



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 19 021 T2** 2005.07.28

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 133 703 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 19 021.5**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US99/23945**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 971 516.2**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 00/26682**

(86) PCT-Anmeldetag: **13.10.1999**

(87) Veröffentlichungstag  
der PCT-Anmeldung: **11.05.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **19.09.2001**

(97) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: **28.07.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **28.07.2005**

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: **G01R 33/032**  
**G01R 15/24**

(30) Unionspriorität:

**183977                      31.10.1998                      US**

(73) Patentinhaber:

**The Texas A & M University System, College  
Station, Tex., US**

(74) Vertreter:

**Dehmel & Bettenhausen, Patentanwälte, 80331  
München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,  
LI, LU, MC, NL, PT, SE**

(72) Erfinder:

**BLAKE, N., James, Scottsdale, US**

(54) Bezeichnung: **FASEROPTISCHER STROMSENSOR**

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

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft faseroptische Sensoren und insbesondere faseroptische Stromsensoren.

**[0002]** Faseroptische Stromsensoren arbeiten nach dem Prinzip des Faradayschen Effekts. In einem Draht fließender Strom induziert ein Magnetfeld das durch den Faradayschen Effekt die Polarisationssebene des Lichts dreht, das in der um den stromführenden Draht gewickelten optischen Faser fließt. Das Faradaysche Gesetz lautet

$$I = \oint \mathbf{H} d\mathbf{L}$$

worin  $I$  der elektrische Strom ist,  $H$  das Magnetfeld ist und das Integral über einen geschlossenen Pfad um den Strom genommen wird. Wenn die Sensorfaser um den stromführenden Draht mit einer ganzzahligen Anzahl von Windungen gewickelt ist und jeder Punkt in der Sensorfaser eine konstante Empfindlichkeit gegenüber dem Magnetfeld hat, dann ist die Rotation der Polarisationssebene des Lichts in der Faser von dem im Draht geführten Strom abhängig und ist unempfindlich gegenüber allen extern erzeugten Magnetfeldern, wie zum Beispiel denjenigen, die von Strömen erzeugt werden, die in benachbarten Drähten geleitet werden. Der Winkel  $\Delta\phi$ , über den die Polarisationssebene des Lichts in Anwesenheit des Magnetfelds rotiert, ist gegeben durch

$$\Delta\phi = \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L}$$

worin  $V$  die Verdet-Konstante des Faserglases ist. Die optische Sensorfaser führt das Linienintegral des Magnetfeldes entlang seinem Pfad aus, das proportional zu dem Strom in den Draht ist, wenn sich der Pfad mit sich selbst schließt. Somit ergibt sich  $\Delta\phi = VNI$ , worin  $N$  die Anzahl der um den stromführenden Draht gewickelten Windungen ist. Die Rotation des Polarisationszustands des Lichts auf Grund der Anwesenheit eines elektrischen Stromes wird durch Einstrahlen von Licht mit einem wohldefinierten linearen Polarisationszustand in den Abtastbereich und anschließendes Analysieren des Polarisationszustands des Lichts nach dem Verlassen des Abtastbereichs gemessen. Alternativ stellt  $\Delta\phi$  die übermäßige Phasenverschiebung dar, die eine zirkular polarisierte Lichtwelle erfährt, die sich in der Sensorfaser ausbreitet.

**[0003]** Diese Technik bezieht sich auf den faseroptischen In-line-Stromsensor gemäß der Offenbarung in dem US-Patent 5,644,397, erteilt am 1. Juli 1997 an den Erfinder James N. Blake mit dem Titel "Fiber Optic Interferometric Circuit and Magnetic Field Sensor". Der Leser wird an dieser Stelle auf die Lehre dieses Dokuments hingewiesen, die den naheliegendsten Stand der Technik darstellt. Faseroptische

Sensoren sind ferner in dem US-Patent Nr. 5,696,858, erteilt am 9. Dezember 1997 an den Erfinder James N. Blake mit dem Titel "Fiber Optics Apparatus and Method for Accurate Current Sensing" offenbart, welche hierin durch Bezugnahme eingeschlossen ist.

**[0004]** Die in dem vorstehend angeführten US-Patent Nr. 5,644,397 aufgezeigten Stromsensoren des In-line- und des Sagnac-Typs können im Closed-Loop-Modus unter Verwendung der direkten Digitalisierung des Output des an den Fotodetektor angelegten Vorverstärkers betrieben werden. Die Closed-Loop-Wellenform kann eine Anzahl von unterschiedlichen Techniken einschließen, die auf dem Gebiet der faseroptischen Gyroskope bekannt sind, darunter Doppelsägezahn, Serrodyne und Digitalphasen-Sägezahn. Diese Closed-Loop-Techniken verbessern bei der Anwendung auf Stromsensoren des In-line- und des Sagnac-Typs die Empfindlichkeit und die Genauigkeit des Sensors gegenüber den mit den einfacheren Open-Loop-Demodulationstechniken erzielbaren.

**[0005]** Ein Schleifenschlusschema schließt typischerweise die Digitalisierung des Output eines an das Outputsignal des Fotodetektors angelegten Vorverstärkers von einer analogen Spannung in eine digitale durch einen Analog-Digital-Wandler (A/D) in einer Schleifenschlusselectronik ein. Ein A/D-Wandler "tastet" bzw. wandelt den Vorverstärkeroutput periodisch in ein digitales Signal ab bzw. um, das das Vorverstärkersignal darstellt, typischerweise mehrmals pro Halbmodulationszyklus der Bias-Modulationsperiode des Signals von einem Bias-Modulationssignalgenerator. Der Output des A/D-Wandlers wird zwischen zwei Halbzyklen mit einem Signal verglichen, das Stromveränderungen anzeigt. Das Vorliegen einer Stromveränderung verändert ein Schleifenschluss-Wellenformsignal, das über einen Digital-Analog-Wandler (D/A) an einen Phasenmodulator angelegt wird. Das Schleifenschluss-Wellenformsignal, das zum Nachgleichen der Phase ( $\phi$ ) zwischen den sich gegenläufig ausbreitenden optischen Wellen in der Sensorschleife verwendet wird, kann ein Signal des Sägezahntyps (ein so genanntes Serrodyne-Sägezahnsignal), eine digitale Phasenstufen-Wellenform oder eine Doppelsägezahn-Wellenform sein. Alle diese werden asymmetrisch an die Interferometerschleife angelegt, um die Zeitverzögerung in der Spule zu nutzen und das Erzeugen einer Phasendifferenz (gleich und entgegengesetzt zu der durch den Strom erzeugten) zwischen den Wellen zu erlauben. Die Sägezahn- oder Serrodyne-Wellenform hat eine allmähliche Phasenneigung proportional zur Größe des elektrischen Stromes mit einem raschen Rücklauf oder einer raschen Rückstellung in der Größe eines mehrfachen einer Phasenverschiebung von  $2\pi$ . Die Doppelsägezahn-Wellenform wechselt zwischen einem Sägezahn einer ansteigen-

den Phase und demjenigen einer abfallenden Phase, wobei die Differenz der Größe der Aufwärtsneigung und der Abwärtsneigung proportional zu dem elektrischen Strom ist, und wobei alle Sägezahnstypen umkehrbar sind, um eine Umkehrung der Stromrichtung in dem Leiter anzugeben.

**[0006]** Es ist jedoch Bedarf für einen faseroptischen Stromsensor mit einer wesentlich verbesserten Empfindlichkeit entstanden. Bestimmte Anwendungen machen es erforderlich, dass kleine Leckströme in Systemen erfasst werden, die große Nennströme führen. Zu den Beispielen für derartige Anwendungen zählen Leckströme in unterirdischen Verteilerkabeln und in Batterieladesystemen. In Ladesystemen kann die Erfassung von Leckströmen verwendet werden, um einen Schutz gegen elektrischen Schlag der Bedienungsperson zu bieten. Der Stromsensor kann auch Teil einer Erdschluss-Unterbrechereinrichtung sein.

#### Kurzbeschreibung der Erfindung

**[0007]** Die vorliegende Erfindung offenbart mehrere Verfahren zur Steigerung der Empfindlichkeit von Stromsensoren des In-line- und des Sagnac-Schleifentyps.

**[0008]** In einem ersten Aspekt schafft die Erfindung einen faseroptischen Stromsensor, umfassend:  
eine Lichtquelle;  
einen Polarisator, der mit der Lichtquelle verbunden ist;  
einen ersten Polarisationskonverter, der mit dem Polarisator verbunden ist;  
eine Sensorfaserspule, die mit dem Polarisationskonverter verbunden ist;  
einen am Ende sitzenden Reflektor, der mit der Sensorfaser verbunden ist;  
einen Detektor, der mit dem Polarisator verbunden ist;  
und der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Sensorfaserspule mit einer Rotationsrate zwischen 3 und 8 ganzen Umdrehungen pro Schwebungslänge der Polarisation der Sensorfaser gedreht wird, um eine vorherbestimmte Aufrechterhaltung der zirkularen Polarisation zu gewährleisten.

**[0009]** Dies erlaubt es, einen zirkularen Zustand der Polarisation über einen langen Längenabschnitt der gebogenen Faser gut aufrechtzuerhalten, sodass die Anzahl der Windungen der Sensorfaser um den stromführenden Draht auf eine große Anzahl erhöht werden kann.

**[0010]** In einem zweiten Aspekt schafft die Erfindung einen faseroptischen Stromsensor, umfassend:  
eine Lichtquelle;  
einen Polarisator, der mit der Lichtquelle verbunden ist;

eine optische Spalteinrichtung, die mit dem Polarisator verbunden ist;  
eine Faserschleife, die an jedem Ende mit der optischen Spalteinrichtung verbunden ist;  
eine Sensorfaserspule, die innerhalb der Faserschleife liegt und eine Sensorfaser besitzt; und  
einen Detektor, der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Sensorfaser der Sensorfaserspule mit einer Rotationsrate zwischen 3 und 8 ganzen Umdrehungen pro Schwebungslänge der Polarisation der Sensorfaser gedreht wird.

**[0011]** Optional kann ein Dotierungselement, wie z. B. Terbium, zu der optischen Faser der Spule zugegeben werden, um die Verdet-Konstante der Sensorfaser zu verstärken, was wiederum die magnetische Empfindlichkeit der Spule erhöht. Dies wird vorteilhafterweise in Kombination mit der Verwendung der optimal gedrehten Faser ausgeführt.

**[0012]** Gemäß einer weiteren Modifikation kann ein Farady-Rotator verwendet werden, um den Sensor passiv vorzuspannen, und das System wird im Closed-Loop-Modus unter Verwendung eines Phasen-annullierenden Stromes, der durch die Sensorspule fließt, betrieben (zusätzlich zu dem zu messenden Strom, der auch durch die Sensorspule fließt). Dies wird vorteilhaft auch in Kombination entweder mit dem ersten oder dem zweiten Aspekt dieser Erfindung oder mit beiden Aspekten ausgeführt.

#### Kurzbeschreibung der Zeichnungen

**[0013]** [Fig. 1a](#) zeigt einen In-line-Stromsensor, der einen piezoelektrischen Doppelbrechungsmodulator und Open-Loop-Signalverarbeitung zusammen mit einer optimierten Sensorfaser verwendet.

**[0014]** [Fig. 1b](#) zeigt einen In-line-Stromsensor, der einen piezoelektrischen Doppelbrechungsmodulator und eine auf einem Phasen-annullierenden Strom basierende Closed-Loop-Signalverarbeitung zusammen mit einer optimierten Sensorfaser verwendet.

**[0015]** [Fig. 2](#) zeigt die verbleibende Leistung, die in einem zirkularen Zustand der Polarisation vorhanden ist, wenn sich das Licht entlang einer gebogenen gedrehten doppelbrechenden Faser ausbreitet.

**[0016]** [Fig. 3a](#) zeigt einen In-line-Stromsensor, der einen elektrooptischen Doppelbrechungsmodulator und eine elektronische Closed-Loop-Signalverarbeitung zusammen mit einer optimierten Sensorfaser verwendet.

**[0017]** [Fig. 3b](#) zeigt einen In-line-Stromsensor, der einen elektrooptischen Doppelbrechungsmodulator und eine auf einem Phasen-annullierenden Strom basierende Closed-Loop-Signalverarbeitung zusammen mit einer optimierten Sensorfaser verwendet.

[0018] [Fig. 4](#) zeigt einen passiven In-line-Stromsensor auf der Basis eines Farady-Rotators und eine auf einem Phasen-annullierenden Strom basierende Closed-Loop-Signalverarbeitung zusammen mit einer optimierten Sensorfaser.

[0019] [Fig. 5a](#) zeigt einen Stromsensor des Sagnac-Typs, der einen piezoelektrischen Phasenmodulator und Open-Loop-Signalverarbeitung zusammen mit einer optimierten Sensorfaser verwendet.

[0020] [Fig. 5b](#) zeigt einen Stromsensor des Sagnac-Typs, der einen piezoelektrischen Phasenmodulator und eine auf einem Phasen-annullierenden Strom basierende Closed-Loop-Signalverarbeitung zusammen mit einer optimierten Sensorfaser verwendet.

[0021] [Fig. 6a](#) zeigt einen Stromsensor des Sagnac-Typs, der einen elektrooptischen Phasenmodulator und eine elektronische Closed-Loop-Signalverarbeitung zusammen mit einer optimierten Sensorfaser verwendet.

[0022] [Fig. 6b](#) zeigt einen Stromsensor des Sagnac-Typs, der einen elektrooptischen Phasenmodulator und eine auf einem Phasen-annullierenden Strom basierende Closed-Loop-Signalverarbeitung zusammen mit einer optimierten Sensorfaser verwendet.

[0023] [Fig. 7](#) zeigt einen auf einem Faraday-Rotator basierenden passiven Stromsensor des Sagnac-Typs und eine auf einem Phasen-annullierenden Strom basierende Closed-Loop-Signalverarbeitung zusammen mit einer optimierten Sensorfaser.

#### Beschreibung der Ausführungsform

[0024] [Fig. 1a](#) zeigt eine Ausführungsform eines In-line-Stromsensors. Licht aus einer Quelle **10** wird durch einen Koppler **11** und einen Polarisator **12** zu einer 45-Grad-Spleißeinrichtung **13** weitergeleitet, wo es zu gleichen Teilen in die beiden Polarisationszustände aufgeteilt wird, die durch den Rest der optischen Schaltung aufrechterhalten bleiben. Ein piezoelektrischer Doppelbrechungsmodulator **14** moduliert differenziell die Phasen des Lichts in den beiden Polarisationszuständen. Der Modulator **14** wird durch einen Modulatorsignalgenerator **71** angesteuert, der ein elektrisches periodisches abwechselndes Signal abgibt, das entweder eine Rechteck- oder eine Sinuswelle hat. Das Licht wird dann durch eine Verzögerungsleitung **15**, durch einen Moduskonverter **16**, der die beiden linearen Polarisationszustände in zwei zirkuläre Polarisationszustände umwandelt, und durch die optimierte Sensorspule **17** weitergeleitet. Die optimierte Sensorspule **17** ist um den stromführenden Draht **18** gewickelt. Das Licht wird anschließend von dem am Ende sitzenden Reflektor **19** re-

flektiert und läuft seinen Weg durch die optische Schaltung zurück und erreicht schließlich den Detektor **20**. Ein Open-Loop-Signalprozessor **21** wandelt das erfasste Signal in einen Output **22** um, der den in dem stromführenden Draht **18** fließenden Strom angibt.

[0025] Der Sensor erreicht seine größte Empfindlichkeit, wenn die zirkulären Polarisationszustände über die gesamte Sensorspule gut aufrechterhalten bleiben. Es ist nach dem Stand der Technik bekannt, dass eine gedrehte doppelbrechende Faser einen zirkulären Polarisationszustand in einem gewissen Ausmaß bewahren kann. Für diese Erfindung ist es jedoch wesentlich, dass der zirkuläre Polarisationszustand außerordentlich gut aufrechterhalten bleibt, so dass eine sehr große Länge (mehrere hundert Meter) der Sensorfaser verwendet werden kann. Eine gerade gedrehte doppelbrechende Faser hält einen zirkulären Polarisationszustand über eine lange Distanz, aber das Erreichen dieser Eigenschaft ist wesentlich schwieriger, wenn die Faser gebogen wird, wie dies der Fall ist, wenn sie um einen stromführenden Draht gewickelt wird.

[0026] [Fig. 2](#) zeigt die Fähigkeit zur Aufrechterhaltung der zirkulären Polarisation einer gebogenen gedrehten doppelbrechenden Faser. Während das Licht sich entlang der Faser ausbreitet, schwingt das Licht in den und aus dem reinen zirkulären Polarisationszustand. Um die Leistung zu minimieren, die den gewünschten zirkulären Polarisationszustand belässt, ist es wichtig, das Verhältnis der Rotationsrate zu der fasereigenen Polarisations-schwebungslänge zu optimieren. Wenn die Rotationsrate zu schnell ist, ist die Eigen-Doppelbrechung der Faser zu gut gemittelt und die Faser wird gegenüber der durch Biegungen induzierten Doppelbrechung sehr empfindlich. Wenn die Rotationsrate zu langsam ist, ist die Eigen-Doppelbrechung nicht gut gemittelt und die Faser hält aus diesem Grund den zirkulären Polarisationszustand nicht. Eine numerische Modellbildung der Eigenschaften einer gebogenen gedrehten doppelbrechenden Faser ergibt das Ergebnis, dass für die praxisgerechten Biegeradien (2 bis 4 cm) das optimale Verhältnis der Rotationsrate zu der Eigen-Schwebungslänge zwischen 4 und 6 liegt. Die kleinste Verschlechterung der Fähigkeit zum Halten der zirkulären Polarisation wird erreicht, wenn das Verhältnis zwischen 3 und 8 liegt. Indem man eine Faser mit einer Rotationsrate in diesem Bereich wählt, kann der zirkuläre Polarisationszustand der Faser über einen langen Längenabschnitt der Faser aufrechterhalten werden, was es ermöglicht, die Empfindlichkeit des Sensors stark zu steigern.

[0027] Ein zweites Verfahren zur Steigerung der Empfindlichkeit des Sensors aus [Fig. 1](#) und 3-[Fig. 7](#) ist das Dotieren der Faser mit einem Material, das die Verdet-Konstante der Faser steigert. Terbium ist ein

Element, das diesen gewünschten Effekt hat. Das Dotieren der Faser kann in Verbindung mit dem optimalen Drehen der Faser erfolgen. Die optimierte Sensorspule **17** aus [Fig. 1a](#) ist vorteilhafterweise sowohl optimal gedreht als auch dotiert.

**[0028]** [Fig. 1b](#) zeigt eine Variation des in [Fig. 1a](#) offenbarten Sensors. In dieser Konfiguration steuert ein Closed-Loop-Signalprozessor **21'** einen Stromgenerator **23** an, der einen Phasen-annullierenden Strom **24** erzeugt. Der Phasen-annullierende Strom **24** fließt durch die optimierte Sensorspule **17** und erzeugt einen Effekt, der im wesentlichen gleich und entgegengesetzt dem Effekt ist, der von dem Strom in dem stromführenden Draht **18** erzeugt wird. Mit diesem Betriebsverfahren wird die in dem Stromsensor induzierte, nicht reziproke Phasenverschiebung sehr gering gehalten, was die Verwendung einer Sensorspule mit sehr hoher Empfindlichkeit ermöglicht, ohne dass Nichtlinearitäten auftreten, die mit dem Erfassen von großen Phasenverschiebungen verbunden sind.

**[0029]** [Fig. 3a](#) und [Fig. 3b](#) zeigen In-line-Stromsensoren ähnlich denjenigen in [Fig. 1a](#) und [Fig. 1b](#), wobei der Unterschied darin liegt, dass die piezoelektrischen Doppelbrechungsmodulatoren durch elektrooptische Modulatoren **14'** ersetzt sind. [Fig. 3a](#) zeigt eine Konfiguration, bei der ein elektronischer Closed-Loop-Signalprozessor **21''** verwendet wird, um ein Rückkopplungssignal an **14'** abzugeben. Ferner geben die in dieser Offenbarung mit den Modulatoren verbundenen Closed-Loop-Prozessoren Vorspannungssignale wie das des Generators **71** ab, wie vorstehend angemerkt. Der elektronische Closed-Loop-Signalprozessor **21''** kann ein Doppelsägezahn-, Serrodyne- oder digitales Phasenstufen-Closed-Loop-Signal abgeben. [Fig. 3b](#) zeigt eine Konfiguration ähnlich [Fig. 1b](#), wobei Strom zum Schließen der Schleife verwendet wird.

**[0030]** [Fig. 4](#) zeigt eine passive Version des Stromsensors, bei welcher ein Faraday-Rotator **30** und einen Moduskonverter **31** eine passive Vorspannung an den Sensor abgeben. Der Moduskonverter **31** ist eine Viertelwellenplatte. Die von dem Faraday-Rotator **30** abgegebene Polarisationsrotation beträgt 22,5 Grad. Die Vorspannungsphasenverschiebung zu dem Interferenzmuster beträgt das Vierfache der von dem Faraday-Rotator abgegebenen Rotation. Der Phasen-annullierende Strom **24** von dem Stromgenerator **23**, der in dieser Konfiguration durch den Closed-Loop-Signalprozessor **21'''** gesteuert wird, kann für hohe Frequenzen exakter sein, die für die modulierten Architekturen aus [Fig. 1](#) und [3](#) erzielbar sind, da die Bandbreite des passiven Sensors wesentlich größer ist.

**[0031]** [Fig. 5a](#) zeigt einen Sagnac-Loop-Stromsensor. Licht von einer Quelle **50** wird durch einen Kopp-

ler **51** und einen Polarisator **52** zu einem Schleifenkoppler **53** weitergeleitet, wo es geteilt und in zwei Richtungen um die Faserschleife geschickt wird. Ein piezoelektrischer Phasenmodulator **54** gibt eine dynamische Phasenvorspannung ab. Modulatoren **54** und **70** der erfindungsgemäß aufgezeigten Sagnac-Sensoren modulieren die Phasendifferenz der gegenläufigen Wellen eines Polarisationszustands. Das diese Modulatoren ansteuernde Signal ist ein Signal wie das des Generators **71**. Moduskonverter **55** und **55'** wandeln das Licht in einen zirkularen Polarisationszustand für den Durchtritt durch die optimierte Sensorspule **56** um. Die Optimierungsbedingung für die gebogene gedrehte Faser ist für den Sagnac-Loop-Stromsensor gleich wie für den In-line-Sensor. Die kleinste Abweichung des Polarisationszustands des Lichts von dem zirkularen wird erreicht, wenn das Verhältnis der Rotationsrate zu der Eigen-Polarisationsschwebungslänge zwischen 3 und 8 liegt. Wenn diese Bedingung erreicht wird, kann eine sehr große Anzahl von Windungen der Sensorfaser um einen stromführenden Draht **57** gewickelt werden. Das Licht kehrt durch die optische Schaltung zu dem Detektor **58** zurück. Ein Open-Loop-Signalprozessor **59** demoduliert das Signal und gibt einen Output **60** ab, der den in dem stromführenden Draht **57** fließenden Strom anzeigt.

**[0032]** [Fig. 5b](#) zeigt eine Variation von [Fig. 5a](#), bei welcher die Signalverarbeitung nun durch einen Closed-Loop-Signalprozessor **61** durchgeführt wird, der einen Stromgenerator **62** ansteuert, der wiederum einen Phasen-annullierenden Strom **63** erzeugt. Der Phasen-annullierende Strom **63** löscht im wesentlichen die von dem Strom in dem stromführenden Draht **57** erzeugte nicht reziproke Phasenverschiebung und erlaubt die Verwendung einer Sensorspule mit sehr hoher Empfindlichkeit.

**[0033]** [Fig. 6a](#) zeigt eine weitere Version des Sagnac-Loop-Stromsensors, bei der die Polarisations-, Schleifenteiler- und Phasenmodulationsfunktion in einem einzelnen integrierten Optik-Multifunktionschip **70** kombiniert wurden. Ein elektronischer Closed-Loop-Signalprozessor **64** gibt ein elektronisches Closed-Loop-Signal an den Phasenmodulator ab. Dieses Signal kann Doppelsägezahn, Serrodyne oder digitale Phasenstufe sein. [Fig. 6b](#) zeigt eine Version des Stromsensors, bei der die Signalverarbeitung durch einen Closed-Loop-Signalprozessor **64'** vollzogen wird, der einen Stromgenerator **62** ansteuert, der wiederum einen Phasen-annullierenden Strom **63** abgibt.

**[0034]** [Fig. 7](#) zeigt einen Sagnac-Loop-Stromsensor, bei dem die Phasenvorspannung passiv durch einen Faraday-Rotator **81** abgegeben wird, der von Moduskonvertern **80** und **80'** umgeben ist. Die Moduskonverter **80** und **80'** sind vorteilhafterweise Viertelwellenplatten, sodass sie lineare Polarisation in

zirkuläre Polarisierung umwandeln. Für diesen passiven Sensor kann die Schleifenschluss-Bandbreite des Phasen-annullierenden Stroms **63** (von dem Generator **62**, der von dem Prozessor **64** gesteuert wird) wesentlich größer sein als in den dynamisch vorgespannten Versionen des Sensors. Dies erlaubt eine größere Messgenauigkeit bei höheren Frequenzen.

**[0035]** Es gibt andere Varianten und Ausführungsformen, die die vorliegende Erfindung einschließen, die in den beigefügten Patentansprüchen definiert ist.

### Patentansprüche

1. Ein faseroptischer Stromsensor, umfassend:

- eine Lichtquelle (**10**);
- einen Polarisator (**12**), der mit der Lichtquelle (**10**) verbunden ist;
- einen ersten Polarisationskonverter (**13**), der mit dem Polarisator (**12**) verbunden ist;
- eine Sensorfaserspule (**17**), die mit dem Polarisationskonverter (**13**) verbunden ist;
- einen am Ende sitzenden Reflektor (**19**), der mit der Sensorfaser verbunden ist;
- einen Detektor (**20**), der mit dem Polarisator (**12**) verbunden ist;

und der **dadurch gekennzeichnet** ist, dass die Sensorfaserspule (**17**) mit einer Rotationsrate zwischen 3 und 8 ganzen Umdrehungen pro Schwebungslänge der Polarisation der Sensorfaser gedreht wird, um eine vorherbestimmte Aufrechterhaltung der zirkulären Polarisation zu gewährleisten.

2. Der Sensor gemäß Anspruch 1, weiterhin umfassend einen Faraday-Rotator (**30**), der zwischen dem Polarisator (**12**) und dem ersten Polarisationskonverter (**13**) platziert ist.

3. Der Sensor gemäß Anspruch 2, weiterhin umfassend einen zweiten Polarisationskonverter, der zwischen dem Faraday-Rotator (**30**) und dem ersten Polarisationskonverter (**13**) platziert ist.

4. Der Sensor gemäß Anspruch 3, wobei der zweite Polarisationskonverter eine Viertelwellenplatte umfasst.

5. Der Sensor gemäß Anspruch 1, weiterhin umfassend einen piezoelektrischen Doppelbrechungsmodulator (**14**), der zwischen dem Polarisator (**12**) und dem Polarisationskonverter (**13**) platziert ist.

6. Der Sensor gemäß Anspruch 1, weiterhin umfassend einen elektrooptischen Doppelbrechungsmodulator (**14'**), der zwischen dem Polarisator (**12**) und dem Polarisationskonverter (**13**) platziert ist.

7. Der Sensor gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der erste Polarisationskonverter

(**13**) eine Viertelwellenplatte umfasst.

8. Der Sensor gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, weiterhin umfassend eine Vorrichtung (**21**, **23**) für die Generierung eines Sekundärstroms, der durch die Sensorfaserspule (**17**) fließt, um im Wesentlichen den Output des Sensors zu annullieren.

9. Ein faseroptischer Stromsensor, umfassend:

- eine Lichtquelle (**10**);
- einen Polarisator (**12**), der mit der Lichtquelle (**10**) verbunden ist;
- einen Faraday-Rotator (**30**), der mit dem Polarisator (**12**) verbunden ist;
- eine erste Viertelwellenplatte (**13**), die mit dem Faraday-Rotator (**30**) verbunden ist;
- eine Polarisations-aufrechterhaltende Faser, die mit der ersten Viertelwellenplatte (**13**) verbunden ist;
- eine zweite Viertelwellenplatte (**13**), die mit der Polarisations-aufrechterhaltenden Faser verbunden ist;
- eine Sensorfaser (**17**), die im Wesentlichen die zirkulären Zustände der Polarisation bewahrt und die mit der zweiten Viertelwellenplatte verbunden ist;
- ein reflektierendes Ende (**19**), das mit der Sensorfaser (**17**) verbunden ist;
- einen Photodetektor (**20**), der mit dem Polarisator (**12**) verbunden ist und der einen Output besitzt; und der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Sensorfaser (**17**) mit einer Rotationsrate zwischen 3 und 8 ganzen Umdrehungen pro Schwebungslänge der Polarisation der Sensorfaser gedreht wird.

10. Der Sensor gemäß Anspruch 9, wobei die Sensorfaser (**17**) eine Sensorfaserspule (**17**) um einen Strom leitenden Draht ausbildet.

11. Der Sensor gemäß Anspruch 9 oder 10, weiterhin umfassend eine Vorrichtung (**21**, **23**) für die Generierung eines Sekundärstroms, der um die Sensorspule herum fließt und der im Wesentlichen den Output des Photodetektors annulliert.

12. Ein faseroptischer Stromsensor, umfassend:

- eine Lichtquelle (**10**);
- einen Polarisator (**12**), der mit der Lichtquelle (**10**) verbunden ist;
- eine optische Spalteinrichtung (**8**), der mit dem Polarisator verbunden ist;
- eine Faserschleife, die an jedem Ende mit der optischen Spalteinrichtung (**53**) verbunden ist;
- eine Sensorfaserspule (**56**), die innerhalb der Faserschleife liegt und eine Sensorfaser besitzt;
- einen Detektor (**58**), der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Sensorfaser der Sensorfaserspule (**56**) mit einer Rotationsrate zwischen 3 und 8 ganzen Umdrehungen pro Schwebungslänge der Polarisation der Sensorfaser gedreht wird.

13. Der faseroptische Stromsensor gemäß Anspruch 12, in dem ein Faraday-Rotator (**81**) zwischen

der optischen Spalteinrichtung (53) und einem Ende der Faserschleife (56) platziert ist.

14. Der Sensor gemäß Anspruch 12, weiterhin umfassend einen Faraday-Rotator (30), der innerhalb der Faserschleife liegt.

15. Der Sensor gemäß Anspruch 12, weiterhin umfassend einen piezoelektrischen Phasenmodulator (14), der innerhalb der Faserschleife liegt.

16. Der Sensor gemäß Anspruch 12, weiterhin umfassend einen elektrooptischen Phasenmodulator (14'), der innerhalb der Faserschleife liegt.

17. Der Sensor gemäß einem der Ansprüche 12 bis 16, weiterhin umfassend eine Vorrichtung (21, 23) für die Generierung eines Sekundärstroms, der um die Sensorfaserspule (56) herum fließt und der im Wesentlichen den Output des Detektors annulliert.

18. Der faseroptische Stromsensor gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, in dem die Sensorfaserspule (17) ein Dotierungselement besitzt, welches das Rotationsvermögen (Yerdet's constant) der Sensorfaser verstärkt.

19. Der faseroptische Stromsensor gemäß Anspruch 18, wobei das Dotierungselement Terbium ist.

Es folgen 11 Blatt Zeichnungen

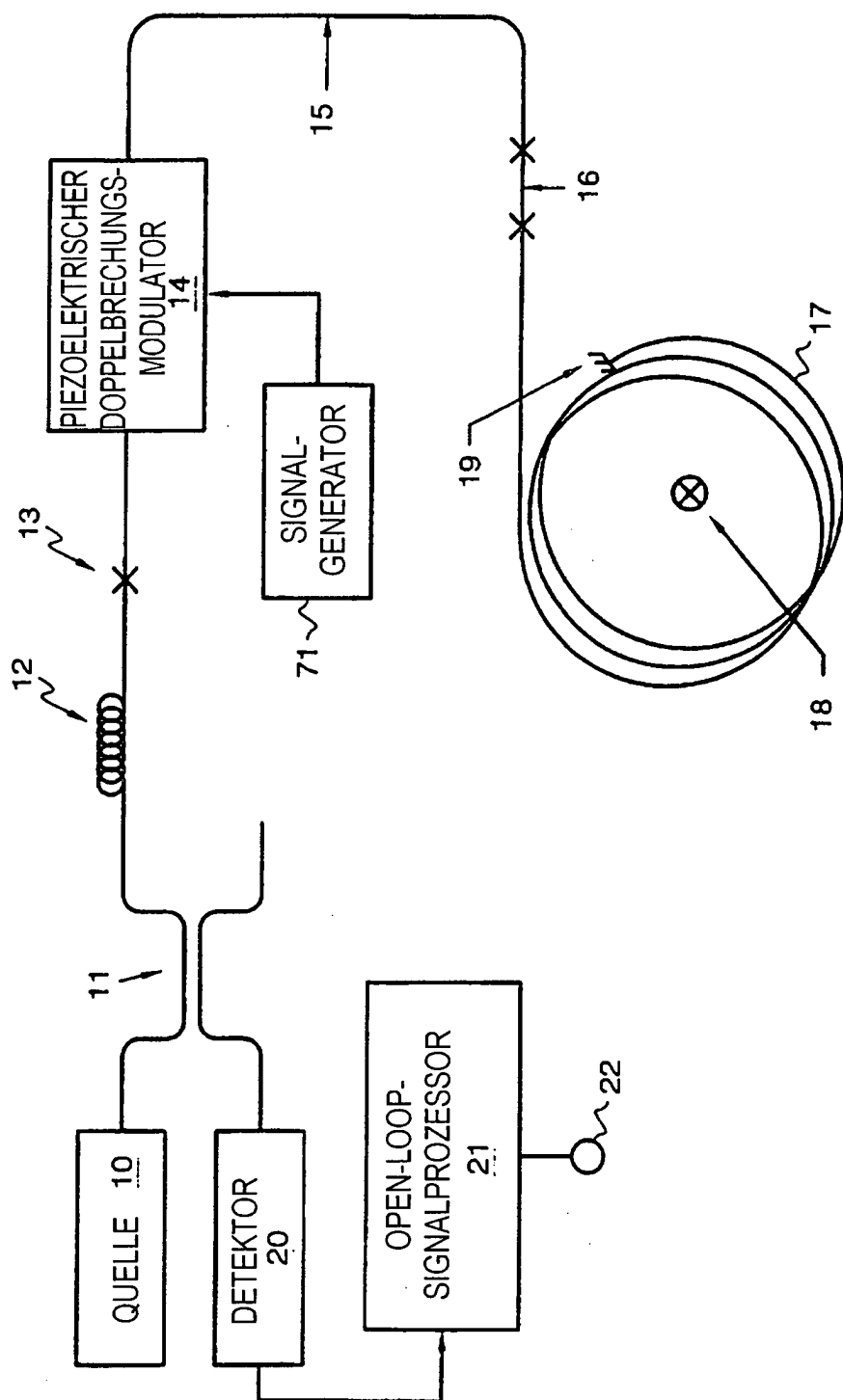


Fig. 1A



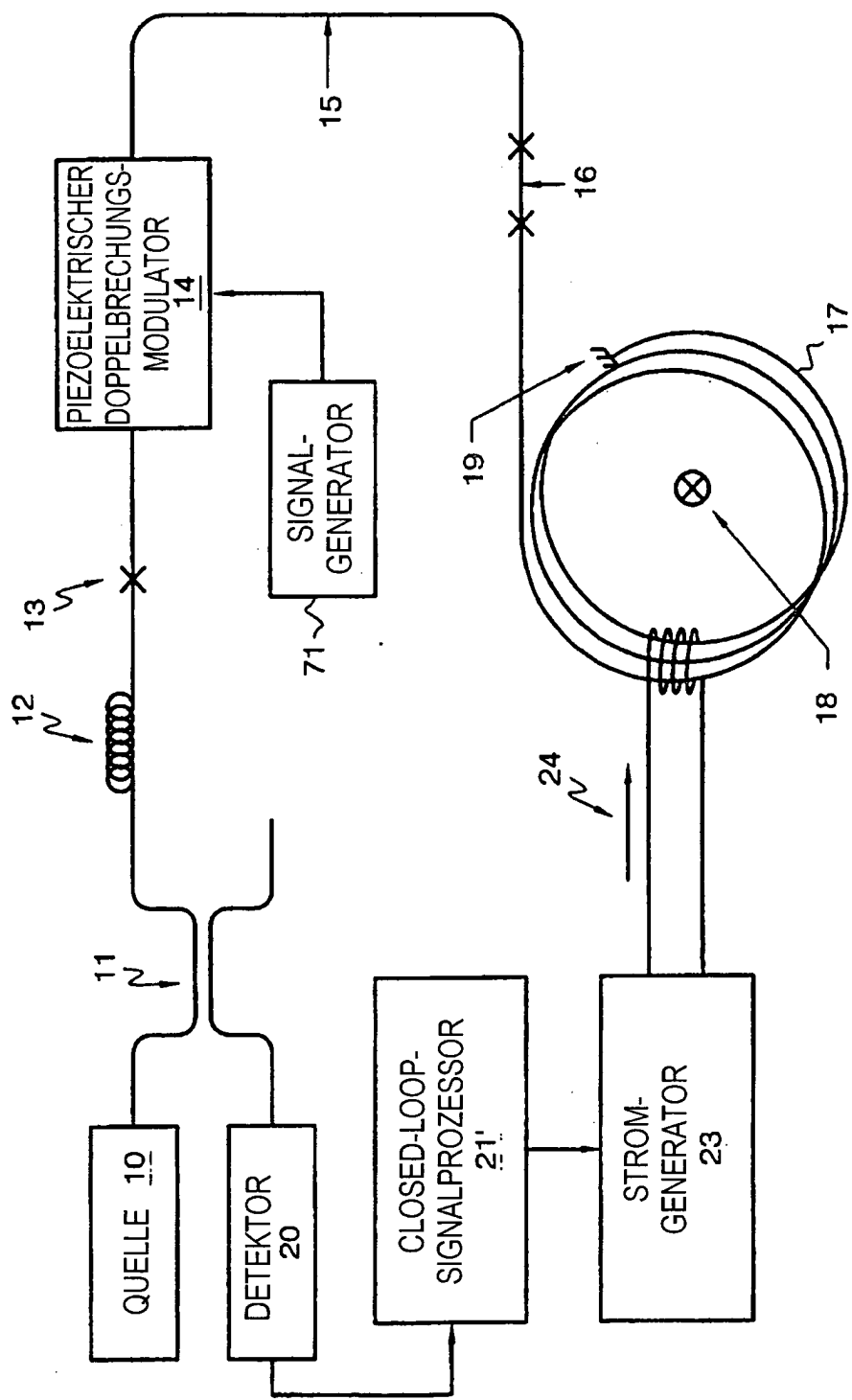
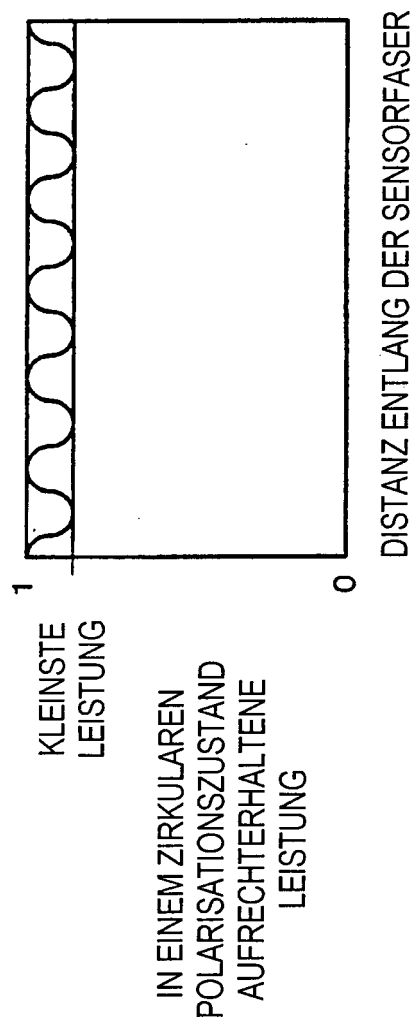


Fig. 1B



*Fig. 2*

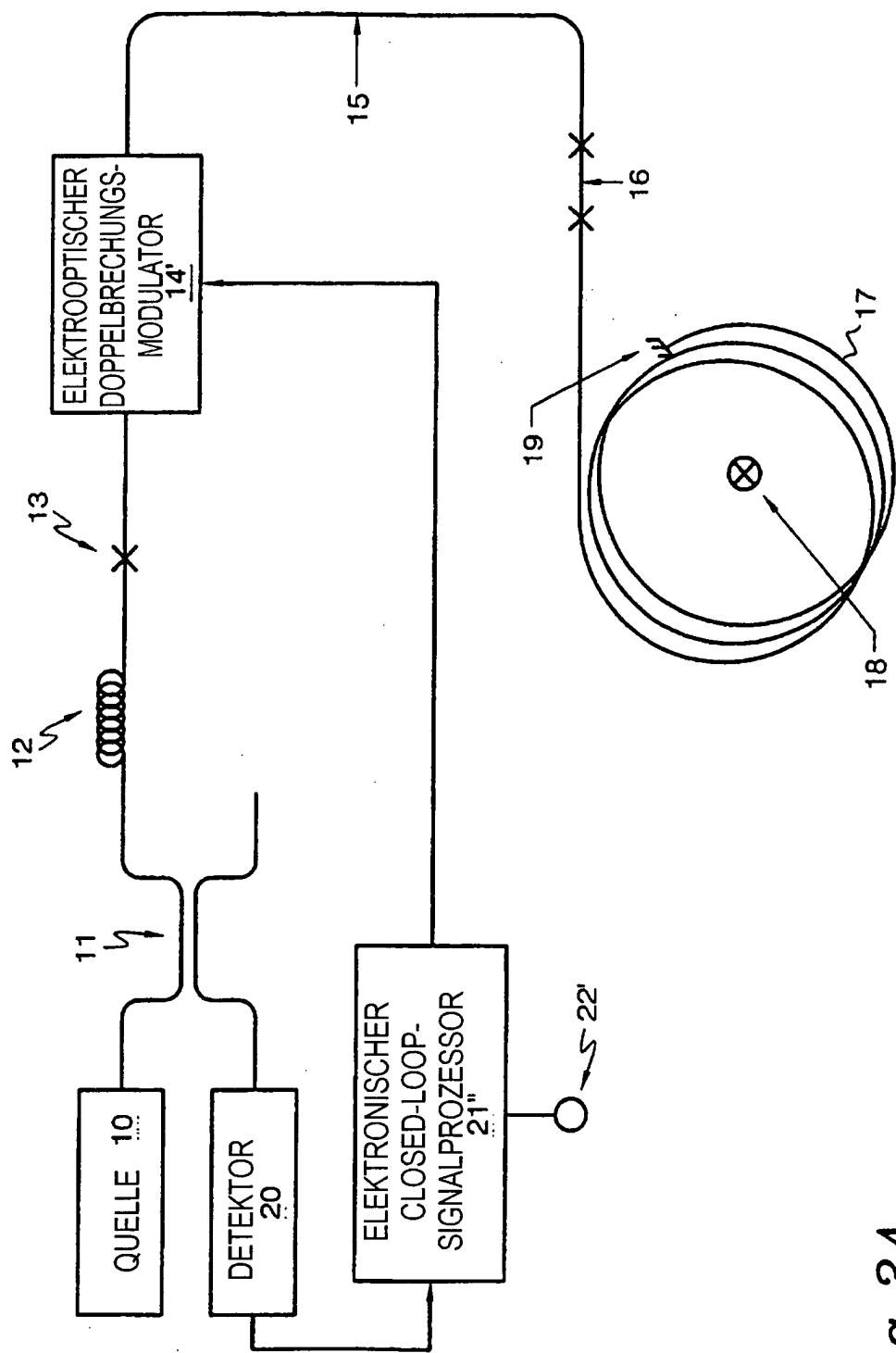


Fig. 3A

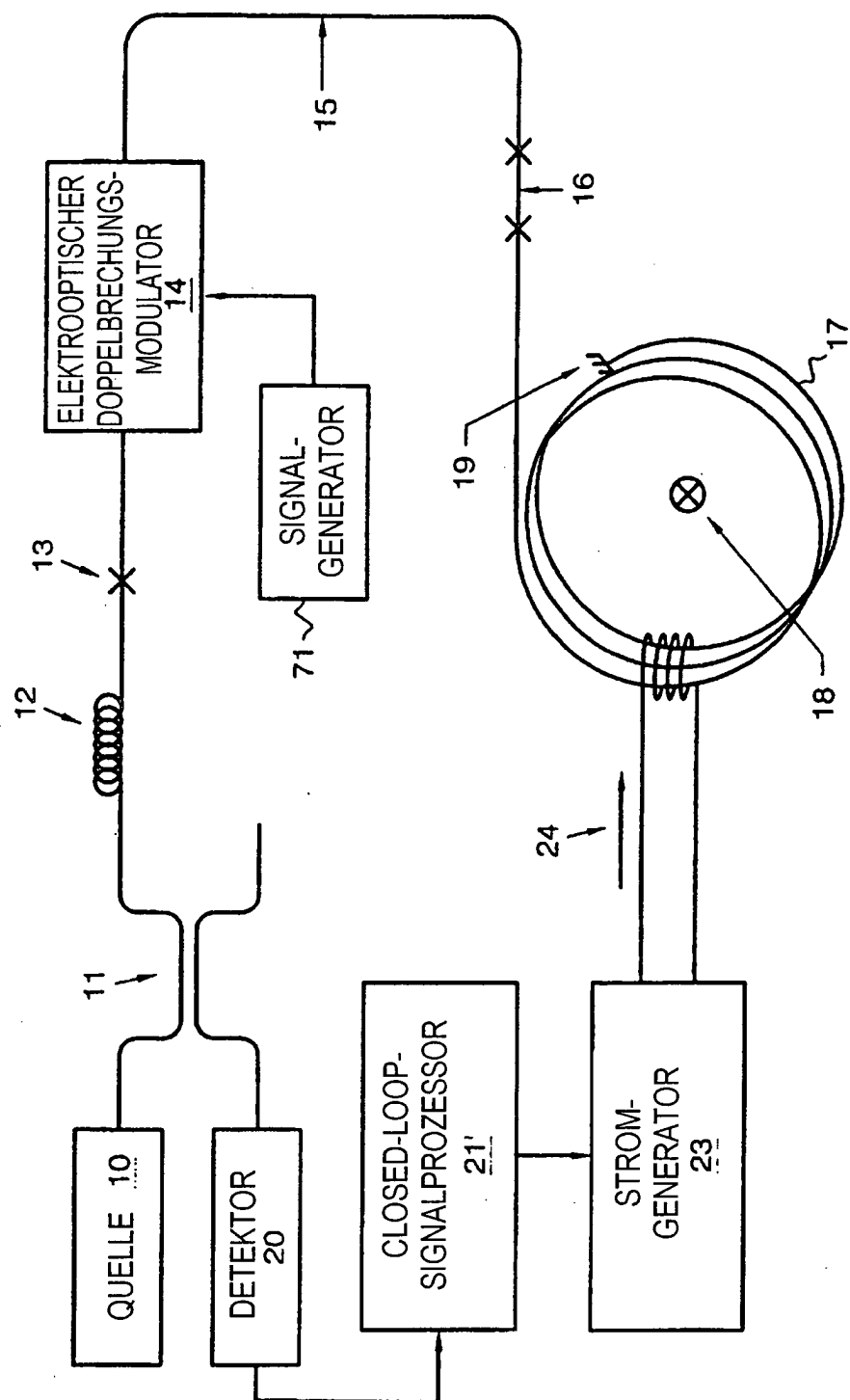


Fig. 3B

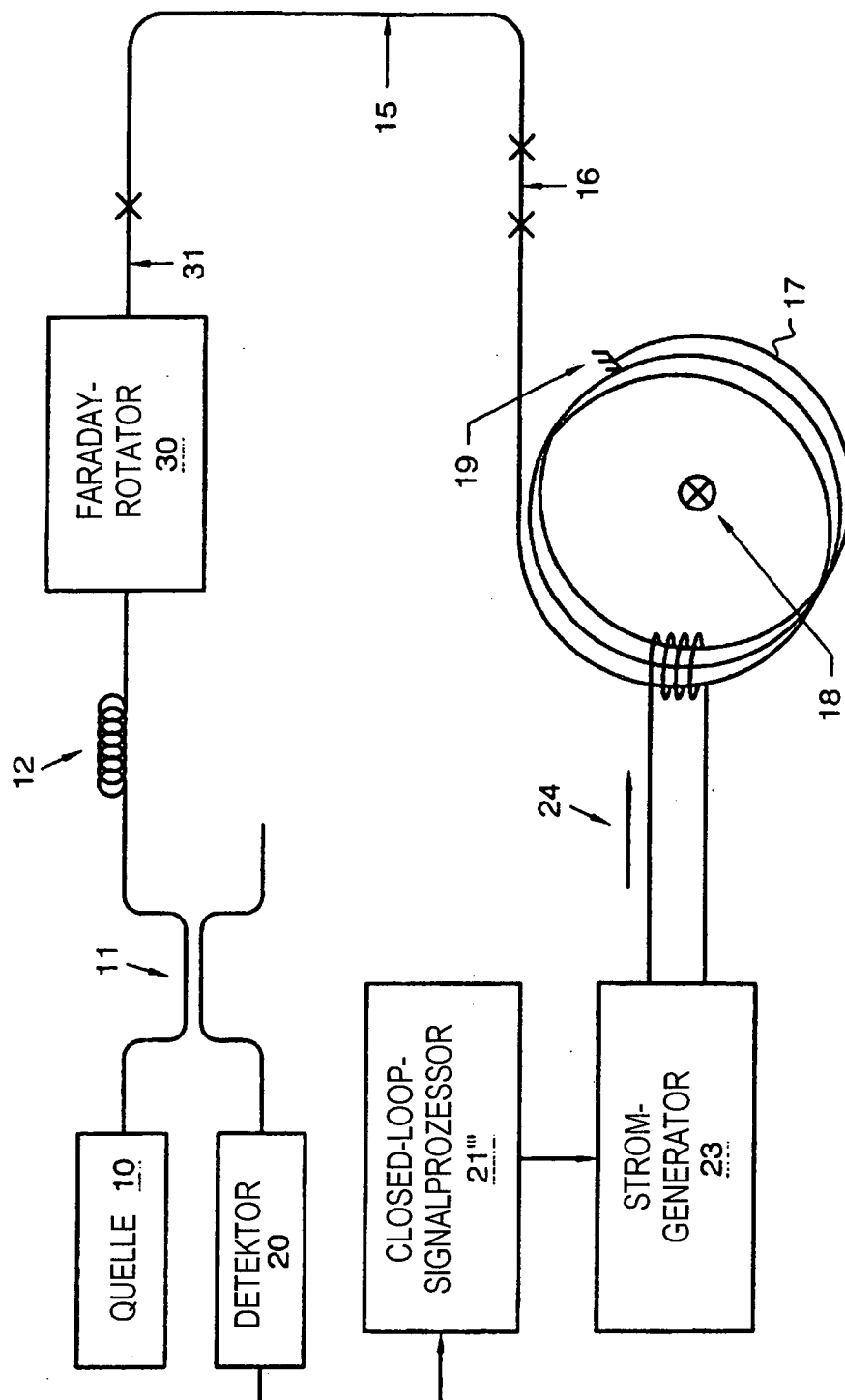


Fig. 4

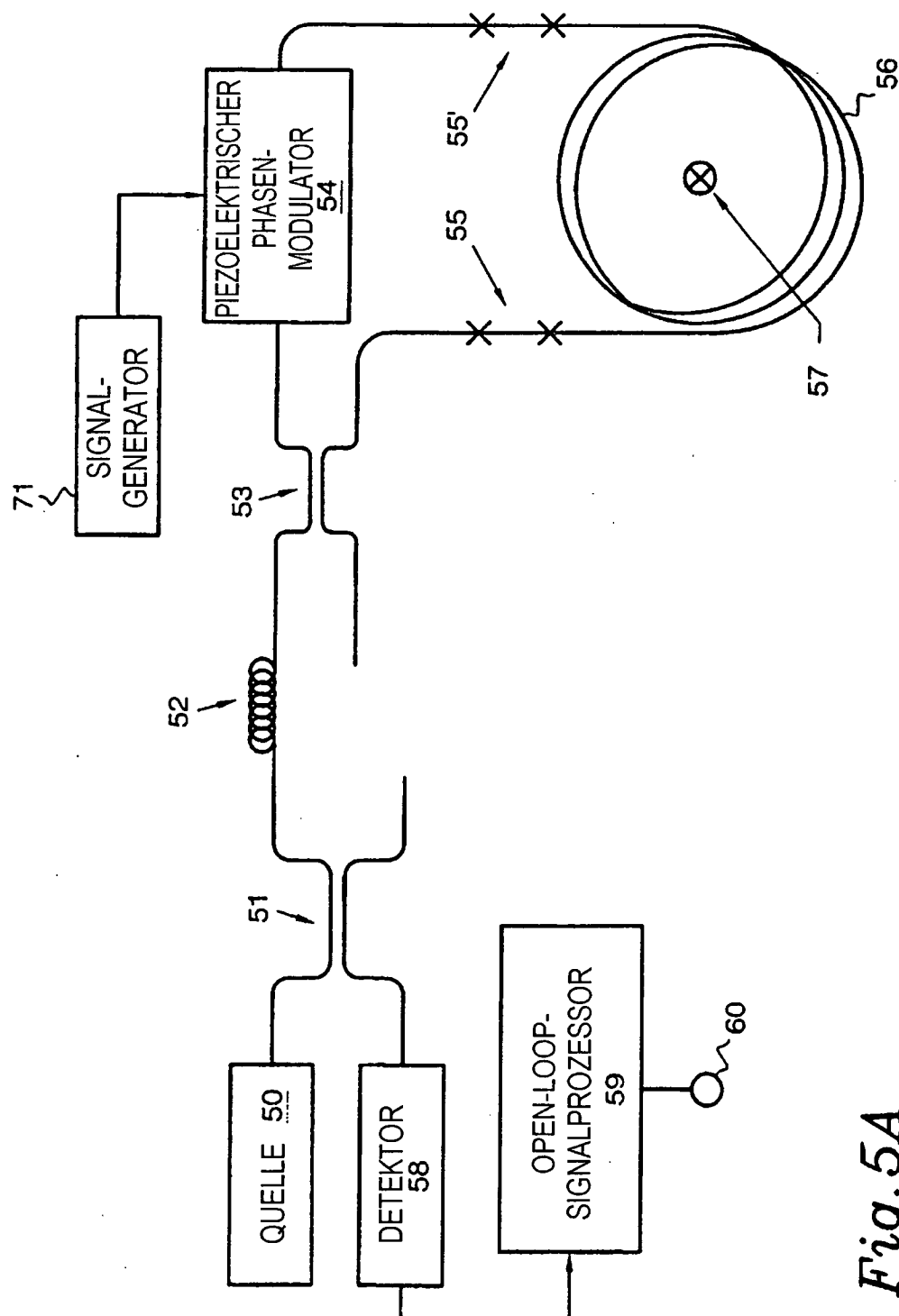


Fig. 5A

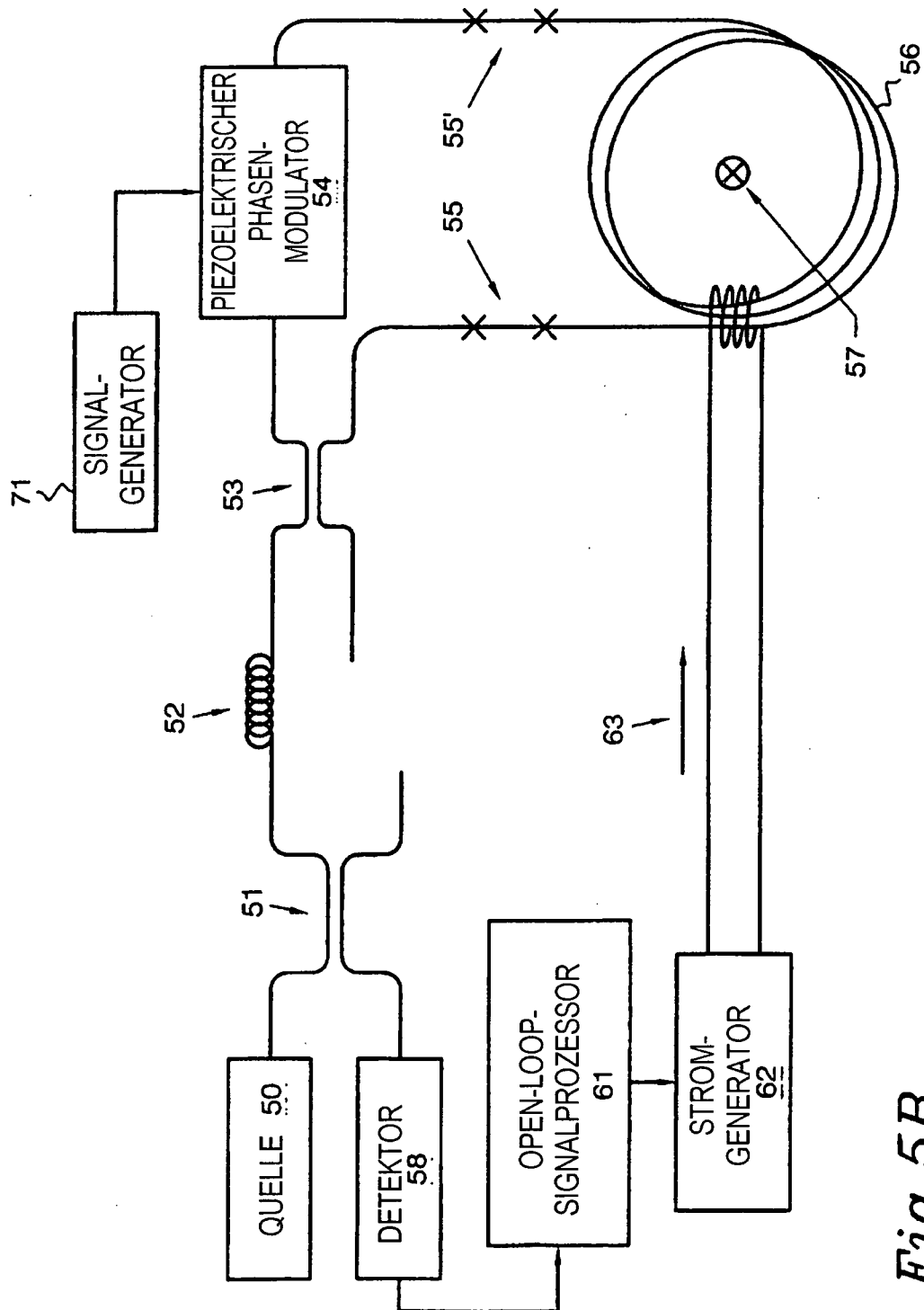


Fig. 5B

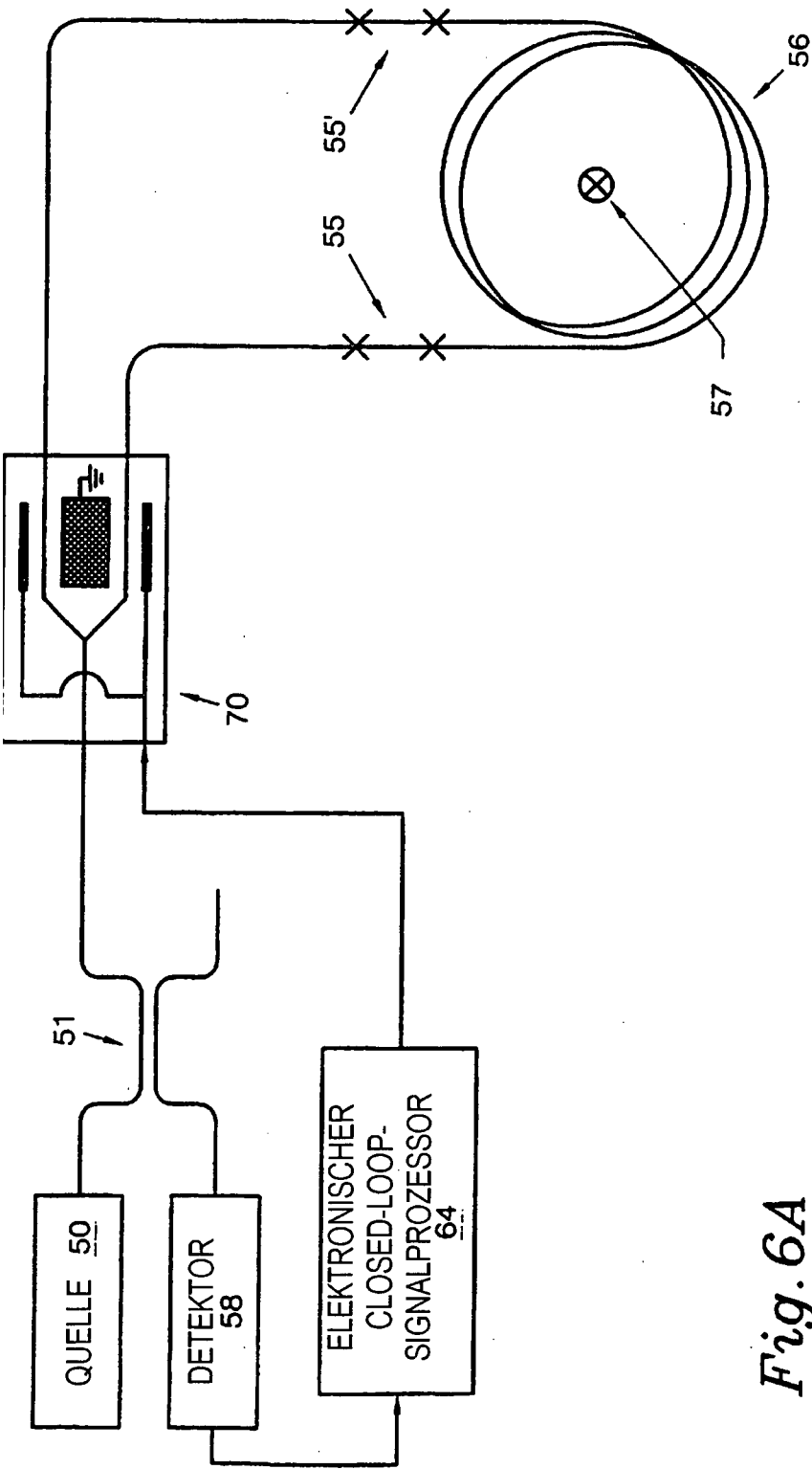


Fig. 6A



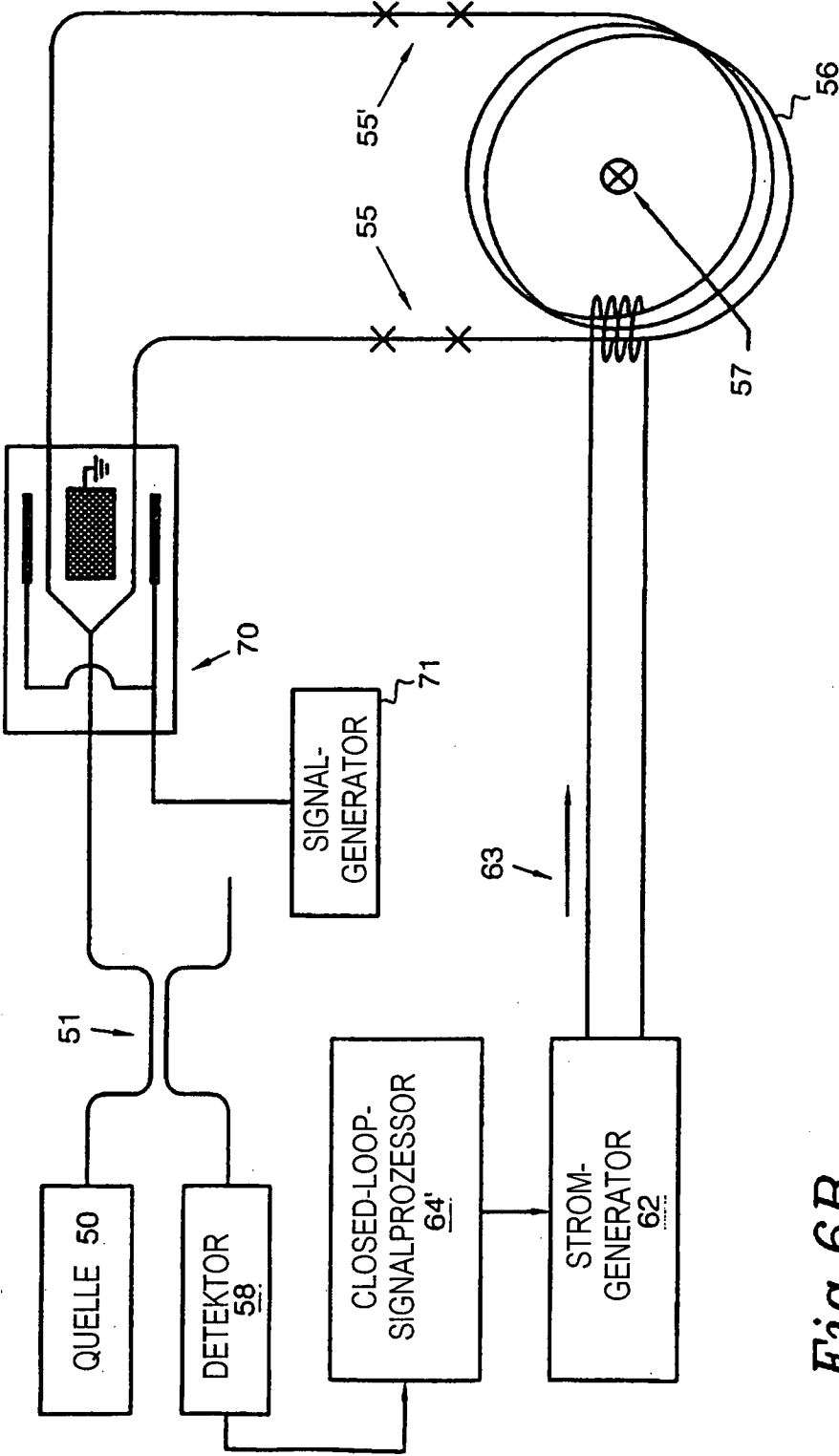


Fig. 6B

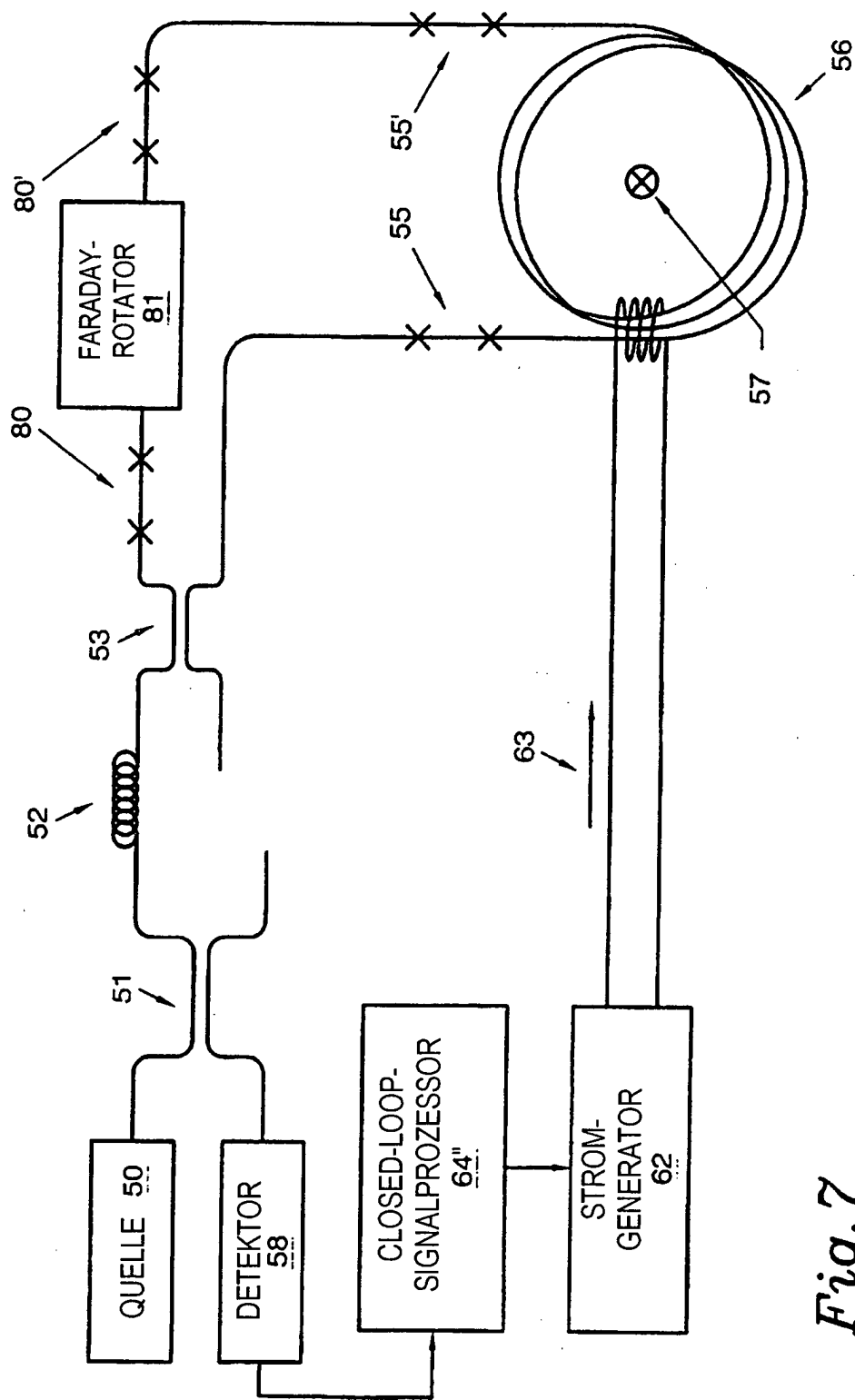


Fig. 7