitt. Der zweite Verzögerungsabschnitt ist so mit der interferometrischen Schleife verbunden, daß sich nur ein Teil des Lichts durch den zweiten Verzögerungsabschnitt ausbreitet. Der zweite Verzögerungsabschnitt bewirkt, daß jeder der ersten und zweiten Sensoren Licht sich ausbreiten läßt, das nur durch den ersten Verzögerungsabschnitt verzögert wurde, und auch Licht sich ausbreiten läßt, das sowohl durch den ersten Verzögerungsabschnitt als auch durch den zweiten Verzögerungsabschnitt verzögert wurde. Der Detektor empfängt dadurch mindestens zwei Paare von interferierenden Signalen von jedem der ersten und zweiten Sensoren.

**[0009]** In bestimmten Ausführungsformen weist das akustische Sensorsystem ferner eine Vielzahl von Verstärkern auf, die in der Matrixanordnung dazwischengeschaltet sind, um Verluste, die durch die Aufteilung des Lichts zwischen den ersten und zweiten Sensoren verursacht werden, zu kompensieren.

**[0010]** In gewissen Ausführungsformen wird das durch den ersten akustischen Sensor modulierte Licht durch zeitliches Multiplexieren von dem durch den zweiten akustischen Sensor modulierten Licht getrennt.

**[0011]** In alternativen Ausführungsformen wird das Licht an der Quelle moduliert, um Frequenzmultiplexie-

zung des zurückgekehrten Signals durchzuführen. In solchen Ausführungsformen weist das System ferner einen Generator auf, der eine Chirp-Frequenz erzeugt. Ein Intensitätsmodulator moduliert das Licht von der Lichtquelle mit der Chirp-Frequenz. Ein elektronisches Verzögerungsglied empfängt die Chirp-Frequenz und erzeugt eine verzögerte Chirp-Frequenz. Ein Mischer mischt das Detektor-Ausgangssignal und die verzögerte Chirp-Frequenz, um eine jeweilige Schwebungsfrequenz entsprechend jedem der ersten und zweiten akustischen Sensoren zu erzeugen. Jede Schwebungsfrequenz hat jeweilige Seitenbänder entsprechend einem jeweiligen akustischen Signal, das durch den ersten bzw. zweiten akustischen Sensor detektiert wurde.

**[0012]** In einer weiteren alternativen Ausführungsform werden die zurückgekehrten Signale durch Codemultiplextechnik multiplexiert. In einer solchen alternativen Ausführungsform weist das akustische Sensorsystem ferner einen Codegenerator auf, der einen digitalen Code erzeugt. Ein Intensitätsmodulator moduliert das Licht von der Lichtquelle mit dem digitalen Code. Ein elektronisches Verzögerungsglied wendet eine ausgewählte Verzögerung auf den digitalen Code an, um einen verzögerten digitalen Code zu erzeugen. Ein Korrelator korreliert das Detektor-Ausgangssignal und den digitalen Code, um ein demultiplexiertes Signal entsprechend einem durch einen ausgewählten der ersten und zweiten akustischen Sensoren erfaßten akustischen Signal zu erzeugen. Der ausgewählte der ersten und zweiten Sensoren wird durch die ausgewählte Verzögerung ausgewählt. Durch Verändern der elektronischen Verzögerung kann jedes der Sensorsignale nacheinander demultiplexiert werden.

**[0013]** Die vorliegende Erfindung kann vorteilhafterweise einen Depolarisator in der Schleife aufweisen, um das sich darin ausbreitende Licht zu depolarisieren, um zu gewährleisten, daß sich Licht in beiden Polarisationszuständen durch die Sensoren ausbreitet.

**[0014]** Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung ist ein Sagnac-Interferometer-Erfassungssystem, das ein erstes Sagnac-Interferometer umfaßt. Das erste Sagnac-Interferometer umfaßt eine Lichtquelle, die Licht in Form einer Vielzahl voneinander getrennter Lichtimpulse erzeugt. Ein Koppler koppelt die Lichtimpulse in einen ersten Koppler-Port und einen zweiten Koppler-Port ein. Ein optischer Weg koppelt Licht vom ersten Koppler-Port in den zweiten Koppler-Port und vom zweiten Koppler-Port in den ersten Koppler-Port ein. Der optische Weg umfaßt einen Verzögerungsabschnitt am ersten Koppler-Port. Der Verzögerungsabschnitt ermöglicht eine Zeitverzögerung für Licht, das sich durch den ersten Verzögerungsabschnitt von einem ersten Ende des Verzögerungsabschnitts zu einem zweiten Ende des Verzögerungsabschnitts ausbreitet, und ermöglicht auch die Zeitverzögerung für Licht, das sich durch den Verzögerungsabschnitt vom zweiten Ende des Verzögerungsabschnitts zum ersten Ende des Verzögerungsabschnitts ausbreitet. Ein erster akustischer Sensor ist zwischen das zweite Ende des Verzögerungsabschnitts und den zweiten Port des Kopplers geschaltet. Der erste akustische Sensor läßt ein erstes Lichtsignal sich vom zweiten Ende des Verzögerungsabschnitts zum zweiten Koppler-Port ausbreiten und läßt ein zweites Lichtsignal sich vom zweiten Koppler-Port zum zweiten Ende des Verzögerungsabschnitts ausbreiten. Der erste akustische Sensor spricht auf ein auftreffendes akustisches Signal an, um das erste und zweite Lichtsignal zu modulieren. Das zweite Lichtsignal wird im Verzögerungsabschnitt verzögert, um zu bewirken, daß das zweite Lichtsignal am ersten Port des Kopplers im wesentlichen zum gleichen Zeitpunkt ankommt, zu dem das zweite Lichtsignal am zweiten Port des Kopplers eintrifft. Das erste Lichtsignal und das zweite Lichtsignal interferieren am Koppler, um ein erstes Interferometer-Ausgangssignal zu erzeugen. Ein Detektor ist angeschlossen, um das erste Interferometer-Ausgangssignal zu empfangen. Ein zweites Sagnac-Interferometer umfaßt die Lichtquelle, den Koppler, den optischen Weg, den Verzögerungsabschnitt, den Detektor und einen zweiten akustischen Sensor. Der zweite akustische Sensor ist zwischen das zweite Ende des Verzögerungsabschnitts und den zweiten Port des Kopplers geschaltet. Der zweite akustische Sensor ist vom zweiten Ende des Verzögerungsabschnitts und vom zweiten Port des Kopplers versetzt, um zu bewirken, daß der zweite akustische Sensor ein drittes Lichtsignal vom zweiten Ende des Verzögerungsabschnitts in den zweiten Port des Kopplers einkoppelt, nachdem das erste Lichtsignal in den zweiten Port des Kopplers einkoppelt worden ist, und um zu bewirken, daß der akustische Sensor ein viertes Lichtsignal vom zweiten Port des Kopplers in das zweite Ende des Verzögerungsabschnitts einkoppelt, nachdem das zweite Lichtsignal in das zweite Ende des Verzögerungsabschnitts einkoppelt worden ist. Das vierte Lichtsignal wird im Verzögerungsabschnitt verzögert, um am ersten Port des Kopplers im wesentlichen zum gleichen Zeitpunkt einzutreffen, zu dem das dritte Lichtsignal am zweiten Port des Kopplers eintrifft. Das dritte und vierte Lichtsignal interferieren im Koppler, um ein zweites Interferometer-Ausgangssignal zu erzeugen, das durch den Detektor detektiert wird, nachdem das erste Interferometer-Lichtsignal vom Detektor detektiert worden ist.

**[0015]** Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung ist eine Erfassungsvorrichtung, die eine Quelle von Lichtimpulsen und einen optischen Koppler umfaßt, der die Lichtimpulse empfängt und die Lichtimpulse in einen ersten Koppler-Port und einen zweiten Koppler-Port einkoppelt. Ein erstes Ende einer interferometrischen

Schleife ist angeschlossen, um Licht vom ersten Koppler-Port zu empfangen, und ein zweites Ende ist angeschlossen, um Licht vom zweiten Koppler-Port zu empfangen. Das Licht vom ersten Koppler-Port breitet sich in einer ersten Richtung in der Schleife zum zweiten Koppler-Port aus. Das Licht vom zweiten Koppler-Port breitet sich in einer zweiten Richtung in der Schleife zum ersten Koppler-Port aus. Eine Sensormatrixanordnung umfaßt eine Vielzahl von Sensoren. Jeder Sensor empfängt einen entsprechenden Teil des Lichts, das sich in der ersten Richtung in der Schleife ausbreitet und einen entsprechenden Teil des Lichts, der sich in der zweiten Richtung in der Schleife ausbreitet. Jeder der Sensoren hat eine andere optische Weglänge, so daß die entsprechenden Teile des Lichts sich erst durch einen der Sensoren ausbreiten, bevor die entsprechenden Teile des Lichts sich durch einen zweiten der Sensoren ausbreiten. Die Sensormatrixanordnung ist optisch näher am ersten Ende der Schleife als am zweiten Ende der Schleife angeordnet, um zu bewirken, daß das Licht, das sich in der ersten Richtung ausbreitet, in der Schleife verzögert wird und sich dann durch die Sensormatrixanordnung ausbreitet, und um zu bewirken, daß das Licht, das sich in der zweiten Richtung ausbreitet, sich durch die Sensormatrixanordnung ausbreitet und dann in der Schleife verzögert wird. Somit breiten sich die Lichtimpulse, die sich durch einen gegebenen Sensor in entgegengesetzten Richtungen ausbreiten, zu unterschiedlichen Zeiten aus. Weil die zu detektierenden akustischen Signale sich während der durch die Schleife eingeführten Zeitverzögerung verändern, erfahren die zwei optischen Signale unterschiedliche, durch das akustische Signal verursachte Phasenverschiebungen. Wenn die optischen Signale am Schleifenkoppler kombiniert werden, erzeugen die unterschiedlichen Phasenverschiebungen eine Amplitudenmodulation, die durch den Detektor detektiert wird.

**[0016]** Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zum Erfassen eines Parameters. Gemäß diesem Verfahren breitet sich Licht von einer Lichtquelle durch eine Schleife aus, so daß entsprechende Teile des Lichts sich gegenläufig in ersten und zweiten Richtungen in der Schleife ausbreiten. Das sich in der Schleife ausbreitende Licht durchläuft mindestens einen ersten und zweiten Sensor, die auf den zu erfassenden Parameter ansprechen, um das durchlaufende Licht zu modulieren. Der erste und zweite Sensor haben unterschiedliche optische Weglängen, so daß das Licht, das den zweiten Sensor durchläuft, in bezug auf das Licht, das den ersten Sensor durchläuft, verzögert wird. Das sich in der Schleife in der ersten Richtung ausbreitende Licht wird verzögert, bevor es den ersten und zweiten Sensor durchläuft. Das sich in der Schleife in der zweiten Richtung ausbreitende Licht wird verzögert, nachdem es den ersten und zweiten Sensor durchlaufen hat. Das sich in der ersten und zweiten Richtung ausbreitende Licht wird in einem Koppler interferiert, um ein erstes Ausgangssignal zu erzeugen, das auf Licht anspricht, das den ersten Sensor in der ersten und zweiten Richtung durchläuft, und um ein zweites Ausgangssignal zu erzeugen, das auf Licht anspricht, das den zweiten Sensor in der ersten und zweiten Richtung durchläuft. Das zweite Ausgangssignal wird in bezug auf das erste Ausgangssignal verzögert.

**[0017]** Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung ist eine Erfassungsvorrichtung, die einen Koppler umfaßt, der Licht von einer optischen Quelle empfängt und der einen ersten und zweiten Teil des Lichts in einen ersten und zweiten Koppler-Port einkoppelt. Eine optische Schleife ist zwischen den ersten und den zweiten Koppler-Port geschaltet, um Licht sich vom ersten Koppler-Port zum zweiten Koppler-Port durch die Schleife in einer ersten Richtung ausbreiten zu lassen und um Licht sich vom zweiten Koppler-Port zum ersten Koppler-Port in einer zweiten Richtung ausbreiten zu lassen. Das sich in der ersten und zweiten Richtung ausbreitende Licht wird im Koppler kombiniert. Eine Sensormatrixanordnung umfaßt mindestens einen ersten und zweiten Sensor, die einen Parameter erfassen. Der erste und zweite Sensor haben einen ersten bzw. zweiten optischen Weg. Der erste optische Weg durch den ersten Sensor ist optisch kürzer als der zweite optische Weg durch den zweiten Sensor. Ein optischer Verzögerungsabschnitt ist in der Schleife zwischen der Sensormatrixanordnung und dem ersten Koppler-Port angeordnet, um zu bewirken, daß das Licht, das sich vom ersten Koppler-Port in der ersten Richtung ausbreitet, durch den optischen Verzögerungsabschnitt verzögert wird, bevor es die Sensormatrixanordnung erreicht, und um zu bewirken, daß das Licht, das sich vom zweiten Koppler-Port in der zweiten Richtung ausbreitet, durch den optischen Verzögerungsabschnitt verzögert wird, nachdem es die Sensormatrixanordnung durchlaufen hat.

**[0018]** Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung ist eine faseroptische akustische Sensormatrixanordnung, die auf einem Sagnac-Interferometer beruht, statt wie in bekannten akustischen Sensormatrixanordnungen auf Mach-Zehnder-Interferometern zu beruhen. Die faseroptische akustische Sensormatrixanordnung wird zum Detektieren akustischer Wellen in Wasser verwendet. Dadurch, daß die Sensormatrixanordnung auf dem Sagnac-Interferometer statt auf dem Mach-Zehnder-Interferometer beruht, hat die Sensormatrixanordnung einen stabilen Arbeitspunkt, hat verringertes Phasenrauschen und ermöglicht, daß eine breitbandige Signalquelle verwendet wird, statt einen teureren schmallinigen Laser zu erfordern. Eine große Anzahl akustischer Sensoren kann in die Architektur des Sagnac-Interferometers multiplexiert werden.

## KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0019] Die vorliegende Erfindung wird nachstehend in Verbindung mit den beigegeführten Zeichnungen beschrieben; die folgendes zeigen:

[0020] [Fig. 1](#) stellt ein beispielhaftes Sagnac-Interferometer dar, das eine einzelne Erfassungsschleife hat;

[0021] [Fig. 2](#) stellt eine Sagnac-Sensormatrixanordnung gemäß der vorliegenden Erfindung dar, worin jede Stufe der Sensormatrixanordnung ein weiteres Sagnac-Interferometer bildet;

[0022] [Fig. 3](#) stellt eine Sagnac-Sensormatrixanordnung dar, die erbiumdotierte Faserverstärker aufweist, um durch Einkoppeln und Verlustwärme verlorengegangene Signalleistung wiederzugewinnen;

[0023] [Fig. 4](#) stellt ein Diagramm des Frequenzverhaltens eines Sagnac-Interferometers gemäß der vorliegenden Erfindung im Vergleich zu den drei vorherrschenden ozeanischen Grundgeräuschen dar;

[0024] [Fig. 5](#) stellt Diagramme der größten und kleinsten akustischen Signale dar, die durch ein Mach-Zehnder-Interferometer detektierbar sind und die durch ein Sagnac-Interferometer gemäß der vorliegenden Erfindung detektierbar sind, und zeigt den relativ konstanten Dynamikbereich des Sagnac-Interferometers über einen großen Bereich von Frequenzen;

[0025] [Fig. 6](#) stellt Diagramme des kleinsten detektierbaren akustischen Signals über der Frequenz für drei Sagnac-Interferometer-Konfigurationen dar, die unterschiedliche Faserlängen im Hydrophon und der Verzögerungsschleife haben;

[0026] [Fig. 7](#) stellt ein Sagnac-Interferometer gemäß der vorliegenden Erfindung dar, das eine zusätzliche Verzögerungsschleife umfaßt, um den Dynamikbereich des Interferometers zu vergrößern;

[0027] [Fig. 8](#) stellt ein Diagramm des Dynamikbereichs dar, das durch das Interferometer aus [Fig. 7](#) bereitgestellt wird;

[0028] [Fig. 9A](#) stellt die Matrixanordnung der Verzögerungsschleife des Interferometers im trockenen Ende eines Sensormatrixanordnungssystems dar;

[0029] [Fig. 9B](#) stellt die Matrixanordnung der Verzögerungsschleife des Interferometers im nassen Ende eines Sensormatrixanordnungssystems dar;

[0030] [Fig. 10](#) stellt das Sagnac-Interferometer aus [Fig. 9B](#) mit Anmerkungen dar, die die bei der Berechnung der Auswirkungen der Phasenmodulation verwendeten Längen zeigen;

[0031] [Fig. 11](#) stellt eine Methode zum Aufwickeln der Verzögerungsschleife dar, um die Auswirkungen der akustischen Welle auf die Verzögerungsschleife zu verringern;

[0032] [Fig. 12](#) stellt ein Sagnac-Interferometer gemäß der vorliegenden Erfindung dar, das leere Stufen aufweist, die durch verteilte Aufnahme bedingtes Rauschen detektieren, das von den durch die Sensoren erzeugten Signalen subtrahiert werden kann;

[0033] [Fig. 13](#) stellt ein Sagnac-Interferometer gemäß der vorliegenden Erfindung dar, das einen Depolarisator aufweist, um die Auswirkungen des polarisationsinduzierten Schwunds zu verringern;

[0034] [Fig. 14](#) stellt ein Sagnac-Interferometer dar, das Frequenzmultiplextechnik nutzt;

[0035] [Fig. 15](#) stellt ein Diagramm dar, das die Erzeugung der Schwebungssignale zwischen dem verzögerten Modulationssignal und den zurückkehrenden Sensorsignalen im Interferometer von [Fig. 14](#) zeigt; und

[0036] [Fig. 16](#) stellt ein Sagnac-Interferometer dar, das Codemultiplextechnik nutzt.

## AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0037] Die vorliegende Erfindung wird unten in Verbindung mit einer Matrixanordnung von akustischen Sen-

soren (zum Beispiel Hydrophonen) in einer Sagnac-Schleife beschrieben. Bevor die bevorzugten Ausführungsformen beschrieben werden, wird ein kurzer Überblick über die Arbeitsweise eines einschleifigen akustischen Sagnac-Sensors gegeben.

#### EINSCHLEIFIGER AKUSTISCHER SAGNAC-SENSOR

**[0038]** Ein einfacher Sagnac-basierter akustischer Sensor **100** ist in [Fig. 1](#) dargestellt. Die Sagnac-Schleife ist in zwei Abschnitte geteilt, einen Verzögerungsabschnitt **102** und ein Hydrophon **104**. Der Verzögerungsabschnitt **102** ist einfach eine Faser großer Länge, normalerweise mehr als 1 km. Das Hydrophon **104** ist ein Faserabschnitt, in dem eine akustische Welle in eine Phasenmodulation eines optischen Signals, das sich durch die Faser ausbreitet, umgewandelt wird. Eine hohe Empfindlichkeit gegenüber akustischen Wellen wird normalerweise durch Auswählen optimierter Beschichtungen für den Abschnitt der Faser im Hydrophon **104** und Wickeln der Faser um eine Spindel geeigneter Zusammensetzung erreicht. (Siehe zum Beispiel: J.A. Bucaro et al, Optical fibre sensor coatings, Optical Fiber Sensors, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, 1986, Seiten 321-338). Die Faserlänge, die um das Hydrophon **104** gewickelt ist, beträgt normalerweise 10 Meter bis 100 Meter. Licht von einer Quelle **110**, wie zum Beispiel einer Superfluoreszenzfaser-(SFS-)Quelle, wird durch einen  $3 \times 3$ -Koppler **112** in Strahlen im Uhrzeigersinn (CW) und entgegen dem Uhrzeigersinn (CCW) aufgeteilt. Die Arbeitsweise des  $3 \times 3$ -Kopplers **112** ist bekannt und wird zum Beispiel in Sang K. Sheem, Fiber-optic gyroscope with  $(3 \times 3)$  directional coupler, Applied Physics Letters, Vol. 37, Nr. 10, 15. November 1980, Seiten 869-871, beschrieben.

**[0039]** Obwohl hier mit Verwendung eines  $3 \times 3$ -Kopplers **112** beschrieben, können andere Koppler (zum Beispiel ein  $2 \times 2$ -Koppler, ein  $4 \times 4$ -Koppler usw.) mit alternativen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung verwendet werden. Um zum Beispiel einen  $2 \times 2$ -Koppler zu verwenden, werden beide Ports einer Seite benutzt, um das Sagnac-Interferometer zu bilden. Ein Port der anderen Seite ist ein Detektionsport. Der verbleibende Port wird verwendet, um Licht in die Matrixanordnung einzuführen, und kann ebenfalls als Detektionsport verwendet werden, wenn ein Koppler oder eine Richtungsgabel eingesetzt wird (auf ähnliche Weise, wie es bei faseroptischen Gyroskopen geschieht). Im allgemeinen kann jeder  $n \times m$ -Koppler eingesetzt werden, indem zwei Ports einer Seite des Kopplers verwendet werden, um das Sagnac-Interferometer zu bilden, und die Ports der anderen Seite des Kopplers als Detektionsports, Einführports oder beides verwendet werden.

**[0040]** Nach dem Aufteilen bewegt sich der CW-Strahl zuerst durch die Verzögerungsschleife **102** und dann durch das Hydrophon **104**, während der CCW-Strahl sich zuerst durch das Hydrophon **104** und dann durch die Verzögerungsschleife **102** bewegt. Während einer Zeitverzögerung  $T_{\text{delay}}$  zwischen einem Zeitpunkt, da sich der CW-Strahl durch das Hydrophon **104** bewegt, und einem Zeitpunkt, da sich der CCW-Strahl durch das Hydrophon **104** bewegt, verändern sich das akustische Signal und ebenso die akustisch induzierte Phasenmodulation im Hydrophon **104**. Diese Veränderung der Phasenmodulation wird in eine Phasendifferenz zwischen den sich gegenläufig ausbreitenden Strahlen abgebildet, die in eine Intensitätsmodulation umgewandelt wird, wenn die Strahlen am  $3 \times 3$ -Koppler **112** rekombinieren. Diese Intensitätsmodulation wird dann durch einen ersten Detektor **120** und einen zweiten Detektor **122** oder nur durch einen der beiden Detektoren detektiert.

**[0041]** Ausführlicher gesagt, wenn ein akustisches Signal eine Phasenmodulation  $\phi_h \cos(t)$  in der Faser des Hydrophons **104** hervorruft, ist die resultierende Phasenmodulation zwischen den interferierenden Strahlen am 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  $T_{\text{delay}}$  die Durchlaufzeit durch die Verzögerungsschleife ist. Somit ist  $\phi_{\text{int}}(t)$  eine Funktion der Hydrophon-Modulation  $\phi_h$  und des Produkts aus der akustischen Modulationsfrequenz  $\Omega$  und der Schleifenverzögerung  $T_{\text{delay}}$ . Dies unterscheidet sich von einem Mach-Zehnder-Interferometersensor, bei dem  $\phi_{\text{int}}(t)$  nur eine Funktion der Hydrophon-Modulation  $\phi_h$  ist. Maximale Empfindlichkeit wird im akustischen Sensor mit Sagnac-Schleife erreicht, wenn das Produkt aus der akustischen Frequenz  $\Omega$  und der Zeitverzögerung  $T_{\text{delay}}$  ein ungerades Vielfaches von  $\pi$  (des maximalen Werts des ersten Sinustterms aus Gleichung 1) ist. Die akustische Frequenz, die dieses Produkt gleich  $\pi$  macht, wird als Eigenfrequenz der Schleife bezeichnet, was die niedrigste Frequenz ist, bei der maximale Empfindlichkeit erreicht wird. Bei den meisten Unterwasser-Erfassungsanwendungen geht es darum, akustische Frequenzen unter 10 kHz zu detektieren. Damit die Schleifen-Eigenfrequenz kleiner als 10 kHz ist, ist eine Verzögerungszeit von mindestens 50 Mikrosekunden und demzufolge eine Verzögerungsschleifenlänge von mindestens 10 km erforderlich. Somit benötigt der akustische Sag-



nac-Sensor **100** eine große Menge Faser zum Detektieren niedriger akustischer Frequenzen ( $< 10$  kHz).

**[0042]** Der Aufbau mit gemeinsamem Weg, der dem Sagnac-Interferometer eigen ist, hat gegenüber einem Mach-Zehnder-Interferometer viele Vorteile zusätzlich zum stabilen Arbeitspunkt und der Beseitigung des Phasenrauschens, die bereits erwähnt wurden. Ein Sagnac-Interferometer ermöglicht die Verwendung einer Breitbandquelle mit kurzer Kohärenzlänge, wie zum Beispiel einer Superfluoreszenzfaser-(SFS-)Quelle, eines Beispiels für eine Quelle mit verstärkter Spontanemission (ASE). Solche Quellen sind kostengünstig und können leicht hohe Leistungen bereitstellen. Es ist gezeigt worden, daß die Verwendung des  $3 \times 3$ -Kopplers den akustischen Sagnac-Sensor nahe der  $90^\circ$ -Phasenverschiebung passiv einstellt. (Siehe Sang K. Sheem, Fiber-optic gyroscope with  $(3 \times 3)$  directional coupler, Applied Physics Letters, Vol. 37, Nr. 10, 15. November 1980, Seiten 869–871; und H. Poisel et al, Low-cost fibre-optic gyroscope, Electronics Letters, Vol. 26, Nr. 1, 4. Januar 1990, Seiten 69–70.) Durch Subtrahieren der Signale aus den zwei Detektionsports des  $3 \times 3$ -Kopplers kann das Quellenzusatzrauschen, das die begrenzende Rauschquelle von SFS-Quellen ist, subtrahiert werden, während phasenmodulationsinduzierte Intensitätsschwankungen infolge des Hydrophons hinzugefügt werden. Dies ermöglicht es einem Sagnac-Interferometer, nahezu durch das Schußgeräusch begrenztes Leistungsvermögen zu erreichen. (Siehe: Kjell Kråkenes et al, Sagnac interferometer for underwater sound detection: noise properties, OPTICS LETTERS, Vol. 14, Nr. 20, 15. Oktober 1989, Seiten 1152–1145.)

**[0043]** Frühere Arbeit an Sagnac-basierten akustischen Sensoren war auf eine Einzelsensor-Konfiguration begrenzt. Wegen der dem Sagnac-Interferometer innewohnenden Vorteile haben Anwender festgestellt, daß es wünschenswert ist, Mach-Zehnder-Interferometersensoren in einer großflächigen Matrixanordnung durch Sagnac-basierte Sensoren zu ersetzen. Jeder oben besprochene Sagnac-Sensor **100** benötigt viele Kilometer an Faser, was das Einfügen mehrerer solcher Sensoren in eine großräumige Matrixanordnung undurchführbar macht. Forschungen zur Verwendung mehrfach durchlaufener Verzögerungsschleifen, um die Anforderungen an die Faserlänge zu verringern, haben Sensoren hervorgebracht, die bedeutend weniger Faser verwenden, aber aufgrund des Einfügens von EDFAs in die mehrfach durchlaufene Schleife von starkem Rauschen betroffen sind. (Siehe zum Beispiel J.T. Kringelbotn et al, Sagnac Interferometer Including A Recirculating Ring With An Erbium-doped Fibre Amplifier, OFS '92 Conference Proceedings, Seiten 6–9.) Ein neuartiger Ansatz zum Verringern der benötigten Faser wird nachfolgend beschrieben.

#### NEUARTIGE AUF DEM SAGNAC-INTERFEROMETER BERUHENDE SENSORMATRIXANORDNUNG

**[0044]** Wie unten erläutert wird, haben die Anmelder ein neuartiges System erfunden, das die Fasermenge, die für eine Sagnac-basierte großflächige Matrixanordnung benötigt wird, durch Multiplexieren mehrerer Sensoren auf dieselbe Verzögerungsschleife verringert, wodurch eine praktisch anwendbare Sagnac-Sensormatrixanordnung (SSA) entsteht. Wie in [Fig. 2](#) dargestellt, umfaßt eine Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** gemäß der vorliegenden Erfindung eine Matrixanordnung **210** von Hydrophonen **212(1)** in einer Leiterkonfiguration, die an eine einzige Verzögerungsschleife **214** angefügt sind. Zum Beispiel zeigt [Fig. 2](#) eine Sagnac-Sensormatrixanordnung **210** mit N Hydrophonen **212(1)**, **212(2)** ... **212(N)** in entsprechenden Stufen **216(1)**, **216(2)** ... **216(N)**. Jede Stufe **216(i)** in der Sagnac-Sensormatrixanordnung **210** umfaßt eine einzelne Faser, die um ein entsprechendes Hydrophon **212(i)** gewickelt ist. Jeder Weg von einem  $3 \times 3$ -Koppler **220** durch die Verzögerungsschleife **214** und die Matrixanordnung **210** und zurück zum Koppler **220** umfaßt ein separates Sagnac-Interferometer. Deshalb gibt es für eine Matrixanordnung von N Sensoren **212N** separate Sagnac-Interferometer, von denen sich jedes wie der in [Fig. 1](#) gezeigte einschleifige Sagnac-Sensor **100** verhält. Jedes Sagnac-Interferometer mißt das akustische Signal an einem separaten Punkt im Raum, das heißt, dem Standort des Hydrophons **212(1)**. Zum Beispiel mißt das Sagnac-Interferometer, das die Verzögerungsschleife **214** und die Stufe **216(1)** umfaßt, das akustische Signal am Hydrophon **212(1)**. Zusätzlich nimmt jedes Sagnac-Interferometer akustische Signale (zum Beispiel Rauschen) anderswo in der Schleife auf, wobei dieses Rauschen vorteilhaft verringert wird, wie weiter unten beschrieben wird.

**[0045]** Die Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** ist in einer Zeitmultiplex-(TDM)-Konfiguration am leichtesten zu verstehen (andere Prinzipien als TDM werden später besprochen). Eine Quelle **222** (die vorteilhafterweise eine herkömmliche pulsierende Quelle umfassen kann oder eine Dauerstrich-Quelle mit einem externen Modulator umfassen kann) erzeugt einen Lichtimpuls, der in die Sagnac-Schleife über einen dritten Port des Kopplers **220** eintritt und sich, wie in [Fig. 2](#) angezeigt, sowohl in der CW als auch in der CCW-Richtung ausbreitet. Bei Erreichen der Matrixanordnung **210** wird der CCW-Impuls in eine Kette von N separaten Impulsen aufgeteilt. Zu diesem Zeitpunkt hat der CW-Eingangsimpuls die Matrixanordnung **210** noch nicht erreicht und ist immer noch ein einzelner Impuls. Wenn der CW-Impuls die Matrixanordnung **210** erreicht, wird er ebenfalls in eine Kette von N Impulsen aufgeteilt. Jeder Impuls in der CW-Kette kehrt zum  $3 \times 3$ -Koppler **220** zurück, nachdem er eine entsprechende Stufe **216(i)** durchlaufen hat, und interferiert mit dem Impuls in der CCW-Ket-



te, der dieselbe Stufe **216(i)** in entgegengesetzter Richtung durchlaufen hat. Somit werden N Impulse durch einen ersten Detektor **230** und einen zweiten Detektor **232** detektiert, und jeder Impuls umfaßt die CW- und CCW-Impulse einer der N Sagnac-Schleifen (das heißt. die zwei Impulse, die dieselbe entsprechende Stufe **216(i)** in entgegengesetzter Richtung durchlaufen haben). Weil die Impulse, die andere Kombinationen von Stufen durchlaufen, keine identischen optischen Wege durchlaufen, fallen solche Impulse am Koppler **220** zeitlich nicht zusammen und interferieren somit am Koppler **220** nicht miteinander. Die Impulsbreiten sollten kleiner sein als die differentielle Verzögerung zwischen benachbarten Sensoren, so daß sich die Impulse von benachbarten Sensoren nicht überlappen.

**[0046]** Wie in [Fig. 3](#) dargestellt, werden erbiumdotierte Faserverstärker (EDFAs) geringer Verstärkung **240** vorteilhafterweise zum Matrixanordnungsabschnitt **210** hinzugefügt, ebenso wie EDFAs interferometrischen Mach-Zehnder-Sensormatrixanordnungen hinzugefügt worden sind. (Siehe zum Beispiel 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, Seiten 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, Seiten 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, Seiten 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, Seiten 1651–1653.) Die EDFAs **240** erhöhen die Anzahl von Sensoren, die durch eine einzelne Matrixanordnung **210** unterstützt werden können, indem sie die Signalleistung, die durch Einkoppeln und Verlustwärme verlorengeht, wiedergewinnen. Die EDFAs werden vorteilhafterweise durch eine oder mehrere Pumplaserquellen **242** über einen Aufteilungskoppler **244** sowie über einen ersten Wellenlängenmultiplex-(WDM)-Koppler **246** und einen zweiten WDM-Koppler **248** gepumpt.

**[0047]** Weil sie den Sagnac-Aufbau nutzt, hat die Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** alle Vorteile des oben beschriebenen einschleifigen Sagnac-basierten Sensors **100**. Durch den Aufbau mit gemeinsamem Weg ist die Umwandlung des Quellen-Phasenrauschens in Intensitätsrauschen am Interferenzkoppler **220** nicht mehr notwendig. Die Quelle **222** kann eine ASE-(verstärkte-Spontanemission-)Faserquelle (das heißt. die oben besprochene SFS) sein, die bei 1,55  $\mu\text{m}$  kostengünstig hohe Leistungen ermöglicht. Passive Einstellung nahe der 90°-Phasenverschiebung ist durch Verwendung des 3  $\times$  3-Kopplers **220** für alle Sensoren erreichbar. Außerdem stellt der 3  $\times$  3-Koppler **220** eine zweckdienliche Einrichtung bereit, um zwei interferometrische Ausgangssignale an den Detektoren **230**, **232** zu detektieren und die Ausgangssignale der zwei Detektoren zu verwenden, um Quellenzusatzrauschen zu subtrahieren. (Siehe zum Beispiel K. Kråkenes et al, Sagnac interferometer for underwater sound detection: noise properties, OPTIC LETTERS, Vol. 14, 1989, Seiten 1152–1154, das die Verwendung zweier Detektoren in Kombination mit einem einzelnen Sagnac-Interferometer zeigt.)

**[0048]** Die Eigenschaften dieser neuartigen Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** werden unten ausführlicher beschrieben, gefolgt von einer ausführlicheren Beschreibung des Frequenzverhaltens und des Dynamikbereichs, die sich aus der Verwendung des Sagnac-Interferometers ergeben. Danach wird eine Berechnung der Stärke der verteilten Aufnahmen durch die nicht zu Hydrophonen gehörenden Faserschleifensegmente beschrieben, zusammen mit einem Verfahren zum Verringern dieser Aufnahmestärke. Polarisation wird unten ebenfalls behandelt. Neue Quellen von Rauschen, die durch den Sagnac-Aufbau eingeführt werden, werden danach besprochen. Zum Schluß werden andere Multiplexprinzipien als TDM für die Sagnac-Sensormatrixanordnung vorgestellt.

**[0049]** Obwohl die vorliegende Erfindung oben mit Bezug auf einen einzelnen Sensor in jeder Stufe **216(i)** der Matrixanordnung **210** beschrieben wurde, versteht es sich, daß jede Stufe **216(i)** vorteilhafterweise eine Teilmatrixanordnung mit mehreren Sensoren umfassen kann, wie sie zum Beispiel im US-Patent 5 866 898 an Hodgson et al, ausgestellt am 2. Februar 1999, beschrieben wurden. (Siehe auch C.W Hodgson et al, Large-scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers, OPTICS LETTERS, Vol. 22, 1997, Seiten 1651–1653; J.L. Wagener et al, Novel Fiber Sensor Arrays Using Erbium-Doped Fiber Amplifiers, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 15, 1997, Seiten 1681–1688; und 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, Seiten 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, Seiten 224–231.)

## FREQUENZVERHALTEN

**[0050]** Wie oben ausgeführt wurde, hat der Sagnac-Sensor ein frequenzabhängiges Verhalten, gegeben durch Gleichung 1. Bei Frequenzen unterhalb der Eigenfrequenz der Schleife, definiert als  $1/(2 \cdot T_{\text{delay}})$ , wächst das kleinste detektierbare akustische Signal mit dem Kehrwert der akustischen Frequenz. Diese verringerte akustische Empfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen war ein großes Problem für den akustischen Sagnac-Sensor. Jedoch ist darauf hingewiesen worden, daß diese verringerte Empfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen glücklicherweise mit einem zunehmenden ozeanischen Grundgeräusch zusammentrifft. (Siehe zum Beispiel: Svene Knudsen, Ambient and Optical Noise in Fiber-Optic Interferometric Acoustic Properties, Fiber-Optic Sensors Based on the Michelson and Sagnac Interferometers: Responsitivity and Noise Properties, Abschlußarbeit, Kapitel 3, Norwegian University of Science and Technology, 1996, Seiten 37–40.) Im Idealfall wäre es wünschenswert, wenn das kleinste detektierbare akustische Signal einer Matrixanordnung bei einer gegebenen Frequenz eine konstante Größe unterhalb des ozeanischen Grundgeräuschs bei dieser Frequenz wäre. Somit nähme das kleinste detektierbare akustische Signal bei niedrigeren Frequenzen ebenfalls zu und träfe mit dem zunehmenden ozeanischen Grundgeräusch zusammen. Das Frequenzverhalten der Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** der vorliegenden Erfindung ermöglicht tatsächlich eine gute Anpassung zwischen dem ozeanischen Grundgeräusch und der akustischen Empfindlichkeit. Dies ist in [Fig. 4](#) dargestellt, wo das kleinste detektierbare akustische Signal für eine Sagnac-Sensormatrixanordnung als eine Kurve **250** aufgetragen ist, wobei ein optisches Grundrauschen von  $10 \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ , eine Hydrophon-Phasenempfindlichkeit von  $3,2 \times 10^7 \text{ rad/Pa}$  und eine Verzögerungsschleifenlänge von 20 km angenommen werden. (Die vertikale Achse ist in dB relativ zu einer Basislinie von  $1 \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  geteilt.) Ebenfalls in [Fig. 4](#) aufgetragen ist das ozeanische Grundgeräusch für die drei vorherrschenden ozeanischen Geräuschquellen bei diesen Frequenzen und eine daraus folgende Summe der Geräusche aus diesen drei Quellen. Eine Kurve **252** stellt das Geräusch aus ozeanischen Turbulenzen, Erdbeben, Vulkanausbrüchen und ähnlichem dar. Eine Kurve **253** stellt leichte Schiffsgeräusche dar. Eine Kurve **254** stellt DSSO-Geräusche (entfernte Schiffsgeräusche und Stürme) dar. Eine Kurve **256** stellt die Summe aller Grundgeräusche der drei vorherrschenden Quellen (das heißt, die Summe aus den Kurven **252**, **253** und **254**) dar. (Siehe zum Beispiel: Robert J. Urick, The noise background of the sea: ambient noise level, Principles of Underwater Sound, 3. Ausgabe, Kapitel 7, McGraw-Hill, 1983, Seiten 202–236.) Das kleinste detektierbare akustische Signal der Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** nimmt in einer solchen Weise zu, daß es einen nahezu konstanten Betrag detektierbaren Signals unterhalb des ozeanischen Grundgeräuschs bei allen Frequenzen unterhalb 10 kHz bereitstellt. Somit verbietet der frequenzabhängige Bereich der Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** nicht die akustische Detektion niedriger Frequenzen. Die Mach-Zehnder-Matrixanordnung zeigt denselben Trend wie die Sagnac-Sensormatrixanordnung, nämlich eine abnehmende Empfindlichkeit hin zu niedrigeren Frequenzen; aber in der Mach-Zehnder-Matrixanordnung ist die Abnahme der Empfindlichkeit geringer als beim Sagnac-basierten Sensor.

**[0051]** Obwohl sowohl das Mach-Zehnder-Interferometer als auch die Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** ähnliches frequenzabhängiges Verhalten haben, ist die Quelle ihres Frequenzverhaltens fundamental verschieden. Das zunehmende kleinste detektierbare Signal in der Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnung ist auf ein zunehmendes optisches Grundrauschen zurückzuführen. Die Ursache dieses zunehmenden optischen Grundrausches ist das Phasenrauschen, das durch das weg-ungleiche Mach-Zehnder-Interferometer eingeführt wird. Somit nimmt das Grundrauschen, obwohl es bei 10 kHz  $10 \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  beträgt, zu niedrigeren Frequenzen hin zu. U der Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** ist das zunehmende kleinste detektierbare akustische Signal auf den  $\sin(T_{\text{delay}}/2)$ -Term aus Gleichung 1 zurückzuführen und nicht auf ein zunehmendes optisches Grundrauschen. Das optische Grundrauschen bleibt bei konstant  $10 \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  über den gesamten Frequenzbereich hinweg.

**[0052]** Die Bedeutung dieses Unterschieds ist zu sehen, wenn man den in [Fig. 5](#) dargestellten Dynamikbereich der Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnung und der Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** betrachtet. Der Dynamikbereich eines Sensors ist durch die kleinste und die größte detektierbare Phasenverschiebung begrenzt. Für interferometrische Sensoren ist die größte detektierbare Phasenverschiebung durch das nichtlineare Verhalten des Interferometers begrenzt und die kleinste detektierbare Phasenverschiebung durch das optische Grundrauschen. Sowohl das Mach-Zehnder-Interferometer als auch die Sagnac-Sensormatrixanordnung haben größte detektierbare Phasenverschiebungen, die über den akustischen Frequenzbereich konstant bleiben. Jedoch hat die Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** eine flache kleinste detektierbare Phasenverschiebung, weil sie ein flaches optisches Grundrauschen hat, während die Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnung aufgrund eines zunehmenden optischen Grundrausches, das vom durch das nicht wegegleiche Interferometer eingeführten Phasenrauschen verursacht wird, an einer zunehmenden kleinsten detektierbaren Phasenverschiebung leidet. Die Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** hat bei allen akustischen Frequenzen einen konstanten Dynamikbereich, während die Mach-Zehnder-Interferometer-Sen-

sormatrixanordnung bei niedrigen akustischen Frequenzen einen verringerten Dynamikbereich hat. Dies ist in [Fig. 5](#) dargestellt, worin das kleinste und das größte detektierbare akustische Signal (in dB willkürlichen Einheiten) für die Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** und eine Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnung aufgetragen sind. Wie in [Fig. 5](#) dargestellt, haben beide Matrixanordnungen oberhalb von 1 kHz, wo das Phasenrauschen die Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnung nicht begrenzt, einen Dynamikbereich von ungefähr 100 dB. Bei 10 kHz bestimmt das Phasenrauschen die Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnung, und ihr Dynamikbereich ist auf ungefähr 74 dB verringert. Währenddessen verbleibt der Dynamikbereich der Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** bei ungefähr 100 dB.

**[0053]** Es ist interessant, das Frequenzverhalten der Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** bei Frequenzen weit unterhalb der Schleifen-Eigenfrequenz als eine Funktion der Verzögerungsschleifenlänge und der Hydrophonempfindlichkeit zu betrachten. Bei diesen Frequenzen kann der  $\sin(T_{\text{delay}}/2)$ -Faktor in Gleichung 1 zu  $T_{\text{delay}}/2$  angenähert werden, was zeigt, daß die Empfindlichkeit der Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** proportional zum Produkt aus  $\Phi_h$  und  $T_{\text{delay}}$  ist.  $\Phi_h$  selbst ist proportional zur Menge an Faser in jedem Hydrophon **212(i)**, und  $T_{\text{delay}}$  ist proportional zur Menge an Faser in der Verzögerungsschleife **214**. Somit ist die Empfindlichkeit bei Frequenzen unterhalb der Schleifen-Eigenfrequenz proportional zum Produkt aus der Hydrophonfaserlänge und der Verzögerungsfaserlänge. [Fig. 6](#) trägt das kleinste detektierbare akustische Signal für verschiedene Konfigurationen von Sagnac-Sensormatrixanordnungen auf, 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. Zum Beispiel stellt eine Kurve **260** den Frequenzbereich einer Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** dar, die 45 km Faser in ihrer Verzögerungsschleife **214** und 100 m Faser in jedem Hydrophon **212(i)** hat; eine Kurve **262** stellt den Frequenzbereich einer Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** mit 30 km Faser in ihrer Verzögerungsschleife **214** und 150 m Faser in jedem Hydrophon **212(i)** dar; und eine Kurve **264** stellt den Frequenzbereich einer Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** mit 15 km Faser in ihrer Verzögerungsschleife **214** und 300 m Faser in jedem Hydrophon **212(i)** dar. Wie dargestellt, hat jede Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** dieselbe Empfindlichkeit bei niedrigen Frequenzen, aber erreicht eine maximale Empfindlichkeit bei unterschiedlichen Frequenzen, die durch ihre entsprechenden Schleifen-Eigenfrequenzen gegeben sind. Somit besteht für ein gegebenes kleinstes detektierbares akustisches Signal bei niedrigen Frequenzen immer noch einige Freiheit in der Auswahl der Faserlängen für die Verzögerungsschleife **214** und die Hydrophone **212(i)**. Diese Freiheit kann genutzt werden, um der Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** zu helfen, andere Kriterien, wie die Minimierung der Gesamtmenge an erforderlichen Fasern oder die Minimierung der Verzögerungsschleifenlänge, zu erfüllen.

#### VERGRÖßERUNG DES DYNAMIKBEREICHS DER SAGNAC-SENSORMATRIXANORDNUNG

**[0054]** Wie oben beschrieben, hat die Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** bei niedrigen Frequenzen einen größeren Dynamikbereich als die Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnung, weil sie nicht anfällig für Phasenrauschen ist. Im Idealfall stellt eine Matrixanordnung **200** einen ausreichenden Dynamikbereich bereit, um das stärkste und das schwächste akustische Signal, die mit Wahrscheinlichkeit auftreten, zu detektieren. Diese Anforderung schlägt sich oft in einem erforderlichen Dynamikbereich von ungefähr 150 dB nieder. Um einen so großen Dynamikbereich in einer Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnung zu erzielen, sind zwei separate Sensoren mit unterschiedlichen Phasenempfindlichkeiten erforderlich, wobei jeder einen Bruchteil des gesamten Dynamikbereichs von 150 dB detektiert. Der offensichtliche Nachteil dieses Prinzips besteht darin, daß es zwei Sensormatrixanordnungen benötigt (das heißt zweimal so viele Hydrophone, Stufen, Quellen und Detektoren). Tatsächlich kann eine Matrixanordnung, die N Hydrophone unterstützen kann, das akustische Signal nur an N/2 Punkten detektieren.

**[0055]** Bei der Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** ist es möglich, einen großen Dynamikbereich zu erzielen, ohne zusätzliche Hydrophone **212** zu verwenden. Da die Phasenempfindlichkeit in der Sagnac-Sensormatrixanordnung eine Funktion der Hydrophonempfindlichkeit und der Verzögerungsschleifenlänge ist, wie in Gleichung 1 gezeigt, kann die Phasenempfindlichkeit der gesamten Matrixanordnung von Hydrophonen verändert werden, indem die Verzögerungsschleifenlänge modifiziert wird. Indem gleichzeitig zwei separate Verzögerungsschleifen **214(1)** und **214(2)** der Länge  $L_1$  bzw.  $L_2$  verwendet werden, wie in einer modifizierten Sensormatrixanordnung **266** in [Fig. 7](#) dargestellt, kann der Detektionsbereich der Matrixanordnung **266** dramatisch vergrößert werden. Die Matrixanordnung **266** hat nun 2N separate Sagnac-Schleifen. Jedes Hydrophon **212(i)** gibt ein separates Signal für jeden der zwei Verzögerungsschleifenwege zurück, und die Länge jeder Verzögerungsschleife **214(1)**, **214(2)** bestimmt den akustischen Detektionsbereich dieses Signals. Der Gesamtbereich der akustischen Detektion jedes Hydrophons **212(i)** ist die Vereinigung der Detektionsbereiche jedes der zwei Sagnac-Schleifensensoren, die das Hydrophon **212(i)** einschließen. Die Längen  $L_1$  und  $L_2$  legen

den akustischen Detektionsbereich fest. Die Länge  $L_1 + L_2$  wird so gewählt, daß sie der Matrixanordnung **266** ermöglicht, das kleinste interessierende akustische Signal zu detektieren. Die Länge  $L_1$  der Verzögerungsschleife **214(1)** wird dann so gewählt, daß sie den Detektionsbereich der Signale, die nur diese kürzere Verzögerungsschleife durchlaufen, oberhalb des Detektionsbereichs der Signale plaziert, die beide Verzögerungsschleifen **214(1)**, **214(2)** durchlaufen. Bei einem TDM-System ist die Wiederholfrequenz der Quellenimpulse infolge des Einfügens einer zweiten Schleife halbiert, um  $2N$  Impulsen Zeit zur Rückkehr zu geben, und die Längen der Verzögerungsschleifen **214(1)**, **214(2)** werden so ausgewählt, daß es keine Impulsüberlappung gibt. Weil die Wiederholfrequenz halbiert ist, verringert sich der Dynamikbereich jedes einzelnen Signals um 3 dB. Diese Verringerung wird durch die Vergrößerung des Gesamt-Dynamikbereichs, die durch Huckepack der Dynamikbereiche zweier separater Signale erreicht wird, mehr als ausgeglichen. In [Fig. 7](#) ist die zweite Verzögerungsschleife **214(2)** so angeordnet, daß das gesamte Licht, das die zweite Verzögerungsschleife **214(2)** durchläuft, die erste Verzögerungsschleife **214(1)** durchläuft. Es versteht sich, daß als Alternative dazu die beiden Verzögerungsschleifen **214(1)**, **214(2)** optisch parallel sein können, so daß das Licht, das die zweite Verzögerungsschleife **214(2)** durchläuft, die erste Verzögerungsschleife **214(1)** nicht durchläuft. In diesem 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. Doch da  $L_1$  erheblich kürzer ist als  $L_2$ , ist diese Korrektur nicht wesentlich. Die Ausführungsform von [Fig. 7](#) verringert den Gesamtbedarf an Faser durch Hinzufügen der Länge der ersten Verzögerungsschleife zur zweiten Verzögerungsschleife.

[0056] [Fig. 8](#) stellt den erweiterten Dynamikbereich dar, der durch Verwendung der zwei Verzögerungsschleifen **214(1)**, **214(2)** in der Matrixanordnung **266** ermöglicht wird, in der der Dynamikbereich jedes Signals 100 dB beträgt und das Verhältnis  $L_1/L_2$  auf 5000 festgesetzt wurde. Wie dargestellt, ist die Matrixanordnung **266** nun imstande, über den gesamten interessierenden Dynamikbereich (ungefähr ein 160-dB-Bereich) zu detektieren, ohne die Hydrophonzahl zu erhöhen.

#### VERTEILTE ERFASSUNG

[0057] In der Sagnac-Sensormatrixanordnung **266** kann jede Phasenmodulation im Interferometer in eine Intensitätsmodulation am  $3 \times 3$ -Interferenzkoppler **220** übertragen werden. Diese über die gesamte Sagnac-Schleife verteilte Erfassung ist für eine akustische Sensormatrixanordnung unvorteilhaft. Um praktisch anwendbar zu sein, sollte die akustische Sensormatrixanordnung das akustische Signal an einer Anzahl diskreter Punkte im Raum (das heißt, an den Hydrophonen) abtasten und diese Signale unabhängig voneinander zurückgeben. Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnungen erreichen dies, weil das Interferometer auf einen kleinen Raum begrenzt ist und somit nur an diesem Punkt erfaßt. Damit die Sagnac-Sensormatrixanordnung **266** praktisch anwendbar wird, muß die verteilte Erfassung der Sagnac-Schleife verringert werden.

[0058] Den Großteil an Fasern im Interferometer bildet die Verzögerungsschleife **214**, die an zwei Orten angeordnet werden kann. Die erste ist mit der Quelle **222** und der Detektionselektronik (das heißt, dem Detektor **230** und dem Detektor **232**) im trockenen Ende (das heißt, außerhalb des Wassers), wie in [Fig. 9A](#) dargestellt. Hier kann die Verzögerungsschleife **214** vor Umwelteinflüssen abgeschirmt werden, um jegliche externe Modulation zu minimieren. Jedoch sind die abwärtsführenden Fasern **270**, **272**, die das nasse Ende mit dem Matrixanordnungsabschnitt **210** verbinden, Bestandteil des Interferometers. Die zweite Möglichkeit ist, die Verzögerungsschleife **214** mit der Matrixanordnung **210** im nassen Ende (das heißt, im Wasser) anzuordnen, wie in [Fig. 9B](#) dargestellt. So kann die Verzögerungsschleife **214** zwar nicht im gleichen Umfang isoliert werden, wie es geschehen könnte, wenn sie im trockenen Ende angeordnet wäre, aber die abwärtsführenden Fasern **270**, **272**, **274** sind außerhalb des Interferometers und erfassen somit nicht. Die relative Stärke der auf abwärtsführende Faser und Verzögerungsschleife verteilten Aufnahme bestimmt, welche Konfiguration für eine bestimmte Anwendung am besten geeignet ist. Man beachte, daß die abwärtsführenden Fasern **270**, **272** stationär bleiben müssen, wenn die Verzögerungsschleife **214** im trockenen Ende angeordnet ist ([Fig. 9A](#)), um physikalische Bewegungen, wie zum Beispiel Verbiegen und Vibrationen, dieser Fasern zu verhindern, die extrem große Phasenmodulationen hervorrufen können. Dies sind faserbewegungsinduzierte Phasenmodulationen im Gegensatz zu akustisch induzierten Phasenmodulationen. (Solche physikalischen Bewegungen sind bei geschleppten Matrixanordnungen ein Problem, dürften aber bei stationären Matrixanordnungen kein signifikantes Problem sein.) Somit muß, wenn sich die Verzögerungsschleife **214** im trockenen Ende ([Fig. 9A](#)) angeordnet ist, das gesamte nasse Ende der Sagnac-Sensormatrixanordnung **210** stationär sein. Jedoch muß, wenn die Verzögerungsschleife **214** im nassen Ende angeordnet ist ([Fig. 9B](#)), nur der Abschnitt zur Rechten des  $3 \times 3$ -Kopplers **220** in [Fig. 9B](#) stationär bleiben, da die abwärtsführenden Fasern **270**, **272**, **274** dann kein Bestandteil des Interferometers sind. Wenn die Verzögerungsschleife **214** im nassen Ende angeordnet ist ([Fig. 9B](#)), muß die Verzögerungsschleifenfaser unempfindlich gemacht werden. Die Verzögerungsschleife **214** kann stationär gemacht werden, indem die Verzögerungsschleifenfasern um einen unempfindlich gemachten



Zylinder (nicht dargestellt) gewickelt werden, wodurch Faserbewegung beseitigt und akustische Aufnahme zur Hauptquelle des durch verteilte Aufnahme bedingten Signals gemacht wird. Weil es einfacher ist, eine Faser für akustisch induzierte Phasenmodulation unempfindlich zu machen, als sie für bewegungsinduzierte Phasenmodulation unempfindlich zu machen, ist die Konfiguration, die die Verzögerungsschleife **214** im nassen Ende anordnet ([Fig. 9B](#)), für Anwendungen mit geschleppter Matrixanordnung vorzuziehen und wird unten ausführlicher beschrieben.

#### BERECHNUNG DES IN DER VERZÖGERUNGSSCHLEIFE INDUZIERTEN AKUSTISCHEN AUFNAHME- RAUSCHENS

**[0059]** In diesem Abschnitt werden Schätzwerte für die Stärke des akustisch induzierten durch verteilte Aufnahme bedingten Rauschens im Vergleich zur akustisch induzierten Hydrophon-Phasenmodulation in der Sagnac-Sensormatrixanordnung **210** von [Fig. 9\(B\)](#) abgeleitet. Die Intensitätsmodulation aufgrund der verteilten Phasenmodulationen, die aus der Aufnahme akustischer Signale in der Verzögerungsschleife und in der Busfaser (der Faser, die jedes Hydrophon mit der Verzögerungsschleife und dem 3 × 3-Koppler verbindet) folgen, kann als eine Quelle für Rauschen betrachtet werden. Für die nachfolgende Beschreibung wird angenommen, daß eine Schleife der Sagnac-Sensormatrixanordnung nur eine Verzögerungsfaser der Länge  $L_d$ , eine Busfaser der Länge  $L_b$ , eine Hydrophonfaser der Länge  $L_h$  und eine Gesamtlänge  $L$  umfaßt, wie in [Fig. 10](#) dargestellt. Außerdem wird angenommen, daß  $L_d$  viel größer ist als  $L_b$  und  $L_h$ . Die Phasenempfindlichkeit der Faser für akustische Signale ergibt sich aus einer druckabhängigen Ausbreitungskonstante  $\beta$ . Im allgemeinen kann die druckabhängige Komponente der Ausbreitungskonstante an einem Ort  $l$  und zu einem Zeitpunkt  $t$  wie folgt geschrieben werden:

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

wobei  $\beta_0$  die Ausbreitungskonstante beim Druck Null ist,  $R(l)$  die normierte Phasenempfindlichkeit der Faser ist, und  $P(l, t)$  der Druck als eine Funktion von Raum und Zeit ist. Wenn ein sinusförmiges akustisches Signal der Frequenz  $\Omega$  angenommen wird, kann Gleichung 2 wie folgt umgeschrieben werden:

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

wobei  $P_0$  der stationäre Druck ist,  $P_m$  die Amplitude der Druckmodulation ist (die als unabhängig von  $l$  angenommen wird) und  $\theta(l)$  die räumliche Phasenänderung der akustischen Welle enthält. Grundsätzlich wird die induzierte Phasendifferenz zwischen interferierenden Strahlen in einer Sagnac-Schleife aufgrund akustisch induzierter Phasenmodulation von  $l = l_1$  bis  $l = l_2$  durch dieses Integral gegeben:

$$\phi_{\text{int}}(t) = \int_{l_1}^{l_2} \left[ \beta \left( l, t + \frac{(1-L)}{v} \right) - \beta \left( l, t - \frac{1}{v} \right) \right] dl \quad (4)$$

wobei  $v$  die Lichtgeschwindigkeit in der Faser ist und  $L$  die Schleifenlänge ist. Einsetzen von Gleichung 3 in Gleichung 4 ergibt:

$$\phi_{\text{int}}(t) = \beta_0 P_m \int_{l_1}^{l_2} R(l) \left[ \sin \left( \Omega \left( t + \frac{(1-L)}{v} \right) + \theta(l) \right) - \sin \left( \Omega \left( t - \frac{1}{v} \right) + \theta(l) \right) \right] dl \quad (5)$$

Gleichung 5 kann verwendet werden, um die Phasendifferenz zwischen interferierenden Strahlen aufgrund akustischer Modulation des Hydrophons, des Busses und der Verzögerungsfasern zu bestimmen.

**[0060]** Für die Hydrophonfaser wird 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 (das heißt, daß die akustische Wellenlänge viel größer ist als die Abmessungen des Hydrophons). Es wird außerdem angenommen, daß die normierte Phasenempfindlichkeit der Faser  $R(l)$  konstant ist und in diesem Bereich gleich  $R_b$  ist. Gleichung 5 ergibt dann eine Amplitude der Phasendifferenz zwischen interferierenden Strahlen aufgrund der Hydrophonfasermodulation:

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

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

**[0061]** Für die Busfaser wird Gleichung 5 zuerst 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. Es wird wiederum angenommen, daß  $R(l)$  konstant und gleich  $R_b$  ist für alle Busfasern, so daß  $\theta(l)$  im Integral der Gleichung 5 konstant ist. Die Amplitude der Phasendifferenz zwischen interferierenden Strahlen aufgrund Fasermodulation wird:

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

wobei angenommen wird, daß  $\Omega L_h/2v \ll 1$ . Es sollte betont werden, daß die Annahmen über die Konstanz von  $\theta(l)$  und der Amplitude von  $\Omega L_h/2v$  dazu dienen,  $\Phi_{\text{int}}^b$  zu vergrößern, wodurch ein worst-case-Szenarium für die Busfaser gegeben wird.

**[0062]** Für die Verzögerungsfaser wird Gleichung 5 von  $l_1 = 0$  bis  $l_2 = l_d$  integriert, und wie zuvor wird angenommen, daß  $\theta(l)$  über diesen Bereich konstant ist (das heißt, die Verzögerungsschleifenwicklung ist viel kleiner als die akustische Wellenlänge) und daß  $R(l)$  konstant und über das Integral gleich  $R_d$  ist. Gleichung 5 ergibt dann eine Amplitude der Phasendifferenz zwischen interferierenden Strahlen aufgrund der Verzögerungsfasermodulation, die gegeben ist durch:

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

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

**[0063]** Mit den Gleichungen 6 bis 8 kann die relative Stärke dieser Phasenmodulationsamplituden berechnet werden. Zuerst ist zu beachten, daß eine normale kunststoffbeschichtete Faser eine normierte Phasenempfindlichkeit  $R$  von  $-328$  dB re  $1/\mu\text{Pa}$  hat, wie zum Beispiel in J.A. Bucaro et al, Optical fibre sensor coatings, Optical Fiber Sensors, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, 1986, Seiten 321–338 beschrieben. Andererseits, wie zum Beispiel 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, Seiten 360–363, hat eine Faser, die um heutige aus luftgelagerten Spindeln hergestellte Hydrophone gewickelt ist, eine normierte Phasenempfindlichkeit von  $-298$  dB re  $1/\mu\text{Pa}$ , eine Steigerung von 30 dB gegenüber normaler Faser. Wenn man annimmt, daß die Verzögerungsschleife und die Busfaser die normierte Phasenempfindlichkeit einer normalen kunststoffbeschichteten Faser haben und daß die Hydrophonfaser um eine luftgelagerten Spindel gewickelt ist, dann ist das Verhältnis von  $R_h$  zu  $R_b$  oder  $R_d$  ungefähr 30 dB. Deshalb kann unter der vereinfachenden Annahme, die getroffen wurde, um die Gleichungen 6 bis 8 zu erhalten, festgestellt werden:

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

und

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

**[0064]** Das Verhältnis  $L_b/L_h$  ist eine Funktion des Hydrophonorts. Für das erste Hydrophon ist  $L_b/L_h \approx 0$ , was  $\Phi_{\text{int}}^h/\Phi_{\text{int}}^d = 31$  und  $\Phi_{\text{int}}^h/\Phi_{\text{int}}^b$  extrem groß macht. Für das letzte Hydrophon werden typische Werte von 100 Metern bzw. 1 km für  $L_h$  bzw.  $L_b$  verwendet, um zu  $\Phi_{\text{int}}^h/\Phi_{\text{int}}^d \approx \Phi_{\text{int}}^h/\Phi_{\text{int}}^b \approx 3$  zu gelangen. Somit ist trotz der Tatsache, daß die Hydrophonfaser eine relativ kleine Menge der gesamten Sagnac-Schleife bildet, die Stärke der akustisch induzierten Phasenmodulation in der Hydrophonfaser selbst für das entfernteste Hydrophon größer als die akustisch induzierten Phasenmodulationen in der Verzögerungsschleifenfaser und in der Busfaser. Der folgende Abschnitt beschreibt ein Mittel, um mit diesem Niveau an durch verteilte Aufnahme bedingtem Rauschen unter Verwendung leerer Stufen fertigzuwerden.

**[0065]** Um das Integral in Gleichung 5 für die Verzögerungsschleifenfaser zu bewerten, wird angenommen, daß  $R(l) = R_d$  für alle  $l$  kleiner als  $L_d$ . Es war diese Konstanz von  $R(l)$ , die jeglichen Beitrag zum Integral der Gleichung 5 von  $l = (L - L_d)$  bis  $L_d$  beseitigte (weil der Integrand zu einer asymmetrischen Funktion über  $L/2$  wurde). Jedoch führt das Wickeln einer großen Faserlänge zu einer gewissen Abhängigkeit in  $R(l)$  von  $l$  (wahrscheinlich, weil die innere Schicht der Faser ein anderes  $R$  als die äußere Schicht hat). Diese Schwankungen von  $R(l)$  vergrößern die Verzögerungsschleifenaufnahme von  $l = L - L_d$  zu  $L_d$ . Um diese Aufnahme zu verringern, ist erstens zu beachten, daß  $R(l)$  nur eine symmetrische Funktion um  $L/2$  sein muß, um den Integrand

von Gleichung 5 zu einer asymmetrischen Funktion über  $L/2$  zu machen. Es kann erzwungen werden, daß  $R(l)$  um  $L/2$  stärker symmetrisch wird, indem die Verzögerungsschleife auf eine solche Weise gewickelt wird, daß symmetrische Punkte der Faserschleife nebeneinander angeordnet werden, wie in [Fig. 11](#) gezeigt. Eine solche Wicklung stellt sicher, daß symmetrische Punkte der Verzögerungsschleife nahe beieinander angeordnet werden, so daß jegliche Schwankungen von  $R(l)$  aufgrund der Position der Faser auf der Wicklung so symmetrisch wie möglich um  $L/2$  sind, wodurch die Verzögerungsschleifenaufnahme dem Ausdruck aus Gleichung 8 so nah wie möglich gebracht wird. Man beachte, daß jede Sagnac-Schleife in der Sagnac-Sensormatrixanordnung einen anderen  $L/2$ -Punkt hat; nur eine Schleife kann exakt so gewickelt werden wie in [Fig. 11](#) dargestellt, wodurch ein kleiner Grad an Asymmetrie in  $R(l)$  in alle außer einer der Sagnac-Schleifen eingeführt wird.

**[0066]** Es sei auch erwähnt, daß es zusätzlich zur Erhöhung der akustischen Empfindlichkeit der Faser mit einem Hydrophon möglich ist, Fasern durch Aufbringen einer metallischen Beschichtung einer bestimmten Stärke unempfindlich zu machen. (Siehe zum Beispiel J.A. Bucaro, Optical fibre sensor coatings, oben zitiert.) Gemessene normierte Phasenempfindlichkeiten von nur noch  $-366$  dB re  $1/\mu\text{Pa}$  wurden berichtet. Wenn solche Fasern in Verzögerungs- oder Busleitungen verwendet werden, erreicht das Verhältnis von  $R_h$  zu  $R_b$  oder das Verhältnis von  $R_b$  zu  $R_d$   $68$  dB (statt  $30$  dB mit kunststoffbeschichteten Verzögerungs- und Busfasern), was das hydrophoninduzierte Signal um  $38$  dB über das verzögerungs- und businduzierte Signal erhöht.

#### VERRINGERUNG DES DURCH VERTEILTE AUFNAHME BEDINGTEN RAUSCHENS DURCH VERWENDUNG LEERER STUFEN

**[0067]** Um durch verteilte Aufnahme bedingte Signale weiter zu beseitigen, kann die hydrophoninduzierte akustische Modulation von der Modulation durch verteilte Aufnahme isoliert werden, indem leere Stufen **300**, die kein Hydrophon enthalten, in der Matrixanordnung **210** angeordnet werden, wie in [Fig. 12](#) gezeigt. Jede als Erfassungsstufe bezeichnete Stufe **216(i)**, die ein Hydrophon **212(i)** enthält, wird von einer der leeren Stufen **300(i)** gefolgt. Die Tatsache, daß die nichterfassende Faser jeder Schleife, die eine leere Stufe **300(i)** einschließt, nahezu identisch ist mit der nichterfassenden Faser der Schleife, die die entsprechende Erfassungsstufe **216(i)** einschließt, bedeutet, daß die leere Stufe **300(i)** und die entsprechende Erfassungsstufe **216(i)** nahezu das gleiche durch verteilte Aufnahme bedingte Signal haben. Indem diese leere Stufe **300(i)** als ein anderer Sensor in der Matrixanordnung **210** behandelt wird und die Impulse (beim TDM-Prinzip) von den leeren Stufen **300(i)** und den Erfassungsstufe **216(i)** passend getaktet werden, so daß sie einander nicht überlappen, kann das durch verteilte Aufnahme bedingte Signal, das an jeder Erfassungsstufe **216(i)** vorliegt, gemessen werden. Nach der Detektion kann dieses Signal vom Erfassungsstufensignal abgezogen werden, was nur noch durch Phasenmodulationen in der Hydrophonfaser erzeugte Intensitätsschwankungen hinterläßt. Ein solches Prinzip zu implementieren, erfordert  $2N$  Stufen für eine  $N$ -Sensor-Matrixanordnung **210**, wodurch der Arbeitstakt individueller Signale um eine Hälfte verringert wird.

**[0068]** Wenn es nicht erforderlich ist, den Busabschnitt der Matrixanordnung **210** unempfindlich zu machen, kann eine einzelne leere Stufe **300** in der Matrixanordnung **210** angeordnet werden, um das mit der Verzögerungsschleife **214** verbundene, durch verteilte Aufnahme bedingte Signal zu messen, wodurch nur  $N + 1$  Stufen ( $N$  Erfassungsstufen **216(i)** und eine leere Stufe **300**) für  $N$  Sensoren erforderlich sind. Wenn eine leere Stufe **300** das durch verteilte Aufnahme bedingte Signal für jede Erfassungsstufe **216(i)** nicht adäquat mißt, können mehr leere Stufen **300** in regelmäßigen Abständen entlang der Matrixanordnung hinzugefügt werden, bis das an jeder Erfassungsstufe **216(i)** vorliegende durch verteilte Aufnahme bedingte Signal durch die nächste dieser leeren Stufen **300** adäquat gemessen werden kann. Die Verwendung von weniger leeren Stufen führt zu einem höheren Arbeitstakt für individuelle Signale. [Fig. 12](#) stellt das Extrem dar, bei dem eine leere Stufe für jede Erfassungsstufe hinzugefügt wurde.

#### POLARISATION

**[0069]** In jedem interferometrischen Sensor muß zur Erreichung eines maximalen Kontrasts der Polarisationszustand (SOP) der interferierenden Strahlen identisch sein, wenn sie rekombinieren. Wenn sie orthogonal sind, gibt es keine Interferenz und somit kein amplitudenmoduliertes Signal. Dies wird als polarisationsinduzierter Signalschwund bezeichnet. Weil jeder Sensor in der Sagnac-Sensormatrixanordnung eine Sagnac-Schleife ist, gelten die bisher durchgeführten Untersuchungen zu polarisationsinduziertem Signalschwund im Sagnac-Fasergyroskop auch für die Sagnac-Sensormatrixanordnung. Eine vielversprechende Lösung besteht darin, einen Depolarisator in der Sagnac-Schleife unterzubringen. (Siehe zum Beispiel K. Böhm et al, LOW-DRIFT FIBRE GYRO USING A SUPERLUMINESCENT DIODE, ELECTRONICS LETTERS, Vol. 17, Nr. 10, 14. Mai 1981, Seiten 352-353.) Der Depolarisator stellt sicher, daß jederzeit mindestens die Hälfte der optischen Leistung im korrekten SOP zum  $3 \times 3$ -Koppler zurückkehrt. Dieser allgemeine Lösungsvorschlag er-



zeugt eine konstante Sichtbarkeit ungeachtet der Schleifen-Doppelbrechung. (Siehe zum Beispiel William K. Burns et al, Fiber-Optic Gyroscopes with Depolarized Light, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 10, Nr. 7, Juli 1992, Seiten 992–999.) Die einfachste Konfiguration verwendet eine unpolarisierte Quelle, zum Beispiel eine Superfluoreszenzfaserquelle, und einen Depolarisator in der Schleife. Wie in [Fig. 13](#) dargestellt, ist in der Sagnac-Sensormatrixanordnung **200** ein Depolarisator **310** an einer Stelle angeordnet, die allen Sagnac-Schleifen gemeinsam ist. Der Depolarisator **310** stellt sicher, daß jeder Sensor **212(i)** diese konstante Sichtbarkeit unabhängig von Doppelbrechung hat, solange die Schleifen-Doppelbrechung konstant bleibt. Dies stellt eine große Vereinfachung im Umgang mit polarisationsinduziertem Signalschwund gegenüber jenen Verfahren dar, die in Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnungen angewendet werden.

**[0070]** Obwohl langsame Veränderungen in der Doppelbrechung durch die Umkehrbarkeit des Sagnac-Interferometers ausreichend aufgehoben werden, erzeugen Doppelbrechungsmodulationen bei Frequenzen im interessierenden akustischen Bereich Polarisationsrauschen. Die meisten Doppelbrechungsmodulationen bei diesen Frequenzen treten als Ergebnis physikalischer Faserbewegungen auf. Somit sollte die Sagnac-Schleife stationär bleiben, um das Polarisationsrauschen zu verringern (ebenso wie das durch verteilte Aufnahme bedingte Signal).

#### RAUSCHQUELLEN, DIE DURCH VERWENDUNG DES SAGNAC-INTERFEROMETERS EINGEFÜHRT WERDEN THERMISCHES PHASENRAUSCHEN

**[0071]** Weil der Brechungsindex der Faser sich mit der Temperatur ändert, erzeugen thermische Fluktuationen in einer Faser Phasenfluktuationen in dem Licht, das sie durchläuft. Diese Indexschwankungen sind über die Länge der Faser nicht korreliert, und somit steigen die sich ergebenden Phasenfluktuationen mit der Quadratwurzel der Länge. Weil Mach-Zehnder-Interferometer normalerweise weniger als 100 Meter Faser in jedem Arm verwenden, ist die Stärke dieses thermischen Phasenrauschens unbedeutend. Das Sagnac-Interferometer hat weit mehr Faser im Interferometer, und infolgedessen kann thermisches Phasenrauschen eine begrenzende Rauschquelle werden. Die Stärke dieses thermischen Phasenrauschens in einem Sagnac-Interferometer wurde theoretisch beschrieben und experimentell bestätigt. (Siehe zum Beispiel: Svene Knudsen et al, Measurements of Fundamental Thermisch Induced Phase Fluctuations in the Fiber of a Sagnac Interferometer, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 7, Nr. 1, 1995, Seiten 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, Seiten 682-686.) Für Schleifen, die länger als 2 km sind, kann das thermische Phasenrauschen  $1 \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  im interessierenden Frequenzbereich überschreiten, was in der Größenordnung der erforderlichen Matrixanordnungsempfindlichkeit liegt.

**[0072]** Das thermische Phasenrauschen kann als eine Quelle des durch verteilte Aufnahme bedingten Rauschens, das einer externen Modulation der Verzögerungsschleife ähnlich ist, betrachtet werden und kann wie jenes durch Verwendung leerer Stufen verringert werden, wie oben beschrieben. Thermisches Phasenrauschen kann auch durch Verkürzen der Schleifenlänge verringert werden. Wie oben beschrieben wurde, kann die Schleifenlänge verkürzt werden, ohne die Empfindlichkeit für niedrige Frequenz zu verändern, indem die Hydrophongfaserlänge um den gleichen Faktor vergrößert wird, um den die Verzögerungsschleife verkleinert wurde. Zum Beispiel hat eine 40-km-Verzögerungsschleife mit 50 Metern Hydrophongfaser das gleiche Niederfrequenzverhalten wie eine 20-km-Verzögerungsschleife mit 100 Metern Faser. Die letzte Kombination leidet jedoch weniger an thermischem Phasenrauschen, weil die Gesamtlänge der Verzögerungsschleife fast um einen Faktor 2 kürzer ist.

#### DURCH KERR-EFFEKT INDUZIERTES PHASENRAUSCHEN

**[0073]** Kerr-induzierte Phasenverschiebungen, die in einem Sagnac-Interferometer erzeugt werden können, haben beim faseroptischen Gyroskop enorme Aufmerksamkeit erfahren. (Siehe zum Beispiel: R.A. Bergh et al, Source statistics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscopes, OPTICS LETTERS, Vol. 7, Nr. 11, November 1982, Seiten 563–565; R.A. Bergh et al, Compensation of the optical Kerr effect in fiberoptic gyroscopes, OPTICS LETTERS, Vol. 7, Nr. 6, Juni 1982, Seiten 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, Seiten 119–121.) Die Anforderungen des Gyroskops und des akustischen Sensors sind jedoch verschieden, weil das Gyroskop Gleichspannungspegel mißt. Kleine, durch Kerr-induzierte Phasenverschiebungen erzeugte Gleichspannungs-Offsets, die ein Fasergyroskop begrenzen würden, sind bei einem akustischen Sensor kein Problem. Die Kerr-induzierte Phasenverschiebung ist kein Problem, solange sie den Arbeitspunkt nicht zu weit von der 90°-Phasenverschiebung wegbewegt. Das Intensitätsrauschen der Lichtquelle kann ein Kerr-induziertes Phasenrauschen am Ausgang erzeugen. Jedoch ist die Stärke dieses Kerr-induzierten Wechselspan-

nungs-Phasenrauschens gering, solange die Kerr-induzierte Gleichspannungs-Phasenverschiebung klein bleibt. Der Ursprung der Kerr-induzierten Phasenverschiebungen in der Sagnac-Sensormatrixanordnung ist anders als im Fasergyroskop. Die Asymmetrie der Sagnac-Sensormatrixanordnung fordert eine solche Kerr-Phasenverschiebung weit eher heraus als das nominell symmetrische Gyroskop es tut. Diese Asymmetrie folgt aus dem Matrixanordnungsabschnitt sowie jeder Matrixanordnung von EDFAs, die insofern asymmetrisch sind, als ein Strahl Verstärkung erfährt, bevor er sich durch die Verzögerungsschleife ausbreitet, und dann Verluste erfährt, während der sich gegenläufig ausbreitende Strahl Verluste erfährt und dann Verstärkung erfährt. Es ist möglich, diese Asymmetrien auszugleichen und die Kerr-induzierte Phasenverschiebung auf Null zu bringen, indem die geeignete Stelle für die EDFAs in der Verzögerungsschleife ausgewählt wird. Die Details hängen von der genauen Konfiguration der Matrixanordnung ab und davon, welches Multiplexprinzip verwendet wird.

#### NICHT-LINEARE PHASENMODULATION, DIE SICH AUS DEN EDFAS ERGIBT

**[0074]** Die in den EDFAs erzeugten Besetzungsinversionen rufen eine Phasenverschiebung am Signallicht, das diese durchläuft, hervor. (Siehe zum Beispiel: 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, Seiten 44–64.) Dieses Phänomen ist genutzt worden, um rein optische interferometrische Schalter herzustellen. In einer Sagnac-Sensormatrixanordnung erzeugen die EDFAs innerhalb des Interferometers eine nichtlineare Phasenverschiebung über denselben Mechanismus. Schwankungen in der Besetzungsinversion aufgrund von Pump- oder Signalleistungsfuktuationen erzeugen Phasenmodulationen, die in ein Intensitätsrauschen umgewandelt werden.

**[0075]** Um die Stärke dieser Rauschquelle abzuschätzen, muß zuerst eine Bestimmung vorgenommen werden, wie die invertierte Besetzung auf Pump- und Signalleistungsfuktuationen reagiert. Dies ist ziemlich einfach zu bewerkstelligen, indem die Bilanzgleichungen für ein Erbium-System herangezogen werden:

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

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

wobei  $N_1$  und  $N_2$  die Besetzungsdichten des unteren bzw. des angeregten Zustands sind,  $N_0$  die Gesamt-Besetzungsdichte ist,  $I$  die Intensität ist,  $\sigma$  der Querschnitt ist,  $A_{\text{eff}}$  die effektive Modenfläche in der Faser ist und  $\tau_2$  die Lebenszeit des Niveaus Zwei ist. Die Indizes p und s bezeichnen Pumpe bzw. Signal, und die hochgestellten Indizes a und e kennzeichnen Absorption bzw. Emission.

**[0076]** Durch Aufteilen der  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $I_p$  und  $I_s$  in ihre stationären und zeitabhängigen Anteile und anschließendes Ersetzen derselben in Gleichung 12 sowie Kombinieren von Gleichung 12 mit Gleichung 11 folgt:

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

wobei der hochgestellte Index ss stationäre Werte kennzeichnet und die zeitabhängigen Anteile nunmehr als explizite Funktionen der Zeit geschrieben 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 letzten zwei Terme in Gleichung 13 vernachlässigt werden. Durch Schreiben von  $I_p(t) = I_p^m \sin(f_p t)$  und  $I_s(t) = I_s^m \sin(f_s t)$  (wobei  $I_p^m$  und  $I_s^m$  die Modulationsamplituden von  $I_p(t)$  bzw.  $I_s(t)$  bezeichnen und  $f_p$  bzw.  $f_s$  die Pump- bzw. Signahodulationsfrequenzen bezeichnen) und Lösen der sich ergebenden Differentialgleichungen kann folgendes ermittelt werden:

$$\frac{|N_2(f_p)|}{N_2^{ss}} \approx \left( \frac{\sigma_s^a(\sigma_p^c + \sigma_p^a) - \sigma_p^a(\sigma_s^c + \sigma_s^a)}{(\sigma_p^c + \sigma_p^a)^2} \cdot \frac{v_p}{v_s} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{1 + f_p^2/f_a^2}} \right) \cdot \frac{I_s^{ss} I_p^m}{I_p^{ss^2}} \quad (14)$$

$$\frac{|N_2(f_s)|}{N_2^{ss}} \approx \left( \frac{\sigma_s^a}{\sigma_p^a} - \frac{\sigma_s^c + \sigma_s^a}{\sigma_p^c + \sigma_p^a} \right) \frac{v_p}{v_s} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + f_p^2/f_a^2}} \right) \cdot \frac{I_s^m}{I_p^{ss}} \quad (15)$$

wobei

$$f_o = \frac{\sigma_p^c + \sigma_p^a}{h v_p} I_p^{ss} + \frac{\sigma_s^c + \sigma_s^a}{h v_s} I_s^{ss} + \frac{1}{\tau_2} \approx \frac{\sigma_p^c + \sigma_p^a}{h v_p} I_p^{ss} + \quad \text{wenn } I_p^{ss} \gg I_s^{ss} \quad (16)$$

**[0077]** Wenn angenommen wird, daß  $h v_p = 1480 \text{ nm}$ ,  $h v_s = 1550 \text{ nm}$  und  $I_p = 1 \text{ W}$ , und wenn typische Erbium-Siliziumdioxid-Querschnitte angenommen werden, dann vereinfachen sich die Gleichungen 14 und 15 zu:

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

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

**[0078]** Die pumpinduzierten Fluktuationen der Besetzungsinversion (Gleichung 17) werden zuerst analysiert. Wenn  $I_s^{ss} = 1 \text{ mW}$ ,  $I_p^{ss} = 1 \text{ W}$  und wenn angenommen wird, daß  $I_p^m/I_p^{ss} = 10^{-6}/\sqrt{\text{Hz}}$  (120 dB/ $\sqrt{\text{Hz}}$  elektronisches Signal-Rausch-Verhältnis), dann ist  $|N_2(f_p)|/N_2^{ss} = 9 \times 10^{-10} \sqrt{\text{Hz}^{-1}}$  bei Frequenzen weit unter 4,3 kHz. Um diese Zahl in eine Phasenmodulation umzurechnen, kann die Tatsache genutzt werden, daß Pumpleistung von 10 mW die in einer erbiumdotierten Faser absorbiert wird, ungefähr 7 rad Phasenverschiebung bei 1550 nm induziert. (Siehe zum Beispiel: 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, Seiten 44-64.) Simulationen ergeben, daß eine absorbierte Pumpleistung von 10 mW in einer typischen erbiumdotierten Faser ungefähr 6 dB Kleinsignalverstärkung bei 1550 nm bereitstellt, was der für jeden Verstärker in einer Matrixanordnung mit verteilten EDFAs erforderlichen Verstärkung nahekommt. (Siehe zum Beispiel: 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 stellt jeder Verstärker ungefähr 7 rad Gleichspannung-Phasenverschiebung bereit. Da die nichtlineare Phasenverschiebung proportional zur Besetzung des oberen Zustands  $N_2$  ist, kann  $N_2/N_2^{ss} = I_p^m/I_p^{ss}$  geschrieben werden. Unter Verwendung dieses Verhältnisses und wiederum der Gleichung 17 für  $I_s^{ss} = 1 \text{ mW}$ ,  $I_p^{ss} = 1 \text{ W}$  und  $I_p^m/I_p^{ss} = 10^{-6}/\sqrt{\text{Hz}}$  und  $f_s \ll 4,3 \text{ kHz}$ , ist das Niederfrequenz-Phasenrauschen, das durch jeden EDFA induziert wird,  $(7 \text{ rad}) \times (9 \times 10^{-10}) \sqrt{\text{Hz}^{-1}} = 6,3 \times 10^{-9} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Wenn angenommen wird, daß es insgesamt 500 solcher Verstärker gibt und daß sich die Phasenmodulationen von allen 500 Verstärkern kohärent addieren, kann die gesamte durch Pumpuschen induzierte Phasenverschiebung auf 3,2 rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$  geschätzt werden. Das angestrebte Grundphasenrauschen ist normalerweise auf 1 rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$  gesetzt, was anzeigt, daß das durch die EDFAs aufgrund von Fluktuationen der Pumpleistung induzierte nichtlineare Phasenrauschen dem geforderten Grundphasenrauschen nahe-, aber nicht gleichkommt. In der Praxis addieren sich die Phasenmodulationen der Verstärker nicht kohärent, was die Zahl von 3,2 rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$  verringert.

**[0079]** Berechnungen der aufgrund von Fluktuationen der Signalleistung induzierten Phasenverschiebung sind komplizierter, weil die Signalleistung nicht nur Intensitätsrauschen aufweist, sondern auch durch das Multiplexprinzip moduliert wird. Betrachten wir wiederum den TDM-Fall: Während ein gegebener Impuls durch einen bestimmten EDFA läuft, gibt es im allgemeinen entweder einen sich gegenläufig ausbreitenden Impuls, der sich zum selben Zeitpunkt durch diesen EDFA läuft, oder nicht. Nimmt man den schlimmsten Fall an, in dem es immer einen sich gegenläufig ausbreitenden Impuls gibt, dann ist  $I_s^m$  das Doppelte des Intensitätsrauschens jedes einzelnen Impulses. Für die Verstärker ist  $I_s^m$  normalerweise das 1,5- bis 2-fache des Intensitätsrauschens jedes einzelnen Impulses. Wenn man annimmt, daß das Signallicht bei akustischen Frequenzen (das heißt  $I_s^m/I_s^{ss} = 10^{-6}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) ein elektronisches Signal-Rausch-Verhältnis von 120 dB/ $\sqrt{\text{Hz}}$  hat, und diese Zahl

zusammen mit  $I_p^{ss} = 1 \text{ W}$  und  $I_s^m = 2 \text{ mW}$  in Gleichung 18 einsetzt, kann berechnet werden, daß  $|N_2(f_s)|/N_2^{ss}$  ungefähr  $2,4 \times 10^{-9}/\text{Hz}^{-1}$  bei Frequenzen beträgt, die viel niedriger als 4,3 kHz sind, und daß das durch Signalintensitätsrauschen in jedem EDFA induzierte Phasenrauschen somit  $1,68 \times 10^{-8} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  beträgt. Nimmt man wiederum 500 Verstärker und kohärente Addition aller EDFA-induzierten Phasenmodulationen an, beträgt das gesamte EDFA-induzierte Phasenrauschen auf jedem Impuls  $8,4 \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ , ein Niveau, das wieder das Leistungsvermögen der Sagnac-Sensormatrixanordnung begrenzen könnte. Jedoch ist eine ausführlichere Untersuchung, die das Multiplexprinzip und die exakte Taktung der Matrixanordnung berücksichtigt, für eine genauere Berechnung notwendig.

#### MULTIPLEXPRINZIPIEN IN EINER SAGNAC-MATRIXANORDNUNG ZEITMULTIPLEXTECHNIK

**[0080]** Es wurde bisher angenommen, daß die Sagnac-Sensormatrixanordnung in einer TDM-Konfiguration betrieben wird. Man beachte, daß bei der Sagnac-Sensormatrixanordnung die Quellenanforderungen für ein solches TDM-System nicht so anspruchsvoll sind wie jene einer Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnung in einer TDM-Konfiguration. Der Grund dafür ist die Verwendung der Breitbandquelle in der Sagnac-Sensormatrixanordnung. In der Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnung ist das Licht von benachbarten Stufen aufgrund der Quelle mit schmaler Linienbreite kohärent, und somit sind extrem hohe Extinktionsverhältnisse auf dem Eingangsimpuls erforderlich, um kohärente Mehrwege-Interferenz zu verhindern. Diese hohen Anforderungen an das Extinktionsverhältnis werden erreicht, indem mehrere Modulatoren in Reihe angeordnet werden, was zu einer komplizierten, verlustreichen und teuren Quelle führt. In der Sagnac-Sensormatrixanordnung muß das erforderliche Extinktionsverhältnis nicht so hoch sein, weil die Breitbandquelle jede Möglichkeit einer kohärenten Mehrwege-Interferenz beseitigt. Außerdem verhindert die von der Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnung benötigte schmale Linienbreite die Verwendung einer gepulsten Laserquelle anstelle einer Dauerstrich-(cw-)Laserquelle, die extern mit Lithiumniobat-Intensitätsmodulatoren moduliert wird. In der Sagnac-Sensormatrixanordnung kann entweder eine Dauerstrich-ASE-Quelle, die extern moduliert wird, eine gepulste ASE-Quelle oder eine Kombination beider verwendet werden, um die Quelle zu bilden. Erneut besteht der Grund dafür darin, daß die Sagnac-Sensormatrixanordnung keine Quelle mit schmaler Linienbreite benötigt. Obwohl die vorliegende Erfindung keine Quelle mit schmaler Linienbreite benötigt, versteht es sich, daß die Sagnac-Sensormatrixanordnung der vorliegenden Erfindung mit einer Quelle mit schmaler Linienbreite verwendet werden kann, wie zum Beispiel einem Laser.

#### FREQUENZMULTIPLEXTECHNIK

**[0081]** Die Verwendung der Breitbandquelle ermöglicht es auch, die Sagnac-Sensormatrixanordnung in anderen als TDM-Konfigurationen zu betreiben, ohne den Aufbau zu verändern oder zusätzliche Quellen zu erfordern. Frequenzmultiplextechnik (FDM) wird gewöhnlich mit Mach-Zehnder-Interferometer-Sensormatrixanordnungen verwendet, die das Prinzip des phasengenerierten Trägers nutzen, ist aber auch mit der Sagnac-Sensormatrixanordnung kompatibel. [Fig. 14](#) zeigt eine grundlegende Sagnac-Sensormatrixanordnung **400**, die ein FDM-Prinzip verwendet. Eine Superfluoreszenzfaser-(SFS-)Quelle **402** (oder eine andere Breitbandquelle, wie zum Beispiel eine LED) erzeugt Eingangslicht. Auf das Eingangslicht wird über einen Intensitätsmodulator **404**, der durch einen Chirp-Frequenzgenerator **406** gesteuert wird, eine Chirp-Intensitätsmodulation angewendet. Das modulierte Licht tritt über einen  $3 \times 3$ -Koppler **412** in eine Sensormatrixanordnung **410** ein. Das Licht durchläuft eine Verzögerungsschleife **414** und mehrere Erfassungsstufen **416(i)** mit entsprechenden Sensoren **418(i)**. Leere Stufen (nicht dargestellt) können bei Bedarf ebenfalls eingeschlossen werden. Nach Durchlaufen der Verzögerungsschleife **414** und der Stufen **416(i)** tritt das Licht durch den Koppler **412** aus der Sensormatrixanordnung **410** aus und wird durch einen 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 derselben Chirp-Frequenz gemischt, die durch ein Verzögerungsglied **424**, das die Chirp-Frequenz um eine Zeit  $\Delta t$  verzögert, zeitverzögert worden ist. In dem in [Fig. 14](#) dargestellten Aufbau wird das Ausgangssignal des Mixers **422** auf einen Spektralanalysator **426** angewendet. In einer betriebsfähigen Ausführungsform wird das Ausgangssignal des Mixers **422** auf ein Signalverarbeitungs-Untersystem (nicht dargestellt) angewendet, das das Ausgangssignal des Mixers **422** analysiert, um das auf die Matrixanordnung **410** auftreffende akustische Signal zu reproduzieren.

**[0082]** Die Signale, die von den Sensoren **418(i)** in den verschiedenen Stufen **416(i)** zurückkehren, werden in bezug auf die verzögerte Chirp-Frequenz weiter verzögert. Dies ist in [Fig. 15](#) durch die Diagramme der ursprünglichen Chirp-Frequenz **450**, der verzögerten Chirp-Frequenz **452** vom Verzögerungsglied **424**, des Chirp-Rücksignals **460** von der ersten Stufe, des Chirp-Rücksignals **462** von der zweiten Stufe und des Chirp-Rücksignals **464** von der dritten Stufe dargestellt. Im Mischer **422** werden separate Schwebungsfrequenzen  $f_{b1}$  470,  $f_{b2}$  472 bzw.  $f_{b3}$  474 (dargestellt in [Fig. 14](#)) zwischen der Misch-Chirp-Frequenz **452** und jedem

der von den verschiedenen Stufen in der Sagnac-Sensormatrixanordnung **410** zurückkehrenden Signale gebildet. (Siehe zum Beispiel: S. F. Collins et al, A Multiplexing Scheme For Optical Fibre Interferometric Sensors Using An FMCW Generated Carrier, OFS '92 Conference Proceedings, Seiten 209–211.) Obwohl nur drei Chirp-Rücksignale **460**, **462**, **464** in [Fig. 15](#) dargestellt sind, ist in Betracht zu ziehen, daß bis zu N Rücksignale bereitgestellt werden können, wobei N die Anzahl der Stufen in der Matrixanordnung **410** ist. Das Chirp-Rücksignal von der N-ten Stufe verursacht eine Schwebungsfrequenz  $f_{bN}$  im Mischer **422**.

**[0083]** Wie in einer graphischen Darstellung eines Ausgangsspektrums in [Fig. 14](#) dargestellt, erscheint die akustische Modulation der Signale als obere Seitenbänder **480**, **481**, **482** und untere Seitenbänder **484**, **485**, **486** der Schwebungsfrequenzen. Ein Vorteil dieses FDM-Prinzips besteht darin, daß die Anforderungen an die Matrixanordnungstaktung verglichen mit denen in einem TDM-System viel lockerer sind. Ein TDM-System benötigt eine spezifische Verzögerung zwischen benachbarten Stufen, um zu verhindern, daß Impulse einander überlappen, und dies kann ein anspruchsvolles ingenieurtechnisches Problem darstellen. Bei FDM verschieben Schwankungen der Faserlängen Schwebungsfrequenzen, aber induzieren kein Überlappen zwischen Signalen, solange diese Schwebungsfrequenzen durch das Doppelte des akustischen Detektionsbereichs getrennt sind. Letzteres wird durch Auswahl der geeigneten Chirp-Rate erreicht. Im Unterschied zu einem TDM-System senden alle Wege zu allen Zeiten Licht zurück, was zu Phasenrauschen zwischen den verschiedenen inkohärenten Signalen führen kann. Die Breitband-ASE-Lichtquelle minimiert die Stärke dieses Phasenrauschen. (Siehe zum Beispiel: 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, Seiten 1334–1351.)

#### CODEMULTIPLEXTECHNIK

**[0084]** Codemultiplextechnik (CDM) hat in letzter Zeit erhöhte Aufmerksamkeit wegen ihrer Verwendung in Sensormatrixanordnungen genossen. (Siehe zum Beispiel: A.D. Kersey et al, Code-division Multiplexed Interferometric Array With Phase Noise Reduction And Low Crosstalk, OFS '92 Conference Proceedings, Seiten 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, Seiten 342–347.) Wie für eine Sagnac-Sensormatrixanordnung **600** in [Fig. 16](#) dargestellt, wird bei CDM das Eingangslicht aus einer Superfluoreszenzfaserquelle **602** (oder einer anderen Breitbandquelle, wie zum Beispiel einer LED) in einem Intensitätsmodulator **604** gemäß einem durch einen Codegenerator **606** erzeugten Pseudo-Zufallscode moduliert. Das modulierte Licht wird über einen  $3 \times 3$ -Koppler **610** an eine interferometrische Schleife **608** übergeben und breitet sich durch eine Verzögerungsschleife **614** und eine Vielzahl von Stufen **616(i)** in einer Matrixanordnung **612** aus. In der dargestellten Ausführungsform weist jede Stufe **616(i)** einen entsprechenden Sensor **618(i)** auf. Leere Stufen (nicht dargestellt) können, falls gewünscht, ebenfalls eingeschlossen werden. Das Licht kehrt von der Schleife über den  $3 \times 3$ -Koppler **610** zurück und wird durch einen Detektor **620** detektiert. Das elektrische Ausgangssignal des Detektors **620** wird zusammen mit dem Ausgangssignal des Codegenerators **606**, dessen Ausgangssignal durch eine Verzögerung **624** für eine Dauer  $t_{cor}$  verzögert wird, an einen Korrelator **622** übergeben. Die Bit-Dauer des Pseudo-Zufallscodes ist kürzer als die Ausbreitungsverzögerung zwischen benachbarten Stufen in der Matrixanordnung **612**. Wenn  $t_{cor}$  gleich einer der Schleifen-Durchlaufzeiten  $t_j$  durch eine entsprechende Stufe **616(i)** ist, dann wird das zurückkehrende Signal von diesem Sensor in der Stufe **616(i)** zum verzögerten Pseudo-Zufallscode korreliert. Die anderen Signale, die Verzögerungen  $t_j$  haben, wobei  $|t_j| > t_{bit}$ , korrelieren zu Null. Der Korrelationsvorgang besteht zum Beispiel darin, das detektierte Signal mit 1 oder -1 zu multiplizieren (oder das Signal in einem elektronischen Gatter **630** zum nicht-invertierenden und zum invertierenden Eingang eines Differenzverstärkers **632** durchzulassen), abhängig davon, ob der Korrelationscode ein oder aus ist. Das Ausgangssignal des Differenzverstärkers auf einer Leitung **634** ist das korrelierte Ausgangssignal. Das Signal wird dann über eine Periode  $t_{avg}$  gleich der Dauer des Codes gemittelt. Die unkorrelierten Signale haben den zeitlichen Mittelwert Null, wodurch das Signal von einem Sensor **618(i)** isoliert wird.  $t_{cor}$  wird abgetastet, um die Signale von allen Sensoren nacheinander abzurufen.

**[0085]** Ein Vorteil von CDM gegenüber TDM besteht darin, daß die Verzögerung zwischen Sensoren nicht akkurat gesteuert werden muß. Jegliche Schleifenverzögerungen  $t_j$ , bei denen  $|t_j t_{j+1}| > t_{bit}$  ist, sind akzeptabel (wobei  $t_{bit}$  die Dauer eines Impulses im Code ist). Korrelieren erfordert Kenntnis der  $t_j$ , die ohne weiteres zu messen sind. Wie bei FDM begünstigt die Verwendung einer breitbandigen Quelle die Verringerung des Phasenrauschens, das aus der Addition aller Signale resultiert.

**[0086]** Die bisherige Beschreibung betraf einen neuartigen Aufbau für eine akustische Sensormatrixanordnung auf der Grundlage des Sagnac-Interferometers. Der Hauptvorteil dieses Aufbaus ist die Verwendung von Interferometern mit gemeinsamem Weg. Dadurch ist die Umwandlung von Quellen-Phasenrauschen in Inten-

sitätsrauschen nicht mehr notwendig, was bei Mach-Zehnder-Interferometersensoren vorherrscht, und ermöglicht die Verwendung einer billigen Hochleistungs-ASE-Quelle oder anderer Breitbandquellen. Es wurde gezeigt, daß das Signalverhalten der Sagnac-Sensormatrixanordnung als eine Funktion der akustischen Frequenz dem ozeanischen Grundgeräusch entspricht. Der Aufbau ermöglicht auch, den Dynamikbereich dramatisch zu vergrößern, ohne Hydrophone hinzuzufügen, indem eine zusätzliche, sehr kurze Verzögerungsschleife verwendet wird. Eine Methode zur Beseitigung polarisationsinduzierten Signalschwundes wurde oben beschrieben. Die Sagnac-Sensormatrixanordnung ermöglicht ebenfalls die Verwendung mehrerer Multiplexprinzipien in einer einfacheren Form, als mit einer herkömmlichen Mach-Zehnder-Matrixanordnung erreichbar wäre. Wegen dieser Merkmale stellt der Aufbau der Sagnac-Sensormatrixanordnung eine vielversprechende Alternative zu Sensormatrixanordnungen auf der Grundlage von Mach-Zehnder-Interferometern dar.

**[0087]** Obwohl oben in Verbindung mit bestimmten Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung beschrieben, versteht es sich, daß die Beschreibungen der Ausführungsformen zur Darstellung der Erfindung dienen und keinen einschränkenden Charakter haben.

### Patentansprüche

1. Erfassungsvorrichtung, die ein Sagnac-Interferometer verwendet, um einen Parameter zu erfassen, wobei die Erfassungsvorrichtung gekennzeichnet ist durch:
  - einen Koppler (220), der von einer optischen Quelle (222) Licht empfängt und einen ersten und zweiten Teil des Lichts in einen ersten und zweiten Koppler-Port einkoppelt;
  - eine optische Schleife, die zwischen dem ersten und dem zweiten Koppler-Port geschaltet ist, um Licht von dem ersten Koppler-Port zu dem zweiten Koppler-Port über die Schleife (214) in einer ersten Richtung sich ausbreiten zu lassen und um Licht von dem zweiten Koppler-Port zu dem ersten Koppler-Port in einer zweiten Richtung sich ausbreiten zu lassen, wobei das Licht, das sich in der ersten und zweiten Richtung ausbreitet, in dem Koppler (220) kombiniert wird;
  - eine Sensoranordnung (210), die in der optischen Schleife positioniert ist, wobei die Sensoranordnung mindestens erste und zweite Sensoren (212(1), 212(2)) umfaßt, die den Parameter erfassen, wobei die ersten und zweiten Sensoren (212(1), 212(2)) erste bzw. zweite optische Wege aufweisen, wobei der erste optische Weg durch den ersten Sensor (212(1)) optisch kürzer ist als der zweite optische Weg durch den zweiten Sensor (212(2)); und
  - einen optischen Verzögerungsabschnitt (214), der in der Schleife positioniert ist, wobei der Verzögerungsabschnitt (214) in der Schleife zwischen der ersten Sensoranordnung (210) und dem zweiten Koppler-Port positioniert ist, um zu bewirken, daß Licht, das sich von dem ersten Koppler-Port in der ersten Richtung ausbreitet, durch den optischen Verzögerungsabschnitt (214) verzögert wird, bevor es die Sensoranordnung (210) erreicht, und um zu bewirken, daß Licht, das sich von dem zweiten Koppler-Port in der zweiten Richtung ausbreitet, durch den optischen Verzögerungsabschnitt (214) verzögert wird, nachdem es durch die zweite Sensoranordnung (210) getreten ist.
2. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, wobei der optische Verzögerungsabschnitt (214) ein erster optischer Verzögerungsabschnitt (214(1)) ist, wobei die Erfassungsvorrichtung ferner einen zweiten optischen Verzögerungsabschnitt (214(2)) aufweist, wobei der zweite optische Verzögerungsabschnitt (214(2)) mit dem ersten optischen Verzögerungsabschnitt (214(1)) so gekoppelt ist, daß nur ein Teil des Lichts sich durch den zweiten optischen Verzögerungsabschnitt (214(2)) ausbreitet, wobei der zweite optische Verzögerungsabschnitt (214(2)) bewirkt, daß jeder der ersten und zweiten Sensoren Licht sich ausbreiten läßt, das lediglich durch den ersten optischen Verzögerungsabschnitt (214(1)) verzögert ist, und außerdem Licht sich ausbreiten läßt, das durch den ersten optischen Verzögerungsabschnitt (214(1)) und den zweiten optischen Verzögerungsabschnitt (214(2)) verzögert ist.
3. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, ferner mit einer Vielzahl von Verstärkern, die nahe den ersten und zweiten Sensoren (212(1), 212(2)) angeordnet sind, um Verluste zu kompensieren, die durch die Verteilung des Lichts zwischen den ersten und zweiten Sensoren (212(1), 212(2)) bewirkt wird.
4. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, wobei das Licht von der optischen Quelle (222) gepulst ist und das Licht, das durch den ersten Sensor (212(1)) moduliert wird, von dem Licht, das durch den zweiten Sensor (212(2)) moduliert wird, durch Zeitmultiplextechnik getrennt wird.
5. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, ferner mit:
  - einem Detektor (420), der Licht empfängt, das von der optischen Schleife über den Koppler (220) ausgegeben wird, und der ein Detektorausgangssignal erzeugt;



einem Generator (**406**), der eine Chirp-Frequenz erzeugt;  
 einem Intensitätsmodulator (**404**), der das Licht von der optischen Quelle (**222**, **402**) mit der Chirp-Frequenz moduliert;  
 einem elektronischen Verzögerungselement (**424**), das die Chirp-Frequenz empfängt und eine verzögerte Chirp-Frequenz erzeugt; und  
 einem Mischer (**422**), der das Detektorausgangssignal und die verzögerte Chirp-Frequenz mischt, um eine jeweilige Schwebungsfrequenz zu erzeugen, die je einem der ersten und zweiten Sensoren (**212(1)**, **212(2)**); (**418(1)**, **418(2)**) entspricht, wobei jede Schwebungsfrequenz jeweilige Seitenbänder aufweist, die dem jeweiligen Parameter entsprechen, der durch die ersten bzw. zweiten Sensoren (**212(1)**, **212(2)**); (**418(1)**, **418(2)**) detektiert wird.

6. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, ferner mit:  
 einem Detektor (**620**), der Licht empfängt, das von der optischen Schleife über den Koppler (**220**, **610**) ausgegeben wird, und der ein Detektorausgangssignal erzeugt;  
 einem Codegenerator (**606**), der einen digitalen Code erzeugt;  
 einem Intensitätsmodulator (**604**), der das Licht von der Lichtquelle (**222**, **602**) mit dem digitalen Code moduliert;  
 einen elektronischen Verzögerungselement (**624**), das dem digitalen Code eine gewählte Verzögerung auferlegt, um einen verzögerten digitalen Code zu erzeugen; und  
 einem Korrelator (**622**), der das Detektorausgangssignal und den digitalen Code korreliert, um ein demultiplexiertes Signal zu erzeugen, das dem Parameter entspricht, der durch einen gewählten der ersten und zweiten Sensoren (**212(1)**, **212(2)**); (**618(1)**, **618(2)**) erfaßt wird, wobei der gewählte der ersten und zweiten Sensoren (**212(1)**, **212(2)**); (**618(1)**, **618(2)**) durch die gewählte Verzögerung gewählt wird.

7. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch I, ferner mit einem Depolarisator (**310**) in der optischen Schleife.

8. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, ferner mit einem dritten optischen Weg (**300(1)**) in der Anordnung, wobei der dritte optische Weg (**300(1)**) Licht sich ausbreiten läßt, wobei der dritte optische Weg (**300(1)**) eine andere optische Länge hat als der erste optische Weg und der zweite optische Weg, wobei der dritte optische Weg (**300(1)**) auf ein verteiltes Aufnahmeraushen empfindlich reagiert, das mindestens in dem ersten optischen Weg gewöhnlich auftritt, wobei der dritte optische Weg (**300(1)**) ein Signal erzeugt, das auf das verteilte Aufnahmeraushen anspricht, das von einem Signal subtrahiert wird, das durch den ersten optischen Weg erzeugt wird, um den Effekt des verteilten Aufnahmeraushens aus dem Signal, das durch den ersten optischen Weg erzeugt wird, zu beseitigen.

9. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, ferner mit einem dritten und vierten optischen Weg (**300(1)**, **300(2)**) in der Anordnung, wobei der dritte und vierte optische Weg (**300(1)**, **300(2)**) Licht sich ausbreiten läßt, wobei der dritte optische Weg (**300(1)**) eine andere optische Länge hat als der erste optische Weg und der zweite optische Weg, wobei der vierte optische Weg (**300(2)**) eine andere optische Länge hat als der erste, zweite und dritte optische Weg, wobei der dritte optische Weg (**300(1)**) auf verteiltes Aufnahmeraushen empfindlich reagiert, das in dem ersten optischen Weg gewöhnlich auftritt, wobei der dritte optische Weg (**300(1)**) ein Signal erzeugt, das auf das verteilte Aufnahmeraushen anspricht, das von einem Signal subtrahiert wird, das durch den ersten optischen Weg erzeugt wird, um den Effekt des verteilten Aufnahmeraushens aus dem Signal, das durch den ersten optischen Weg erzeugt wird, zu beseitigen, wobei der vierte optische Weg (**300(2)**) auf verteiltes Aufnahmeraushen empfindlich reagiert, das in dem zweiten optischen Weg gewöhnlich auftritt, wobei der vierte optische Weg (**300(2)**) ein Signal erzeugt, das auf das verteilte Aufnahmeraushen anspricht, das von dem Signal subtrahiert wird, das durch den zweiten optischen Weg erzeugt wird, um den Effekt des verteilten Aufnahmeraushens aus dem Signal, das durch den zweiten optischen Weg erzeugt wird, zu beseitigen.

10. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, ferner mit einem ersten und zweiten Detektor (**230**, **232**), die gekoppelt sind, um Licht von dem Koppler (**220**) zu empfangen, nachdem sich das Licht in der Schleife ausgebreitet hat, wobei die Detektoren (**230**, **232**) ein erstes bzw. zweites Detektorausgangssignal erzeugen, die verarbeitet werden, um Quellenzusatzraushen zu subtrahieren.

11. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Koppler (**220**) ein  $3 \times 3$ -Koppler ist.

12. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, wobei die optische Quelle (**222**) eine Breitbandquelle ist.

13. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 12, wobei die Breitbandquelle eine Superfluoreszenzfaserquel-



le ist.

14. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, wobei das Licht, das durch den ersten Sensor **(212(1))** moduliert wird, von dem Licht, das durch den zweiten Sensor **(212(2))** moduliert wird, durch Zeitmultiplextechnik getrennt wird.

15. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, wobei:  
die optische Quelle **(222)**, der optische Koppler **(220)**, der erste optische Weg, der erste Sensor **(212(1))**, der optische Verzögerungsabschnitt **(214)** und der Detektor **(230, 232)** ein erstes Sagnac-Interferometer bilden;  
und  
die optische Quelle **(222)**, der Koppler **(220)**, der zweite optische Weg, der zweite Sensor **(212(2))**, der optische Verzögerungsabschnitt und der Detektor **(230, 232)** ein zweites Sagnac-Interferometer bilden.

16. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 15, wobei der optische Verzögerungsabschnitt **(214)** ein erster optischer Verzögerungsabschnitt **(214(1))** ist, wobei die Erfassungsvorrichtung ferner einen zweiten optischen Verzögerungsabschnitt **(214(2))** aufweist, wobei der zweite optische Verzögerungsabschnitt **(214(2))** mit dem ersten optischen Verzögerungsabschnitt **(214(1))** so gekoppelt ist, daß sich nur ein Teil des Lichts sich durch den zweiten optischen Verzögerungsabschnitt **(214(2))** ausbreitet, wobei der zweite optische Verzögerungsabschnitt **(214(2))** bewirkt, daß jeder der ersten und zweiten Sensoren **(212(1), 212(2))** Licht sich ausbreiten läßt, das lediglich durch den ersten optischen Verzögerungsabschnitt **(214(1))** verzögert ist, und außerdem Licht sich ausbreiten lassen, das sowohl durch den ersten optischen Verzögerungsabschnitt **(214(1))** als auch durch den zweiten optischen Verzögerungsabschnitt **(214(2))** verzögert ist, wobei der Detektor **(230, 232)** dadurch mindestens zwei Paar Störsignale von jedem der ersten und zweiten Sensoren **(212(1), 212(2))** empfängt.

17. Erfassungsvorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Parameter ein akustisches Signal ist.

18. Verfahren, das ein Sagnac-Interferometer verwendet, um einen Parameter zu erfassen, wobei das Verfahren gekennzeichnet ist durch:  
Ausbreitenlassen von Licht von einer Lichtquelle **(222)** durch eine Schleife, so daß sich jeweilige Teile des Lichts in einer ersten und zweiten Richtung gegeneinander in der Schleife ausbreiten;  
Durchlassen des Lichts, das sich in der Schleife ausbreitet, durch mindestens erste und zweite Sensor **(212(1), 212(2))**, die auf den zu erfassenden Parameter ansprechen, um das Licht, das durch sie durchgelassen wird, zu modulieren, wobei die ersten und zweiten Sensoren **(212(1), 212(2))** verschiedene optische Weglängen aufweisen, so daß Licht, das durch den zweiten Sensor **(212(2))** durchgelassen wird, in bezug auf Licht, das durch den ersten Sensor **(212(1))** durchgelassen wird, verzögert wird;  
Verzögern des Lichts, das sich in der Schleife in der ersten Richtung ausbreitet, bevor das Licht, das sich in der ersten Richtung ausbreitet, durch die ersten und zweiten Sensoren **(212(1), 212(2))** tritt;  
Verzögern des Lichts, das sich in der Schleife in der zweiten Richtung ausbreitet, nachdem das Licht, das sich in der zweiten Richtung ausbreitet, durch die ersten und zweiten Sensoren **(212(1), 212(2))** getreten ist; und  
Überlagern des Lichts, das sich in der ersten und zweiten Richtung ausbreitet, um ein erstes Ausgangssignal zu erzeugen, das auf Licht anspricht, das in der ersten Richtung und zweiten Richtung durch den ersten Sensor **(212(1))** tritt, und um ein zweites Ausgangssignal zu erzeugen, das auf Licht anspricht, das in der ersten und zweiten Richtung durch den zweiten Sensor **(212(2))** tritt, wobei das zweite Ausgangssignal in bezug auf das erste Ausgangssignal verzögert ist.

19. Verfahren nach Anspruch 18, wobei die Verzögerungsschritte eine erste Zeitverzögerung für einen ersten Teil des Lichts erbringen, wobei das Verfahren ferner den folgenden Schritt aufweist: Verzögern eines zweiten Teils des Lichts durch eine zweite Zeitverzögerung.

20. Verfahren nach Anspruch 18, ferner mit dem folgenden Schritt: Verstärken von Licht, das sich durch die ersten und zweiten Sensoren **(212(1), 212(2))** ausbreitet, um Verluste zu kompensieren, die durch das Verteilen des Lichts zwischen den ersten und zweiten Sensoren **(212(1), 212(2))** bewirkt werden.

21. Verfahren nach Anspruch 18, wobei das Licht von der Lichtquelle **(222)** gepulst ist und das Licht, das durch den ersten Sensor **(212(1))** moduliert wird, von dem Licht, das durch den zweiten Sensor **(212(2))** moduliert wird, durch Zeitmultiplextechnik getrennt wird.

22. Verfahren nach Anspruch 18, ferner mit den folgenden Schritten:  
Detektieren des ersten und zweiten Ausgangssignals;  
Erzeugen einer Chirp-Frequenz;

Modulieren des Lichts von der Lichtquelle (**222**) mit der Chirp-Frequenz;  
Verzögern der Chirp-Frequenz, um eine verzögerte Chirp-Frequenz zu erzeugen; und  
Mischen des Detektorausgangssignals und der verzögerten Chirp-Frequenz, um eine jeweilige Schwebungsfrequenz zu erzeugen, die je einem der ersten und zweiten Sensoren (**212(1)**, **212(2)**) entspricht, wobei jede Schwebungsfrequenz jeweilige Seitenbänder hat, die dem jeweiligen Parameter entsprechen, der durch die ersten bzw. zweiten Sensoren (**212(1)**, **212(2)**) detektiert wird.

23. Verfahren nach Anspruch 18, ferner mit den folgenden Schritten:

Detektieren des ersten und zweiten Ausgangssignals;

Erzeugen eines digitalen Codes;

Intensitätsmodulieren des Lichts von der Lichtquelle mit dem digitalen Code;

Auferlegen einer gewählten Verzögerung dem digitalen Code, um einen verzögerten digitalen Code zu erzeugen; und

Korrelieren des Detektorausgangssignals und des digitalen Codes, um ein demultiplexiertes Signal zu erzeugen, das dem Parameter entspricht, der durch einen gewählten der ersten und zweiten Sensoren (**212(1)**, **212(2)**) erfaßt wird, wobei der gewählte der ersten und zweiten Sensoren (**212(1)**, **212(2)**) durch die gewählte Verzögerung gewählt wird.

24. Verfahren nach Anspruch 18, ferner mit dem folgenden Schritt: Depolarisieren des Lichts, das sich in der Schleife ausbreitet.

25. Verfahren nach Anspruch 18, wobei der Parameter ein akustisches Signal ist.

Es folgen 16 Blatt Zeichnungen

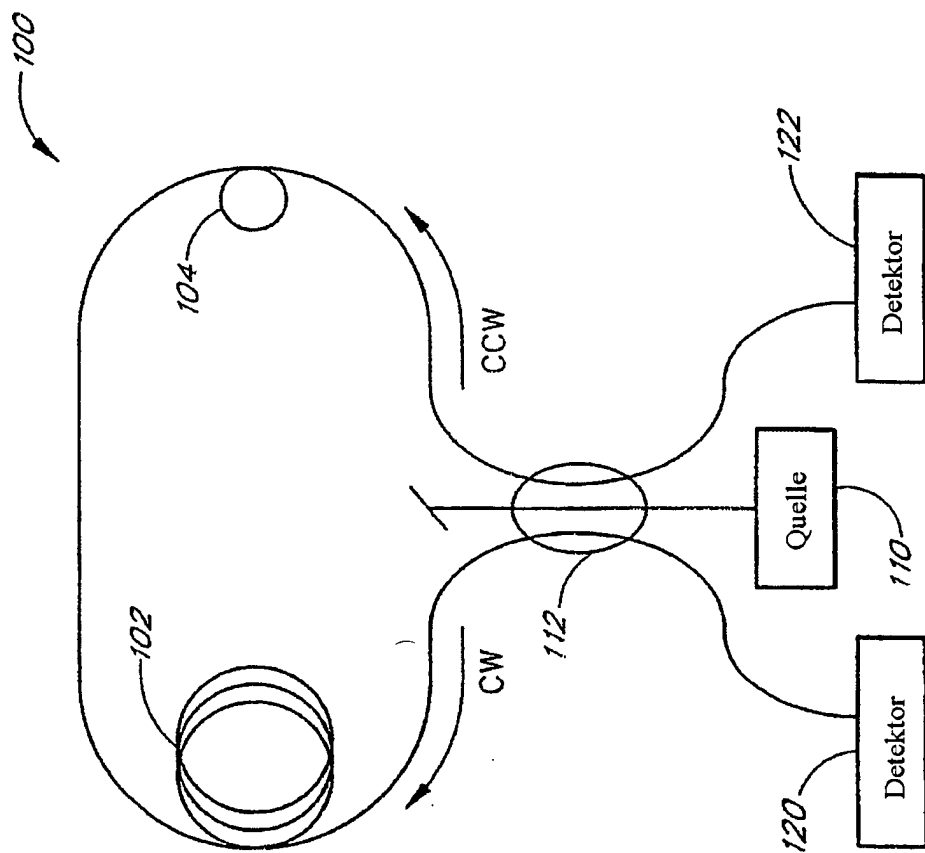


FIG. 1

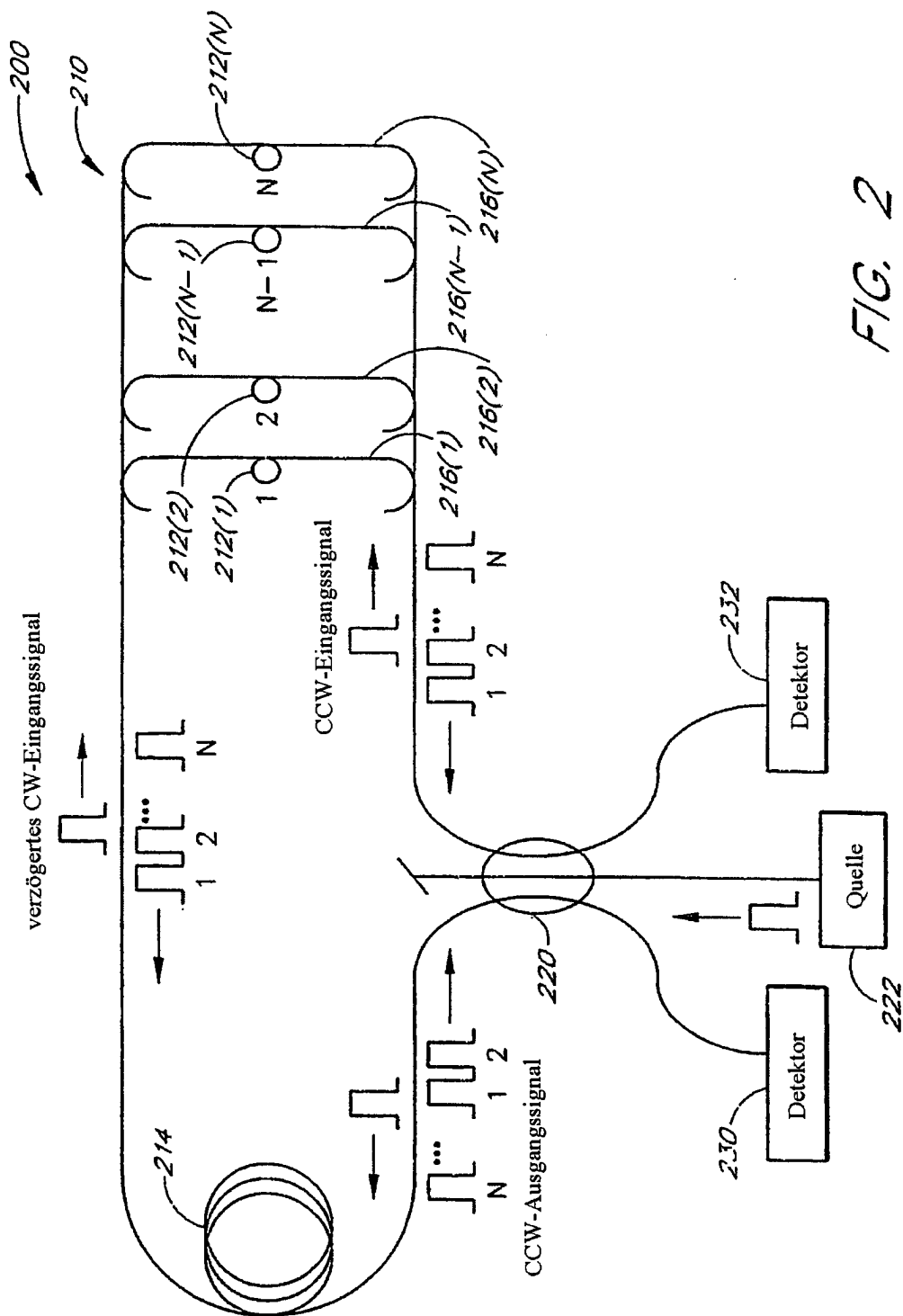


FIG. 2

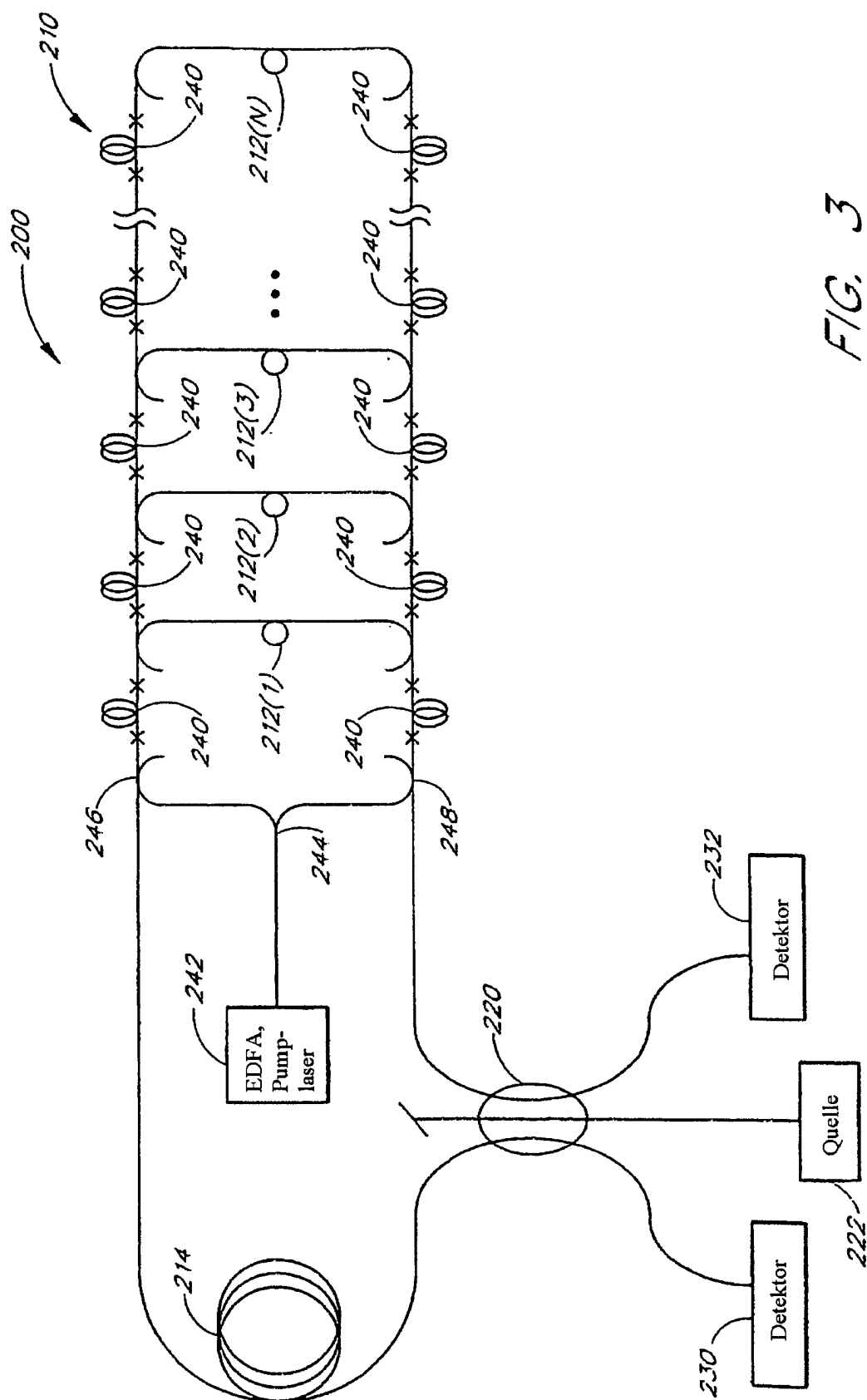


FIG. 3

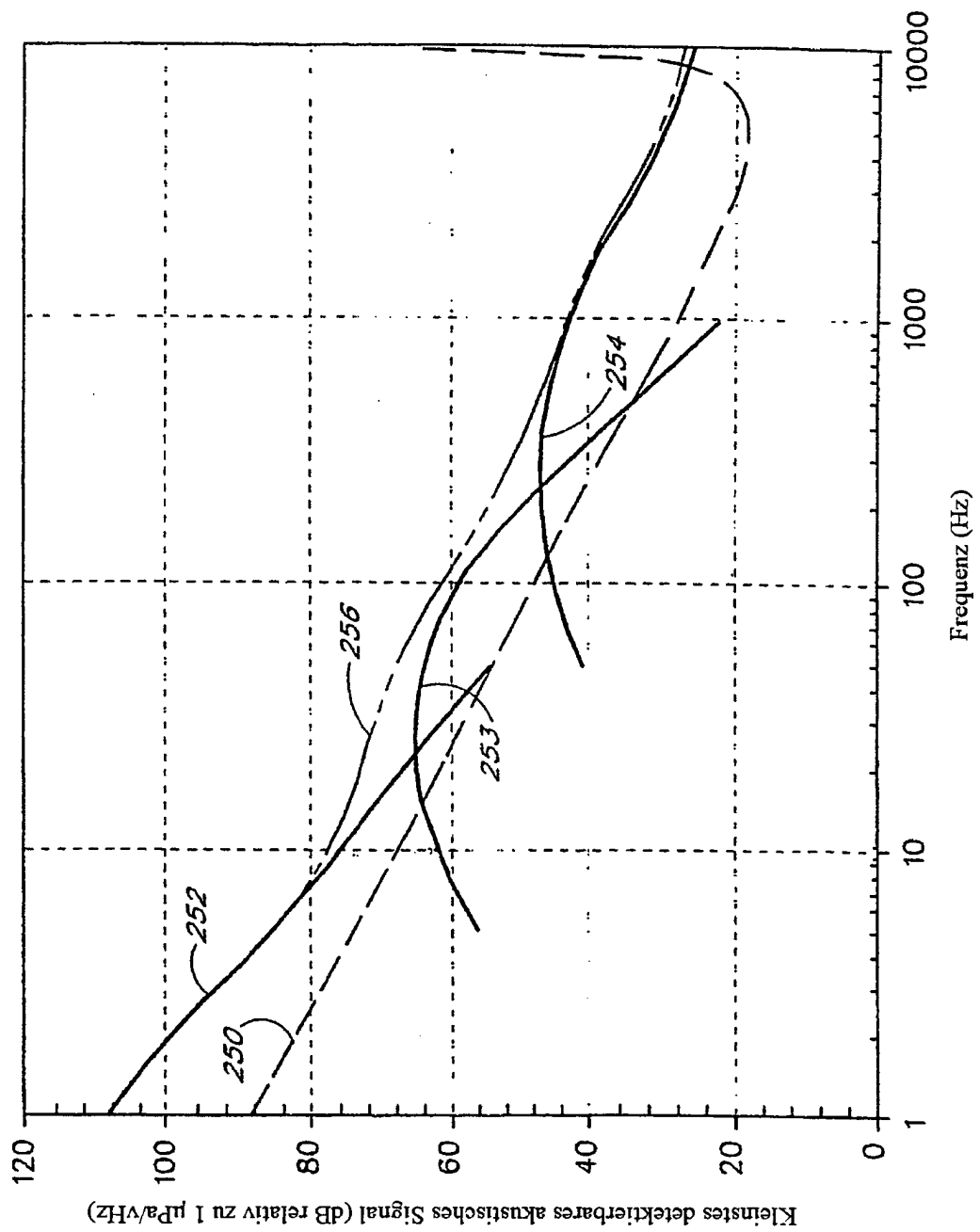


FIG. 4

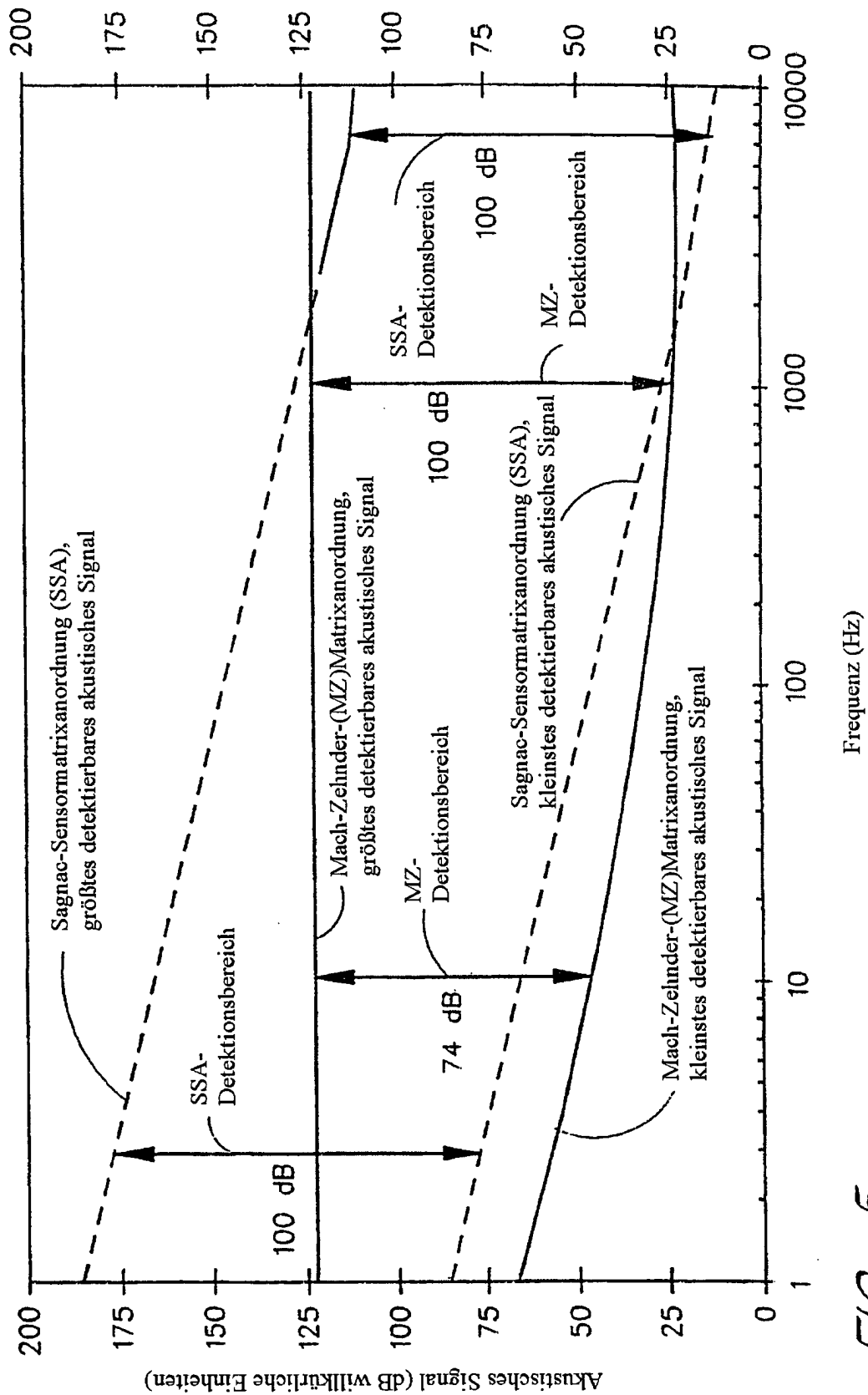


FIG. 5



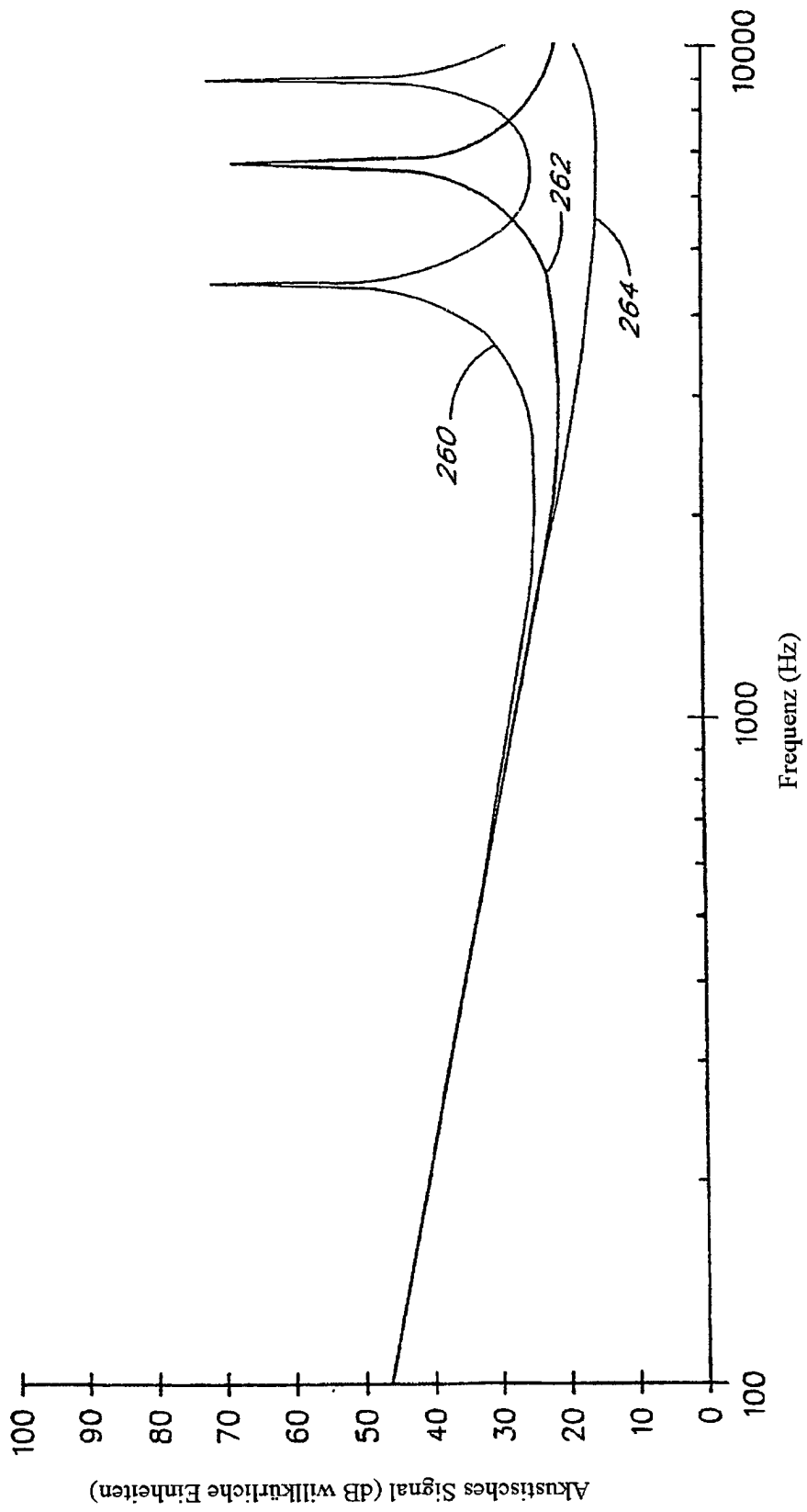


FIG. 6

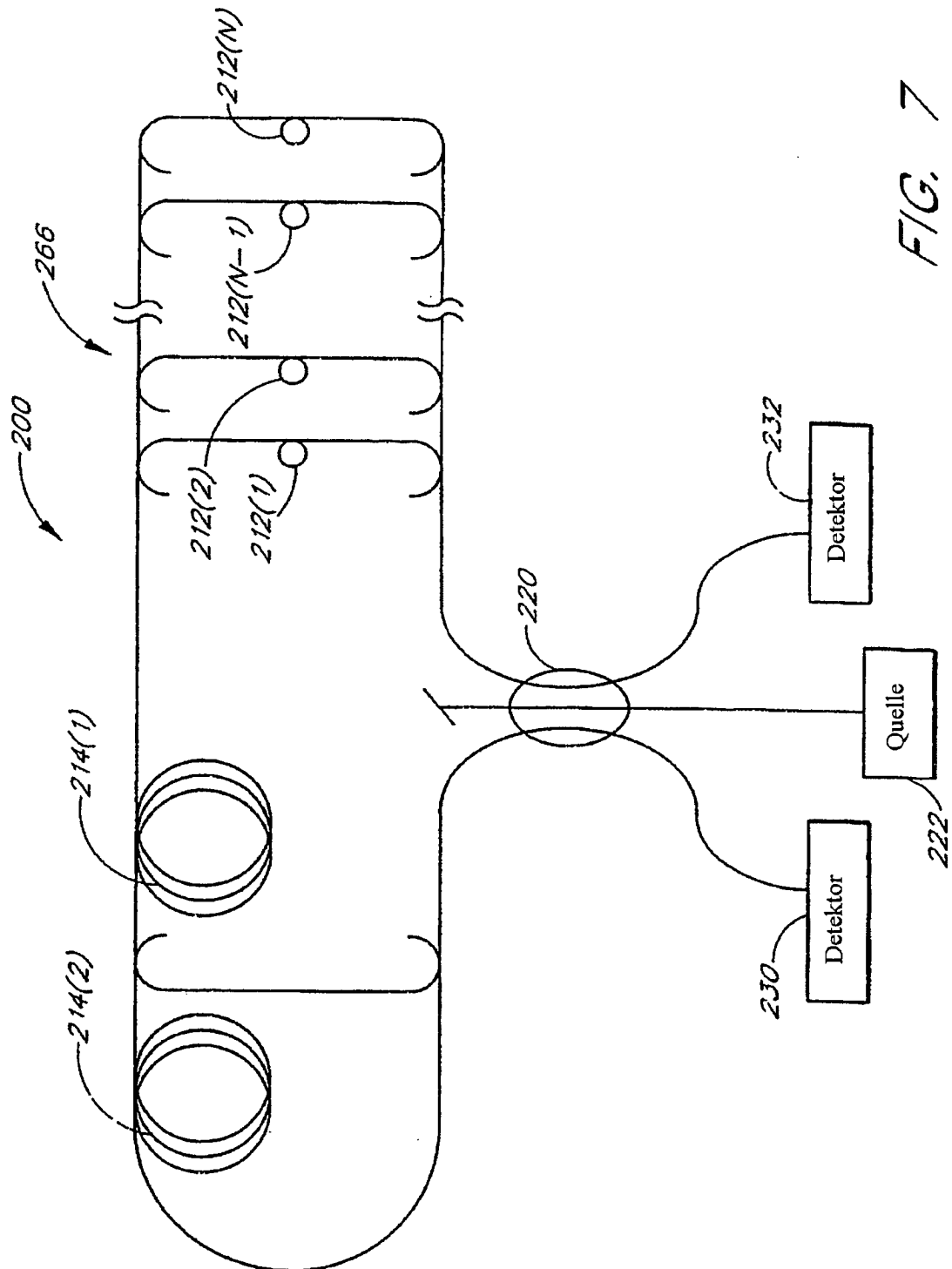


FIG. 7

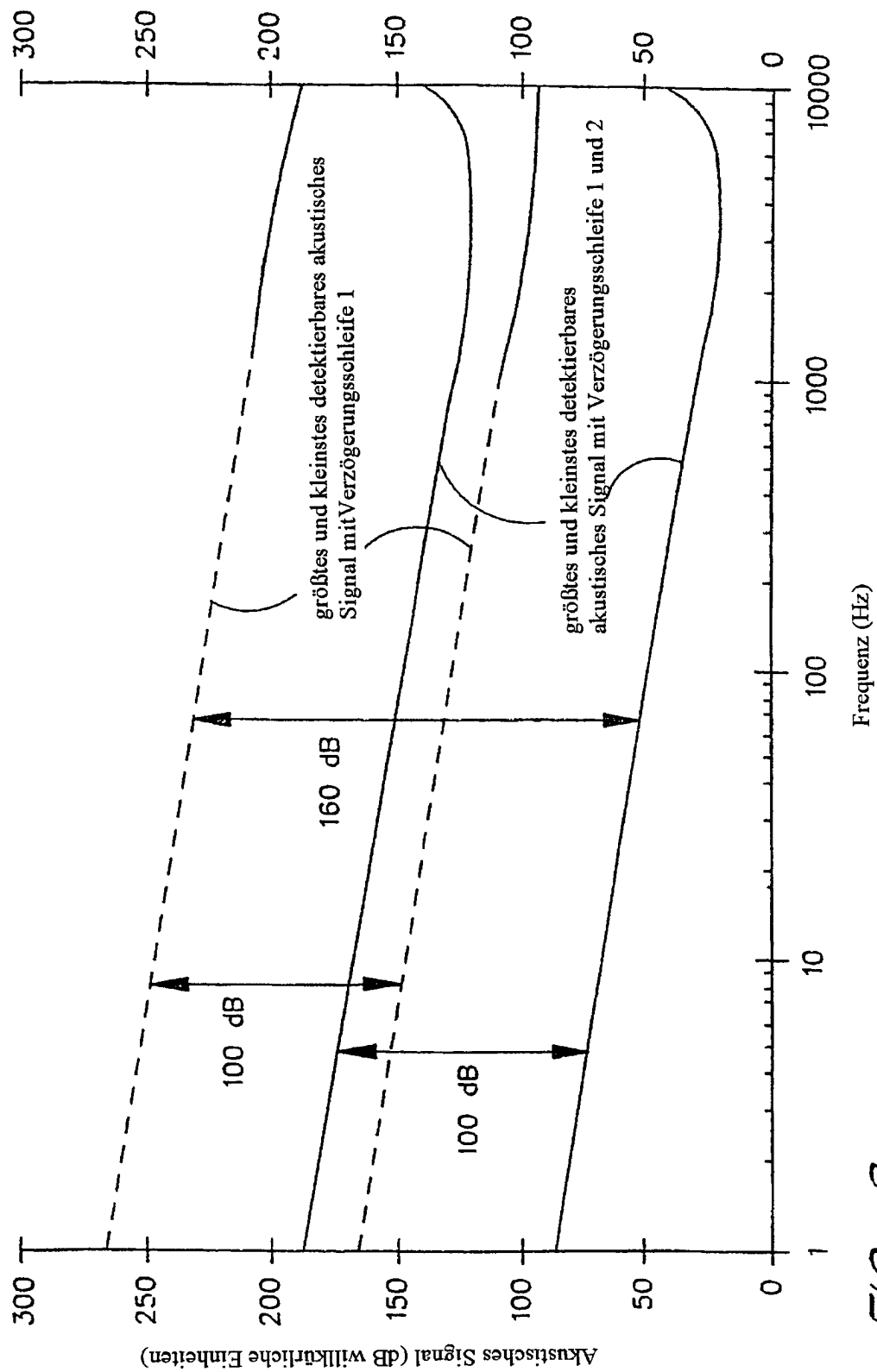
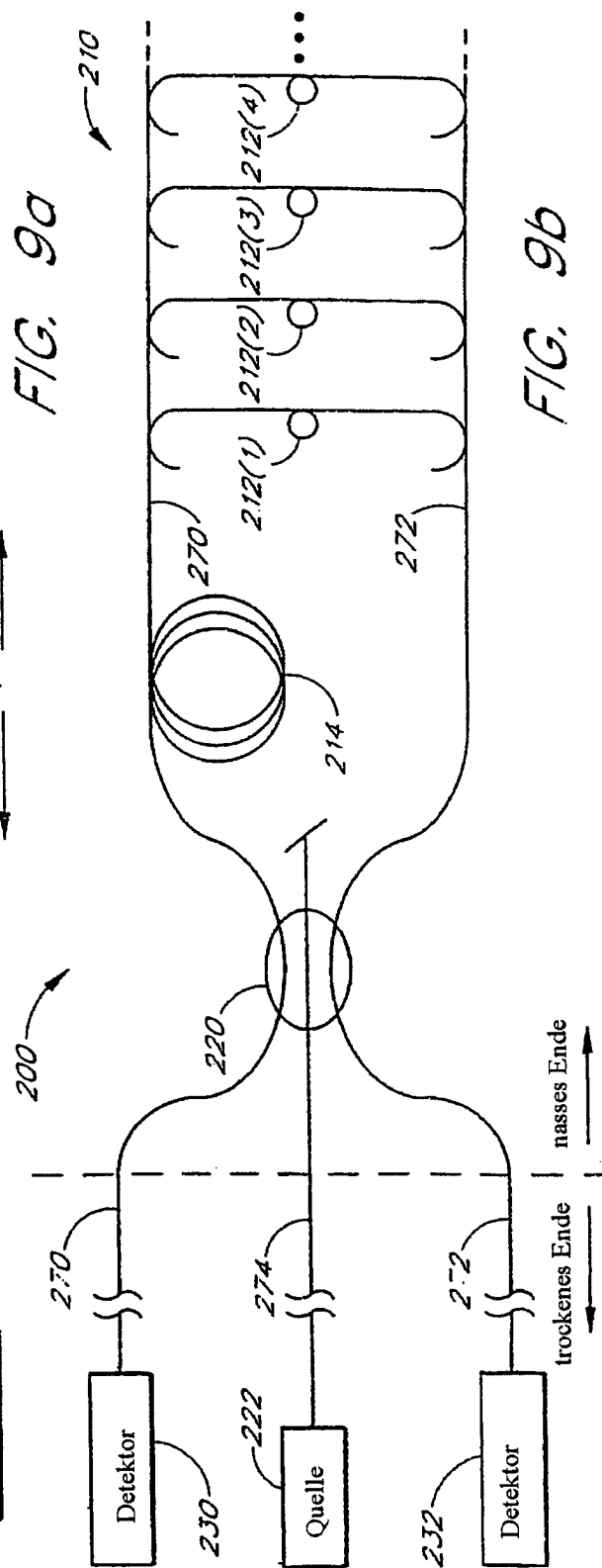
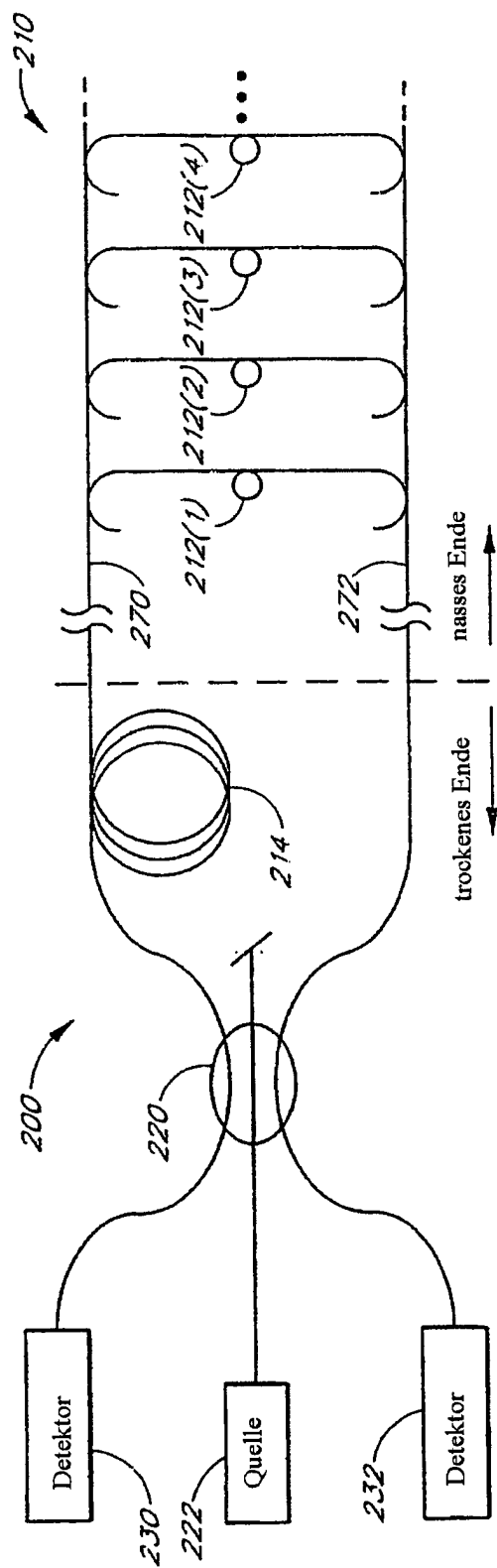


FIG. 8



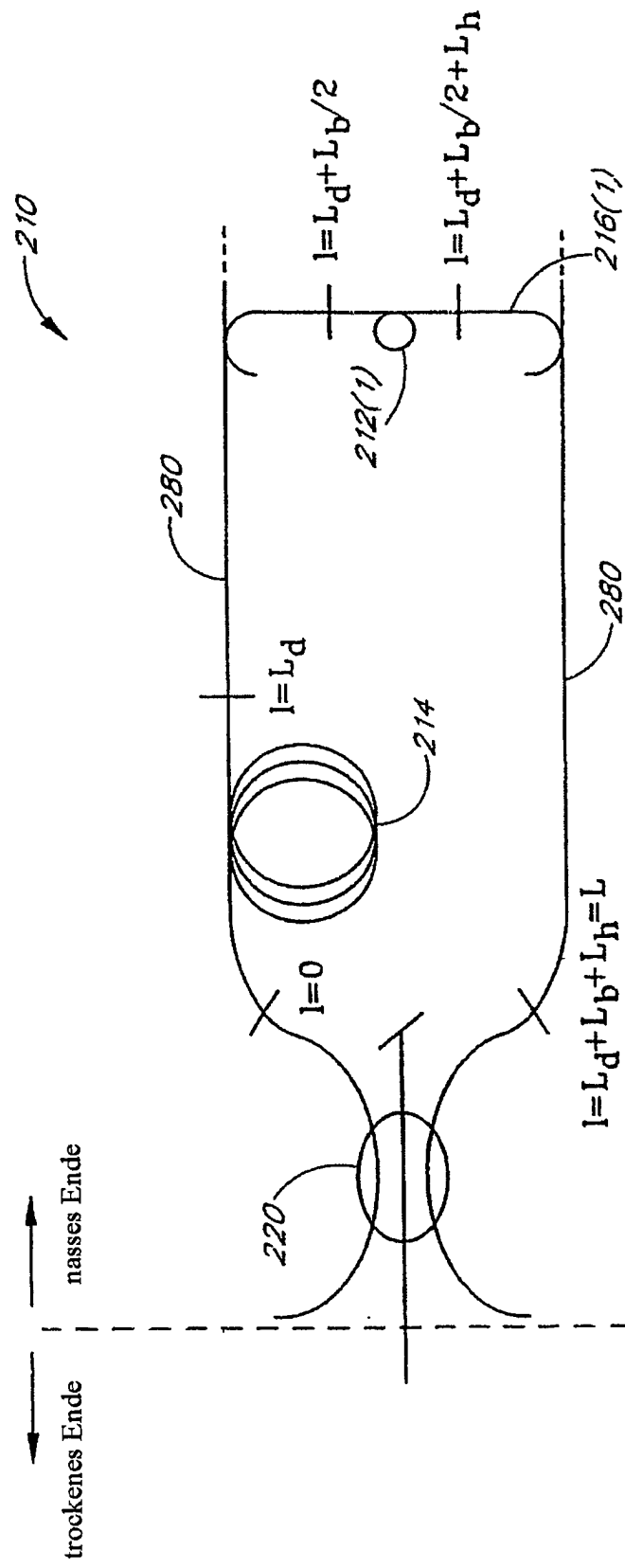


FIG. 10

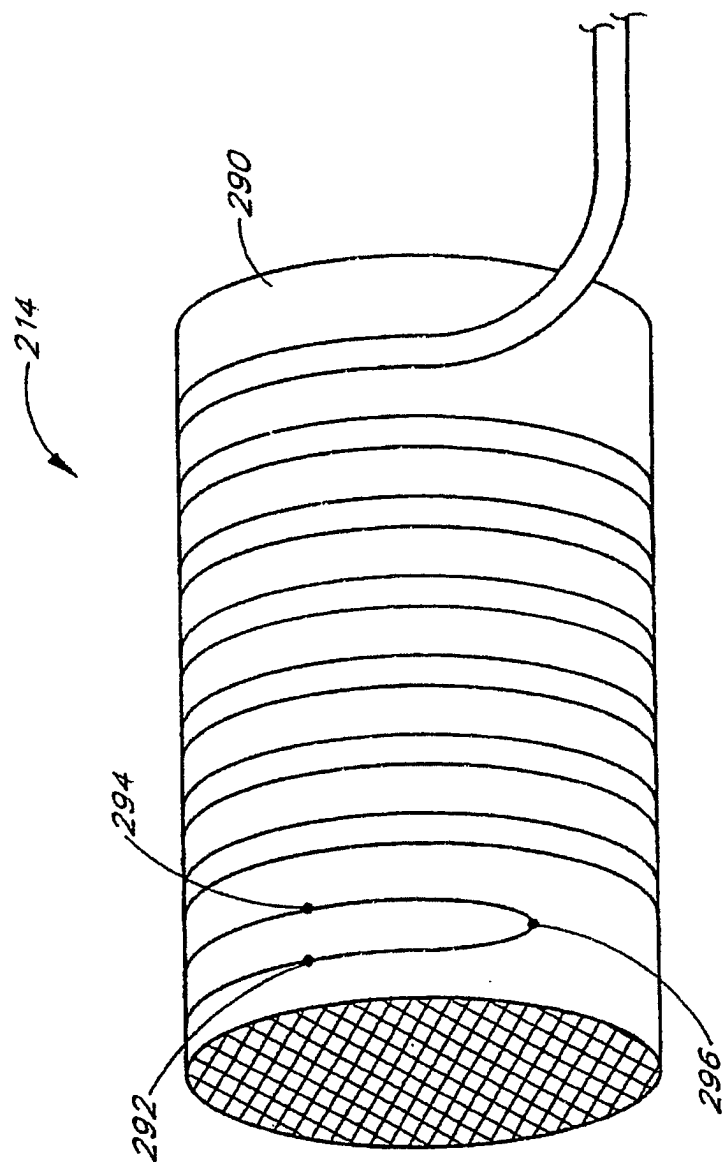


FIG. 11

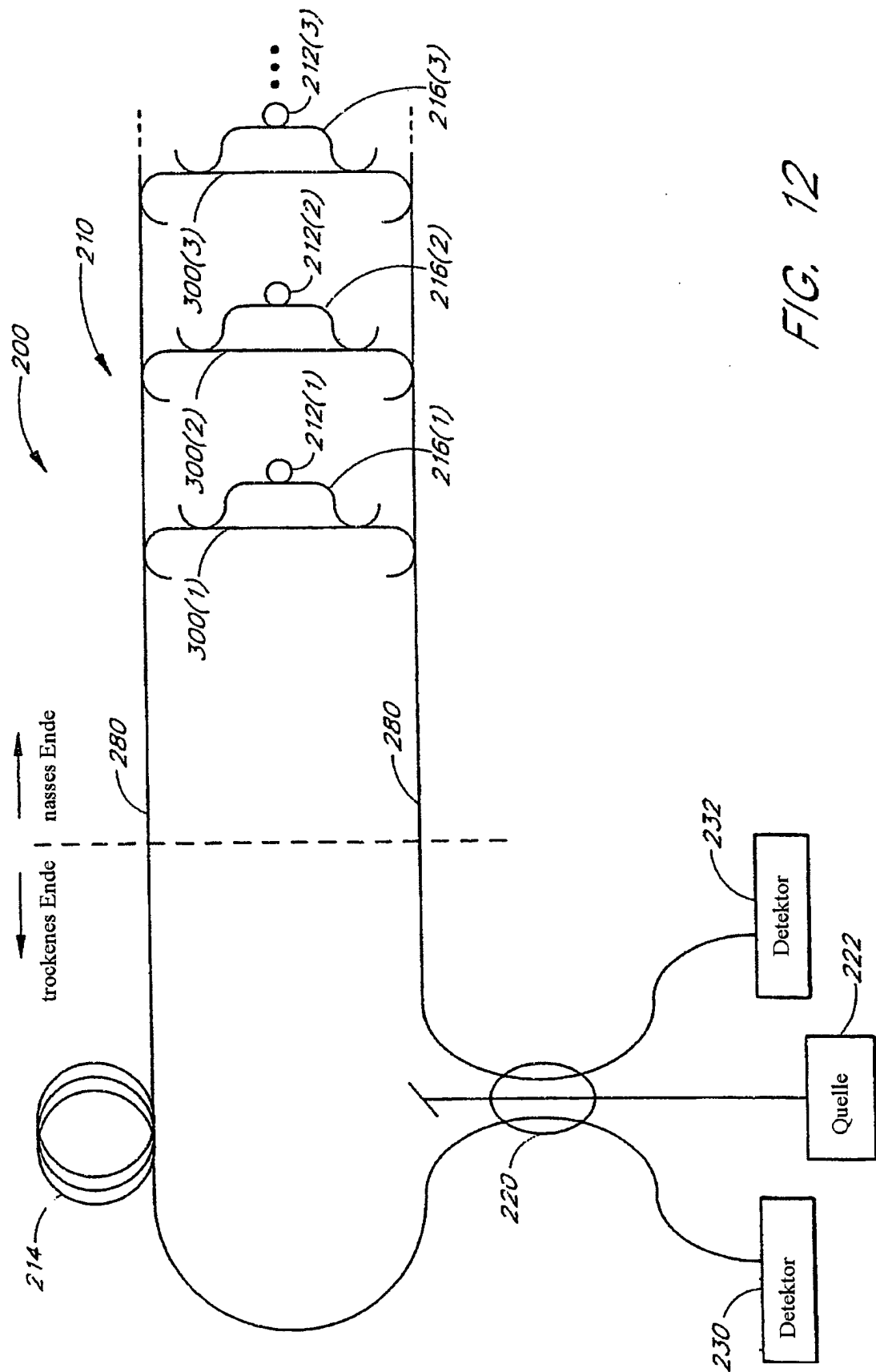


FIG. 12



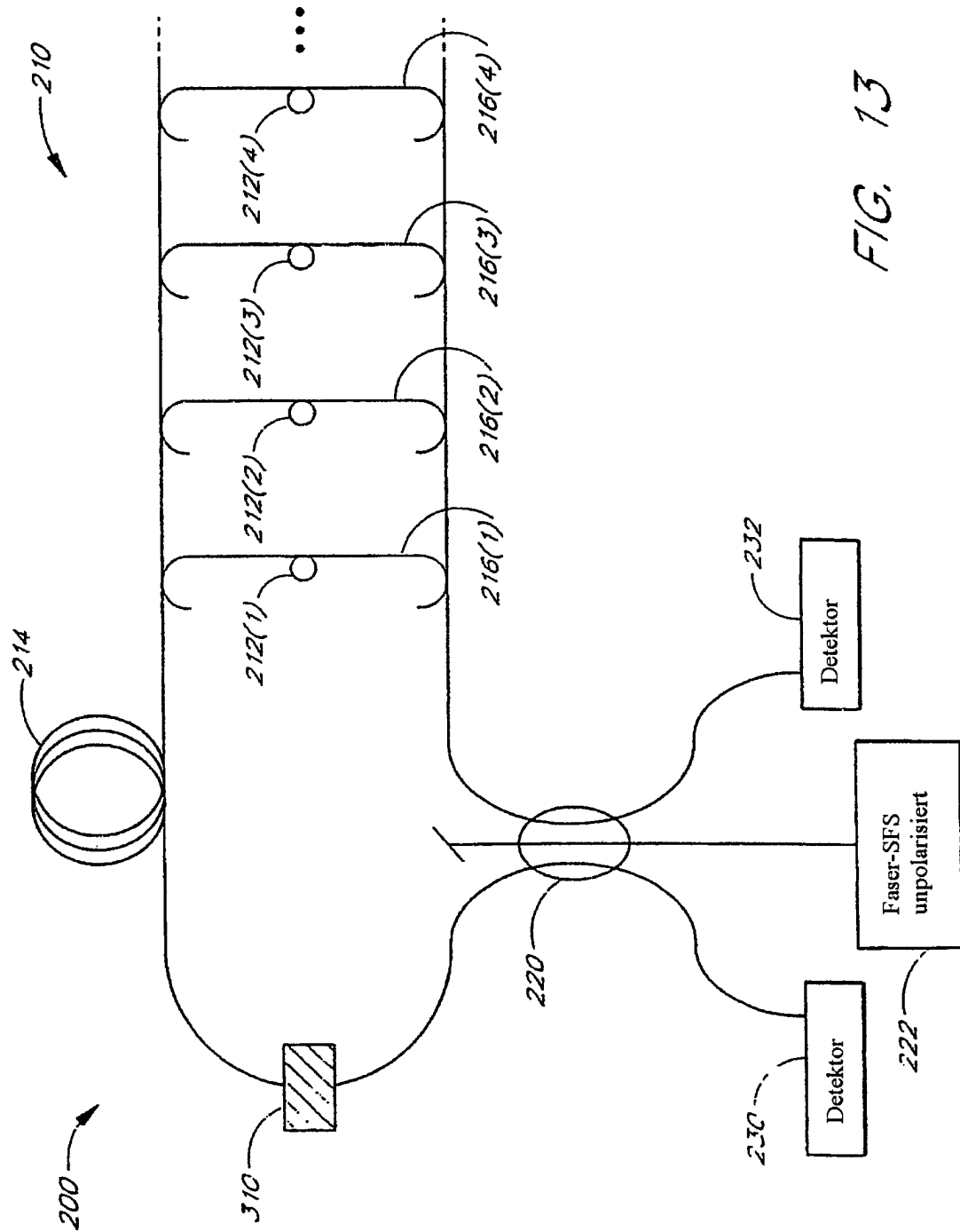


FIG. 13

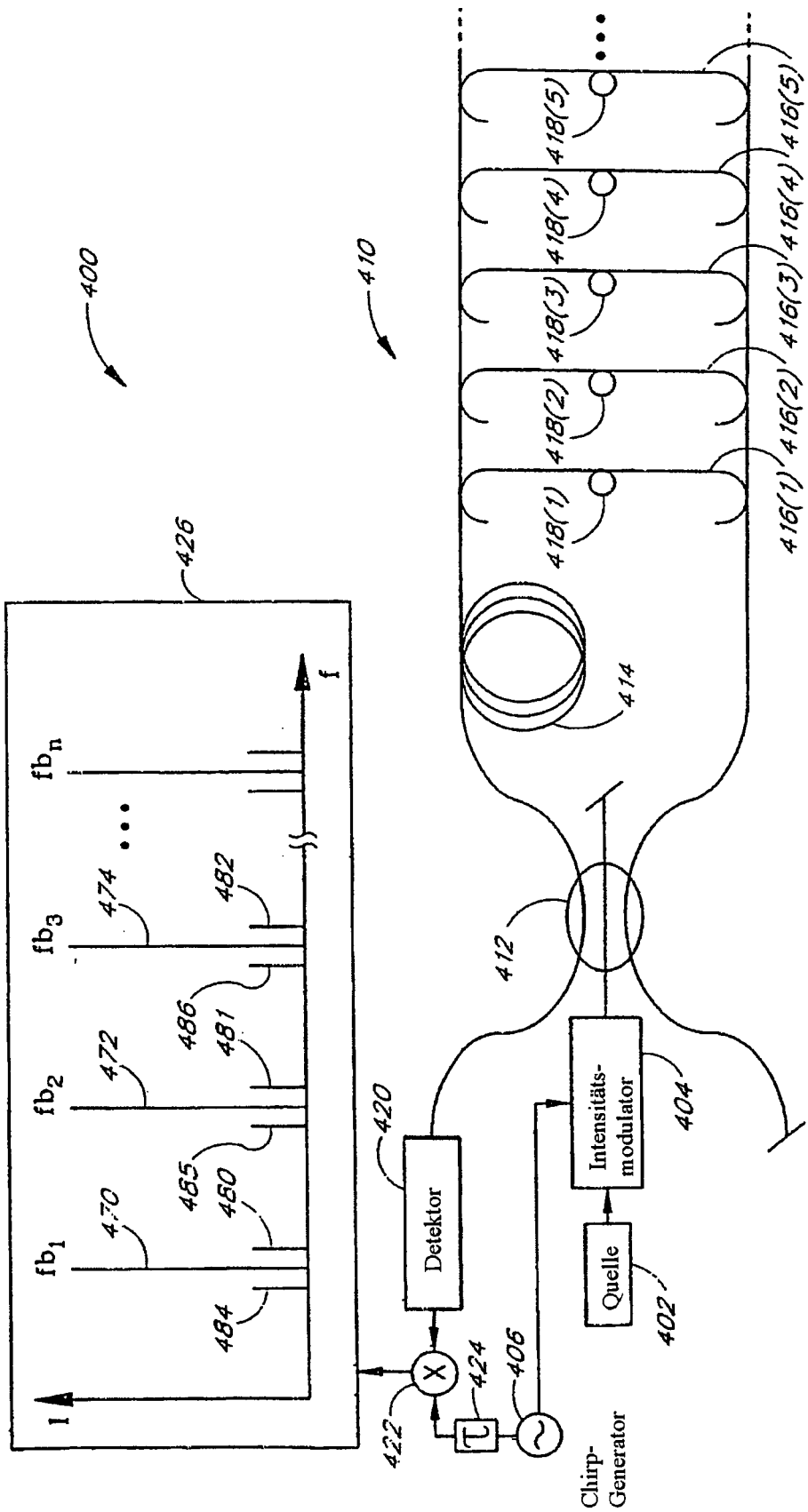


FIG. 14

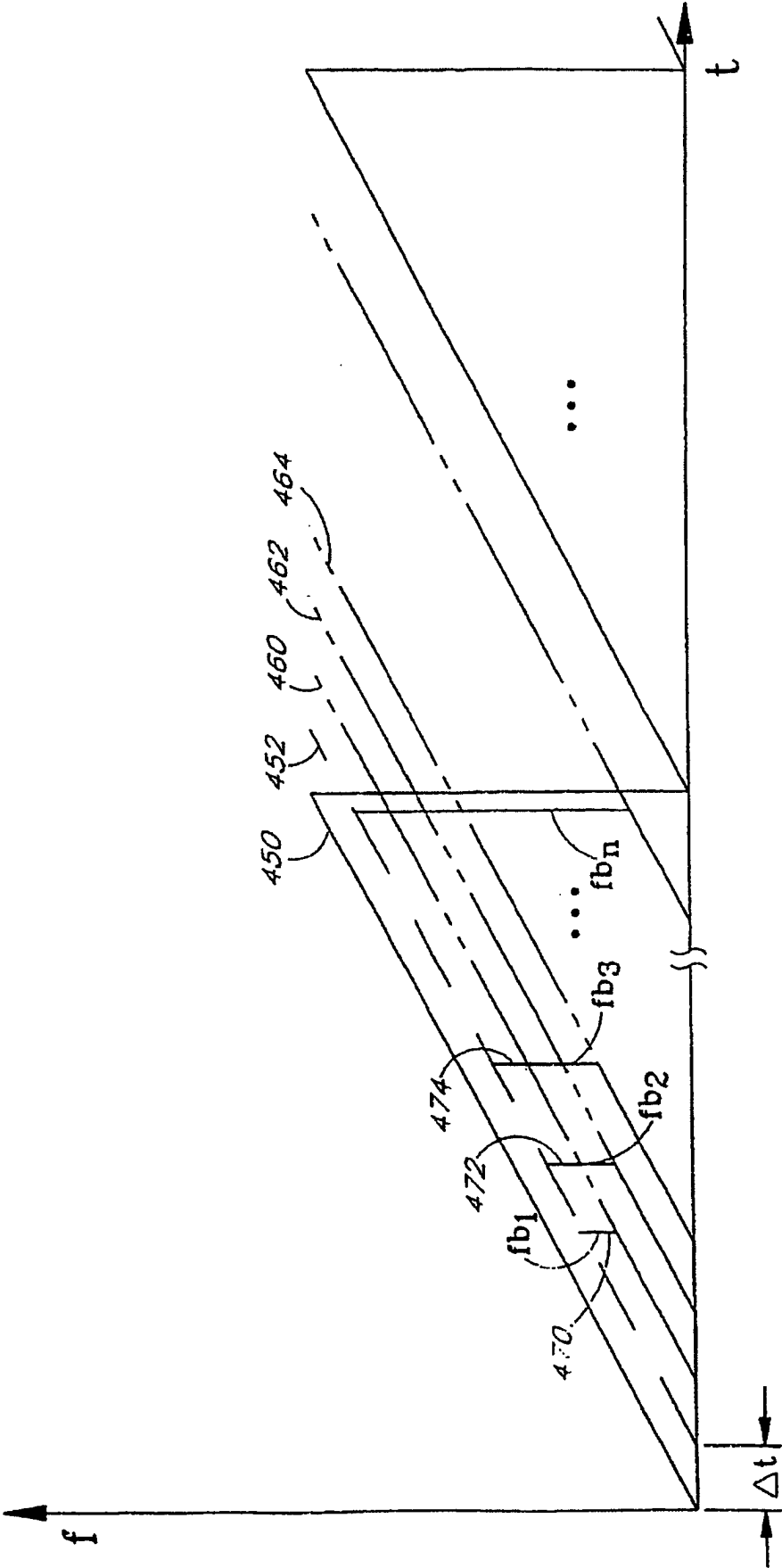


FIG. 15

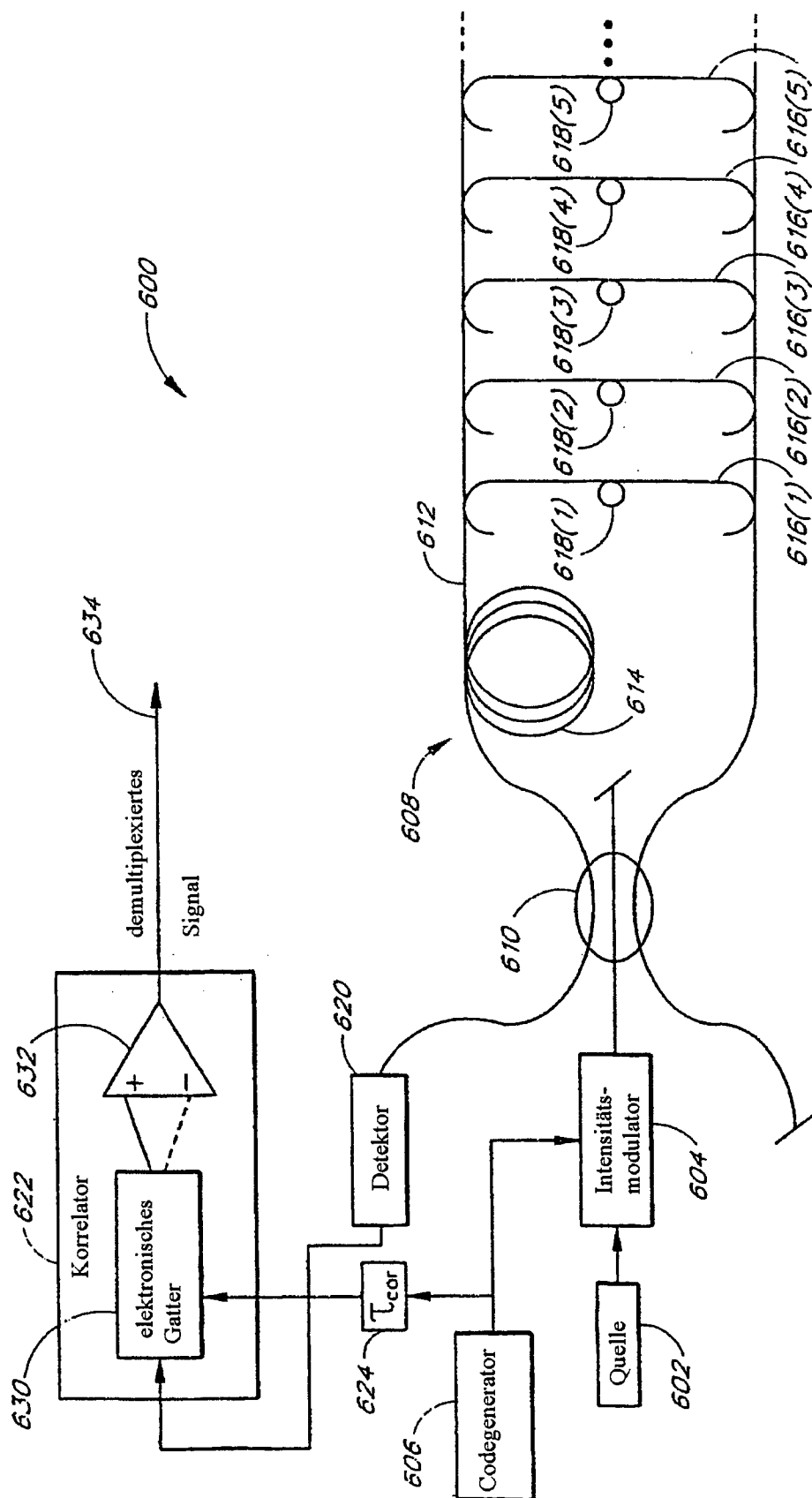


FIG. 16