

(12)

PATENTCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 1394/89

(51) Int.Cl.⁵ : G01B 9/02

(22) Anmeldetag: 7. 6.1989

(42) Beginn der Patentdauer: 15.10.1992

(45) Ausgabetag: 25. 6.1993

(56) Entgegenhaltungen:

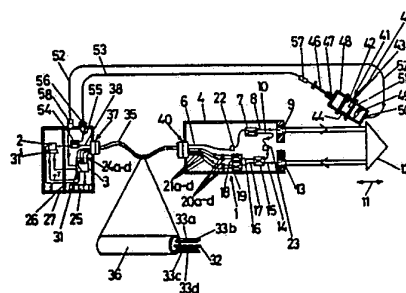
DE-OS3715627 US-PS4420260

(73) Patentinhaber:

TABARELLI WERNER DR.
FL-9494 SCHAAN (LI).

(54) INTERFEROMETERANORDNUNG

(57) Interferometeranordnung, insbesondere zur Entfernungs- bzw. Verschiebewegbestimmung eines beweglichen Bauteiles, mit einer Laserlichtquelle (2) mit einem Strahlteiler (7) zur Aufteilung von aus der Laserlichtquelle stammendem Licht in einen Meßstrahl und einen Referenzstrahl, mit einer Rekombinationseinrichtung (15), an der der über Referenzstrecke geführte Referenzstrahl und der eine teilweise in einem gasförmigen Umgebungsmedium verlaufende und über einen beweglichen Meßspiegel (12) führende Meßstrecke durchlaufende Meßstrahl interferieren. Zur Analyse eines aus der Rekombinationseinrichtung (15) stammenden optischen Interferenzsignals ist eine mindestens einen Photodetektor aufweisende Detektoreinrichtung (24 a-d, 3, 25) vorgesehen. Zur Erfassung bzw. Kompensation von variablen Umweltbedingungen ist mindestens ein statisches, mit Licht aus der Laserlichtquelle beleuchtetes Etalon (41) bekannter Länge vorgesehen, dessen zwischen den Reflexionsflächen (42, 43) liegender Raumbereich mit dem Umgebungsmedium kommuniziert. Das Etalon (41) ist an eine Licht aus der Laserlichtquelle (2) führende, flexible Lichtleitfaser (46) angeschlossen, womit eine exakt justierte Beleuchtung des Etalons (41) gegeben ist und das Etalon (41) einfach in der Nähe der Meßstrecke angeordnet werden kann.



Die vorliegende Erfindung betrifft eine Interferometeranordnung, insbesondere zur Entfernungs- bzw. Verschiebewegbestimmung eines beweglichen Bauteiles, mit einer Laserlichtquelle mit zumindest einem Strahlteiler zur Aufteilung von aus der Laserlichtquelle stammendem Licht in einen Meßstrahl und einen Referenzstrahl, mit einer Rekombinationseinrichtung, an der der über Referenzstrecke geführte Referenzstrahl und der eine teilweise in einem gasförmigen Umgebungsmedium verlaufende und über einen beweglichen Meßspiegel führende Meßstrecke durchlaufende Meßstrahl interferieren, und mit einer wenigstens einen Photodetektor aufweisenden Detektoreinrichtung zur Analyse zumindest eines aus der Rekombinationseinrichtung stammenden optischen Interferenzsignals, wobei die Interferometeranordnung zur Erfassung bzw. Kompensation von variablen Umweltbedingungen mindestens ein statisches, über einen Lichtwellenleiter mit Licht aus der Laserlichtquelle beleuchtetes Etalon bekannter Länge aufweist, dessen zwischen den Reflexionsflächen liegender Raumbereich mit dem Umgebungsmedium kommuniziert.

Bei einer solchen Interferometeranordnung, bei der der Meßstrahl über eine im Umgebungsmedium (meist Luft) verlaufende Meßstrecke geführt wird, liegt das interferometrische Meßergebnis zunächst in Einheiten der in diesem Umgebungsmedium vorhandenen Lichtwellenlängen (im folgenden kurz Luftwellenlänge genannt) vor. Um beispielsweise den Verschiebeweg eines Meßspiegels in metrischen Einheiten zu kennen, muß die von der Emissionsfrequenz der Laserlichtquelle und von der Brechzahl des Umgebungsmediums abhängende Luftwellenlänge hinreichend genau bekannt sein. Bei bekannter Emissionsfrequenz besteht die Möglichkeit, Druck, Temperatur und Feuchte des Umgebungsmediums zu erfassen und daraus nach einem formelmäßigen Zusammenhang die Brechzahl zu errechnen. Nachteilig an diesem sogenannten Parameterverfahren ist die Tatsache, daß einerseits die Emissionsfrequenz genauestens bekannt sein muß und daß neben Temperatur, Druck und Feuchte auch andere Parameter, wie beispielsweise die Gaszusammensetzung der Luft, in die Brechzahl und damit in die Luftwellenlänge eingehen.

Durch einen interferometrischen Vergleich der Luftwellenlänge mit einer Maßverkörperung bekannter Länge ist man prinzipiell in der Lage, die Luftwellenlänge direkt zu bestimmen. Als statische Maßverkörperungen eignen sich sogenannte Etalons (Endmaße) mit zwei in bekanntem Nominal-Abstand zueinander angeordneten Reflexionsflächen, wobei das Etalon "offen" ist, d. h. der zwischen den Reflexionsflächen liegende Raumbereich mit dem Umgebungsmedium kommuniziert. Bei der Verwendung derartiger Etalons zur Erfassung bzw. Kompensation von variablen Umweltbedingungen (Brechzahl des Umgebungsmediums) treten zwei verschiedenartige Schwierigkeiten auf. Zunächst muß sichergestellt sein, daß sich zwischen den Reflexionsflächen des Etalons (bzw. bei mehreren Etalonen zwischen den Reflexionsflächen jedes Etalons) tatsächlich dieselben Umweltbedingungen herrschen wie auf der Meßstrecke. Bei bisher bekannten Einrichtungen wurde das Etalon häufig in der Nähe der diskret aufgebauten übrigen optischen Komponenten der Interferometeranordnung angeordnet, wodurch insbesondere die Gefahr eines Temperatur- und Feuchteunterschiedes zwischen dem Umgebungsmedium im Etalon und dem auf der Meßstrecke besteht, womit eine Verfälschung des Meßergebnisses verbunden ist.

Ein weiteres Problem bei der Verwendung von einem oder mehreren Etalonen zur Erfassung bzw. Kompensation von Umweltbedingungen besteht in der Empfindlichkeit gegenüber der Winkeljustierung. Der das Interferenzsignal bestimmende optische Gangunterschied hängt nicht nur, wie gewünscht, von der Länge des Etalons (Abstand der beiden Reflexionsflächen) ab, sondern auch vom Winkel, unter dem die Lichtstrahlen durch das Interferometer treten. Der zulässige Winkelfehler hängt von der angestrebten Genauigkeit der Interferometeranordnung und der Etalonlänge ab. Für eine typische Etalonlänge von etwa einem Zentimeter und einer relativen Luftwellenlängengenauigkeit von 10^{-7} ergibt sich beispielsweise ein maximal zulässiger Winkelfehler von 15 Bogenminuten (kollinear beleuchtetes Etalon) bzw. von wenigen Bogensekunden (divergent beleuchtetes Etalon). In jedem Fall ist die Forderung an die Winkelgenauigkeit im praktischen Einsatz mit einem Interferometer in herkömmlicher Bauweise nur schwer erfüllbar.

Es ist weiters bereits ein Interferometer bekannt (DE-OS 37 15 627), das auf einem plattenförmigen Trägersubstrat integrierte Lichtwellenleiter aufweist. An das Trägersubstrat ist eine luftgefüllte Einrichtung angeschlossen, die zusammen mit der Außenfläche des Trägersubstrates eine Art Etalon bildet, welches zur Kompensation von Umweltbedingungen prinzipiell geeignet ist. Allerdings liegt dieses "Etalon" räumlich starr an einer der Meßstrecke abgewandten Stelle seitlich am Trägersubstrat fest, womit nicht sichergestellt ist, daß im "Etalon" und auf der Meßstrecke dieselben Umweltbedingungen (insbesondere Temperatur und Feuchte) herrschen. Für präzise Meßergebnisse ist dies aber eine notwendige Voraussetzung.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine kompakte, einfach handzuhabende und insbesondere für die industrielle Wegmessung geeignete Interferometeranordnung der eingangs genannten Gattung zu schaffen, die mit einem oder mehreren Etalons eine präzise Erfassung bzw. Kompensation der auf der Meßstrecke herrschenden, variablen Umweltbedingungen ermöglicht, wobei die auf der Meßstrecke tatsächlich vorliegende Luftwellenlänge genau ermittelbar sein soll.

Dies wird erfindungsgemäß dadurch erreicht, daß der Lichtwellenleiter, an den das bzw. die Etalon(e) angeschlossen ist bzw. sind, eine Licht aus der Laserlichtquelle führende, flexible Lichtleitfaser ist.

Durch den Etalonanschluß an eine flexible Lichtleitung ist es ohne aufwendig zu justierende optische Bauteile einfach möglich, das Etalon im Bereich bzw. in der Nähe der Meßstrecke anzuordnen, womit sichergestellt ist, zwischen den Reflexionsflächen des bzw. der Etalons tatsächlich dieselben Umweltbedingungen herrschen wie auf

der Meßstrecke. In der Praxis wird man das zum Etalon weisende Faserende in einer vorzugsweise einstellbaren Haltevorrichtung relativ zu den Reflexionsflächen des Etalons justiert halten. Damit kann die eingangs erwähnte Empfindlichkeit gegenüber Winkeljustierungen des Etalons beseitigt werden, wobei diese präzise Justierung unabhängig von der genauen Lage des Etalons immer aufrechterhalten ist. Man braucht das Etalon also nicht in Relation zu anderen diskret aufgebauten optischen Komponenten auszurichten, sondern hat die Freiheit, es an einer günstigen Stelle in der Nähe der Meßstrecke anzuordnen. Dies stellt für die praktische Anwendung einen erheblichen Vorteil dar.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, daß die flexible Lichtleitfaser, an die das bzw. die Etalone angeschlossen ist (sind), ein Einmodenwellenleiter, vorzugsweise eine monomode Glasfaser ist. Bei einer kollinearen Beleuchtung des Etalons, bei der zwischen dem etalonseitigen Ende der Lichtleitfaser und der einen der beiden Reflexionsflächen des Etalons eine Kollimationslinse angeordnet ist, aus der die Lichtstrahlen parallel zueinander und senkrecht auf die parallelen Reflexionsflächen in den zwischen diesen liegenden Raumbereich des Etalons eintreten, kommt bei der Verwendung eines Einmodenwellenleiters insbesondere der Effekt zum Tragen, daß im Einmodenwellenleiter wohldefinierte Wellenfronten vorliegen, die nach Abbildung durch eine entsprechend genaue Kollimationslinse optimale Wellenfronten für die kollineare Beleuchtung des Etalons erlauben.

Bei einer divergenten Beleuchtung des Etalons, bei der das räumliche Interferenzringmuster ausgewertet wird, hängt die Lage der Interferenzringe im Prinzip nicht von der Lage der divergenten Lichtquelle ab, sondern nur von der räumlichen Lage und Orientierung des Etalons und der das Interferenzringsystem erzeugenden Linse hinter dem Etalon. Um ein gleichmäßig ausgeleuchtetes Ringsystem zu erhalten, kommt es darauf an, daß dem Etalon gleichmäßig Licht unter allen Winkeln angeboten wird. Bisher hat man versucht, dieses gleichmäßige Angebot dadurch zu erreichen, daß der zu untersuchende Lichtstrahl durch eine Linse divergent gemacht wird. Für Präzisionsmessungen am räumlichen Interferenzringsystem muß aber sowohl die Linse als auch die Wellenfront des Lichtstrahles eine sehr hohe Qualität haben. Ansonsten wird das Interferenzringsystem nicht gleichmäßig beleuchtet, was die Auswertung verfälscht. Aus diesem Grund hat man auch versucht, das Etalon über eine Mattglasscheibe zu beleuchten, die das Licht völlig diffus macht, bevor es in das Etalon eintritt. Bei einer mit kohärentem Laserlicht beleuchteten Mattscheibe ergibt sich allerdings in der Brennebene der das Interferenzringsystem scharf abbildenden Linse ein unregelmäßiges Speckle-Muster, das sich dem Ringsystem überlagert und das eine präzise Auswertung der Lage der Interferenzringe unmöglich macht. Die genannten Probleme werden gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung dadurch gelöst, daß das Etalon über eine monomode Lichtleitfaser beleuchtet wird, die in einem festen bzw. fest einstellbaren Abstand vor der einen Reflexionsfläche des Etalons endet, wobei der aus der monomodalen Lichtleitfaser divergent austretende Lichtkegel das Etalon beleuchtet. Das Ende des Einmodenwellenleiters (beispielsweise monomode Glasfaser) stellt eine perfekte Punktlichtquelle dar. Auf diese Weise erreicht man mit einfachen Mitteln ein präzises, gleichmäßig ausgeleuchtetes Interferenzringsystem.

Die Interferenzen gleicher Neigung, welche durch die dem Ende der monomodalen Lichtleitfaser abgewandte, teilreflektierende Reflexionsfläche austreten, werden hinter dieser Reflexionsfläche durch eine Sammellinse abgebildet, in deren Brennebene vorzugsweise radial außerhalb der optischen Achse eine das Interferenzringsystem erfassende Photodetektoreinheit angeordnet ist.

Um die variablen Umweltbedingungen zu kompensieren, ist gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung vorgesehen, daß die Frequenz der Laserlichtquelle in Abhängigkeit von der Brechzahl des zwischen den Reflexionsflächen des Etalons bzw. der Etalone befindlichen Umgebungsmediums derart verändert wird, daß die im Umgebungsmedium vorhandene Wellenlänge konstant bleibt. Diese Konstanthaltung der Luftwellenlänge erlaubt eine einfachere Auswertung der vom Etalon erzeugten Interferenzsignale, da es lediglich darauf ankommt, dieses Interferenzsignal konstant zu halten, was im Falle eines divergent beleuchteten Etalons, beispielsweise durch eine Differentialdiode möglich ist, die einen Ring des Interferenzringsystems erfaßt. In Abhängigkeit von den Signalen aus der Differentialdiode kann dann eine elektronische Regeleinheit die Frequenz der Laserlichtquelle derart verstellen, daß der erfaßte Interferenzring immer genau in der Mitte der Differentialdiode steht, womit die Luftwellenlänge konstant gehalten ist.

Verwendet man gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung eine Laserdiode als Lichtquelle, in deren Laserresonator Licht aus dem günstigerweise kollinear beleuchteten Etalon frequenzselektiv zurückgekoppelt wird, so kann man die Eigenschaft von Laserdioden, auf zurückgekoppeltes Licht in der Emissionsfrequenz zu reagieren, vorteilhaft ausnutzen. Die vom Etalon bevorzugt in den Laserresonator der Laserdiode zurückgekoppelte Frequenz veranlaßt die Emissionsfrequenz der Laserdiode innerhalb eines bestimmten Bereiches auf diese Frequenz einzurasten. Die genannte Regelung der Laserdiode über die optische Rückkopplung kann durch eine elektronische Regelung unterstützt sein, die in Abhängigkeit von der vom Etalon erfaßten Luftwellenlänge, die die Emissionswellenlänge der Laserdiode mitbestimmenden Betriebsparameter (Injektionsstrom, Betriebstemperatur) regelt.

Um die Handhabung bzw. der Etalone zu erleichtern ist es günstig, wenn das dem Etalon abgewandte Ende der Lichtleitfaser über einen Faserverbinder mit einer Licht aus der Laserlichtquelle führenden Lichtleitfaser lösbar verbunden ist. Diese Verbindungsstelle kann beispielsweise an einem Gehäuse angebracht sein, in dem die Laserdiode und/oder die Auswertelektronik untergebracht ist. Das Etalon braucht dann nurmehr "angesteckt"

werden. Um eine Anpassung der zum Etalon führenden Glasfaserlänge vom Bereich der Meßstrecke bis zur Lichtquelle zu erreichen, ist es gemäß einer bevorzugten Ausführungsform günstig, wenn zwischen der am Etalon angeschlossenen Lichtleitfaser und der Laserlichtquelle eine weitere Lichtleitfaser angeordnet ist, deren lichtquellenseitiges Ende über einen ersten Faserverbinder einer von der Laserlichtquelle kommenden Lichtleitfaser lösbar verbunden ist und deren etalonseitiges Ende über einen zweiten Faserverbinder mit der am Etalon angeschlossenen Lichtleitfaser lösbar verbunden ist. Über diese weitere Lichtleitfaser ist eine leichte Anpassung der Glasfaserlänge an die jeweiligen räumlichen Gegebenheiten sowie eine einfache Verlegung der Glasfaser leicht möglich.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, daß die gesamte optische Länge der zwischen Etalon und Lichtquelle liegenden Lichtleitfasern mindestens ein Meter, vorzugsweise mindestens zehn Meter beträgt. Mit diesem Merkmal wird verhindert, daß es aus dem zwischen der Lichtquelle und der ersten reflektierenden Fläche des Etalons gebildeten "Quasietalon" zu störenden Rückkopplungen in die Laserlichtquelle kommt. Durch die große optische Länge der Lichtleitfaser, welche man am günstigsten durch eine entsprechend lange weitere Lichtleitfaser erzielt, rücken die Reflexionsmaxima aus dem "Quasietalon" so nahe zusammen, daß es sich im Rahmen der geforderten Wellenlängengenauigkeit um eine quasi kontinuierliche Rückkopplung handelt, die die Emissionsfrequenz der Laserlichtquelle, insbesondere einer auf Rückkopplungen sensitiven Laserdioden im Rahmen der geforderten Längenwellengenauigkeit nicht beeinflusst.

Sollte es nicht möglich sein, daß aus einem relativ kurzen (Abstand der Reflexionsflächen im Bereich von einigen Millimetern) stammende Interferenzsignal (beispielsweise die Lage eines Interferenzringes) mit der erforderlichen Genauigkeit zu messen bzw. konstant zu halten, so kann ein zweites, etwa 10 bis 30 x längeres Etalon eingesetzt werden (Stufenetalon), das eine genauere Auswertung des Interferenzmusters erlaubt.

Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung werden in der folgenden Figurenbeschreibung näher erläutert.

Es zeigen die Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels der erfindungsgemäßen Interferometeranordnung, bei der ein Teil des zum bzw. vom Interferometerkopf führenden Lichtleitfaserkabels vergrößert dargestellt ist, die Fig. 2 ein Ausführungsbeispiel eines an eine Glasfaser angeschlossenen, kollinear beleuchteten Etalons, die Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Anordnung zur Auswertung des aus einem kollinear beleuchteten Etalon stammenden Interferenzsignals die Fig. 4 eine schematische Darstellung eines aus zwei Etalons verschiedener Länge bestehenden Stufenetalons und Fig. 5 ein weiteres, schematisch dargestelltes Ausführungsbeispiel. Die in Fig. 1 dargestellte Interferometeranordnung weist einen Interferometerkopf (1), eine Laserdioden (2) zur Versorgung des Interferometerkopfs (1) mit Laserlicht und eine Detektoreinrichtung (3) zur Auswertung der aus dem Interferometerkopf stammenden Interferenzsignale auf. Der Interferometerkopf (1) ist von einem Gehäuse (4) umgeben und enthält in seinem Inneren mehrere, durch monomode Glasfasern verbundene optische Komponenten, die im folgenden näher beschrieben werden. Das in der Lichtleitfaser (6) herangeführte Laserlicht aus der Laserdioden (2) gelangt zu einem Strahlteiler (7), der eine Aufteilung in Meß- und Referenzstrahl vornimmt. Der Meßstrahl wird über die Glasfaser (8) und die Auskoppellinse (9) (Gradientenindexlinse) auf die außerhalb des Interferometerkopfs liegende, im Umgebungsmedium verlaufende Meßstrecke geführt. Der Referenzstrahl verläuft in der Referenzfaser (10) im Interferometerkopf (1). An einem in Richtung des Doppelpfeiles (11) verschieblichen (nicht dargestellten) Bauteil ist der Retroreflektor (12) befestigt. Dieser Retroreflektor (12) reflektiert den Meßstrahl mit Strahlversatz zum Interferometerkopf (1) zurück. Über eine gesonderte Einkoppellinse (13) gelangt der Meßstrahl in die Glasfaser (14). In der als Faserkoppler ausgeführten Rekombinationseinrichtung (15) werden der von der Meßstrecke zurückkehrende Meßstrahl und der in der Referenzfaser (10) geführte Referenzstrahl Interferenz gebracht. Zwei weitere Strahlteiler (18) und (19) sind an die beiden komplementären Ausgänge (16) und (17) der Rekombinationseinrichtung (15) angeschlossen. Über Polarisationsfilter (20a) bis (d) gelangen die phasenverschobenen Interferenzsignale in die zur Detektoreinrichtung (3) führenden Lichtleitfasern (21a) bis (d). Aus den vier jeweils um 90° gegeneinander phasenverschobenen Interferenzsignalen lassen sich in bekannter Weise neben dem Verschiebeweg des Retroreflektors (12) auch die Verschieberichtung und der Modulationshub des Interferenzsignals ermitteln. Die dargestellte Interferometeranordnung ist also mit zwei senkrecht aufeinanderstehenden Polarisierungen betrieben. Dazu ist ein Polarisator (22) vorgesehen, um aus dem linearpolarisierten Licht der Laserdioden Licht mit zwei senkrecht aufeinanderstehenden Polarisierungen zu erzeugen. Beide Polarisationsanteile durchlaufen dieselbe Meßstrecke. Im Referenzstrahl (10) ist ein $\lambda/4$ -Plättchen angeordnet, um eine Polarisationsrichtung gegenüber der anderen um 90° in der Phase zu verschieben.

Die Detektoreinrichtung (3) weist vier Photodetektoren (24a - d) auf. Diese vier Photodetektoren (24a - d) erzeugen aus den optischen Interferenzsignalen elektrische Interferenzsignale, die von einer Elektronikeneinheit ausgewertet werden. Das Ergebnis (die Lage des Retroreflektors (12)) wird über eine Anzeige (25) angezeigt.

Die Laserdioden (2) befindet sich in einem durch die wärmeisolierende Dämmwand (26) abgeteilten Gehäusebereich des Lichtquellen- und Auswertgehäuses (27).

Zur im folgenden näher beschriebenen Kompensation von variablen Umweltbedingungen (Schwankungen der Brechzahl des Umgebungsmediums auf der Meßstrecke) ist ein statisches Etalon (41) vorgesehen, zwischen dessen teildurchlässigen Reflexionsflächen (42) und (43) ein Raumbereich liegt, der über die Öffnung (44) mit dem Umgebungsmedium kommuniziert. Die Länge des Etalons (41) (Abstand der parallelen teildurchlässigen Reflexionsflächen (42) und (43)) ist bekannt und beträgt typischerweise einige Millimeter. Ein Ring (45) mit

vernachlässigbar kleinem Wärmeausdehnungskoeffizienten (beispielsweise aus Glaskeramik) hält die beiden Reflexionsflächen (42) und (43) in dem gewünschten bekannten Abstand. Erfindungsgemäß ist das Etalon an eine Licht aus der Laserdiode (2) führende, flexible Lichtleitfaser (46) angeschlossen, die bis auf dem Bereich ganz am Etalon (41) (wie alle anderen Lichtleitfasern) durch eine einfache Linie dargestellt ist. Diese Lichtleitfaser (46) erlaubt es, das Etalon an einer günstigen Stelle und Lage im Bereich der Meßstrecke ohne aufwendig zu justierende optische Bauteile anzuordnen. Damit ist sichergestellt, daß auf der Meßstrecke, entlang der sich der Retroreflektor (12) bewegt, und zwischen den Reflexionsflächen (42) und (43) des Etalons tatsächlich dieselben Umweltbedingungen (Brechzahl) herrschen.

Um eine einwandfreie Justierung des Glasfaserendes bezüglich der Reflexionsflächen (42) und (43) zu erzielen, ist dieses Ende von einer an einem Abstandhalter (48) angebrachten ringförmigen Haltevorrichtung (47) gehalten. Damit ist die erforderliche Winkelgenauigkeit in der optischen Strahlführung ständig gewährleistet.

Im vorliegenden Ausführungsbeispiel ist die Lichtleitfaser (46) eine monomode Glasfaser, deren Ende eine ideale Punktlichtquelle darstellt. Damit ergibt sich hinter der Reflexionsfläche (43) ein durch die Linse (49) abgebildetes, präzises, gleichmäßig ausgeleuchtetes Interferenzringsystem. Eine Differentialdiode (50), die wie die Linse an einem Halter (51) befestigt ist, erfaßt einen Interferenzring des Interferenzringsystems und gibt in Abhängigkeit von der Lage des Interferenzrings über die mittels der Stecker (58) angesteckte elektrische Leitung (52) ein Signal an die Laserdioden-Regeleinheit (31) ab.

Die Emissionsfrequenz der Laserdiode (2) wird einerseits über Injektionsstrom und Temperatur und andererseits durch frequenzselektive optische Rückkopplung aus dem Etalon (41) im Interferometerkopf (1) geregelt. Zwischen den beiden etwa 5 mm beabstandeten Reflexionsflächen (42), (43) des Etalons (41) befindet sich das auf der Meßstrecke vorhandene Umgebungsmedium. Verändert sich die Brechzahl des Umgebungsmediums und damit die Luftwellenlänge im Etalon (41), so verändert sich auch die Lage des von der Differentialdiode (50) erfaßten Interferenzrings. Die Regeleinheit (31) korrigiert daraufhin über Injektionsstrom (I) und Laserdioden-Temperatur (T) (Peltier-Element (31')) die Betriebsparameter der Laserdiode derart, daß sich die Emissionsfrequenz gerade so ändert, daß die auf der Meßstrecke (und im Etalon (41)) vorhandene Luftwellenlänge konstant bleibt. Zusätzlich zu dieser elektronischen Regelung der Emissionsfrequenz erfolgt eine optische Regelung der Laserdiode dadurch, daß in Abhängigkeit von der Brechzahl des Umgebungsmediums zwischen den Spiegelflächen des Etalons (41) Licht frequenzselektiv in die Laserdiode zurückgekoppelt wird, das die Laserdiode dazu veranlaßt, bevorzugt auf dieser Frequenz zu emittieren. Zum Erhalt eines solchen optischen Rückkopplungssignals scheint allerdings das in Fig. 2 erläuterte kollinear beleuchtete Etalon günstiger zu sein.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist zwischen der am Etalon angeschlossenen Lichtleitfaser (46) und der über den Strahlteiler (54) mit Laserlicht versorgten Lichtleitfaser (55) eine weitere Lichtleitfaser (53) angeordnet, deren lichtquellenseitiges Ende über einen ersten Faserverbinder (56) am Gehäuse (27) mit der Lichtleitfaser (55) lösbar verbunden ist und deren etalonseitiges Ende mit der am Etalon (41) angeschlossenen Lichtleitfaser (46) lösbar verbunden ist. Diese weitere Lichtleitfaser läßt sich leicht verlegen, in ihrer Länge an die jeweiligen Gegebenheiten anpassen und bei Beschädigung einfach austauschen.

Um sicherzustellen, daß die Emissionsfrequenz der Laserdiode nicht durch unkontrollierbare frequenzselektive Rückkopplungen, wie sie z. B. aus dem "Quasietalon" zwischen der Außenfläche des Laserdiodenresonators und der ersten Spiegelfläche des Etalons (41) auftreten, in unerwünschter Weise beeinflusst wird, ist günstigerweise vorgesehen, daß zwischen der Laserdiode (2) und dem Etalon (41) eine Lichtleitfaser (53) angeordnet ist, deren optische Länge mindestens einen Meter beträgt.

Aus ähnlichen Überlegungen ist zwischen der Laserdiode (2) und dem Interferometerkopf (1) eine Lichtleitfaser (32) angeordnet, deren optische Länge mindestens einen Meter beträgt.

Die monomode Lichtleitfaser (32), über die Laserlicht dem Interferometerkopf zugeführt wird, und vier Kunststoff-Lichtleitfasern (33a - d), über die optische Interferenzsignale aus den Lichtleitfasern (21a - d) den Photodetektoren (24a - d) zugeführt werden, sind in einem von einem Mantel (36) umgebenen Kabel zusammengefaßt. Das Faserkabel (35) ist am lichtquellenseitigen Ende über einen zweiteiligen Mehrfachfaserverbinder (37) lösbar mit Lichtleitfasern im Lichtquellen- und Auswertgehäuse (27) verbunden. Im einzelnen ist die von der Laserdiode kommende Lichtleitfaser (38) mit der monomodalen Glasfaser (32) lösbar verbunden. Die vier Kunststoff-Lichtleitfasern (33a - d) des Faserkabels (35) sind über den Stecker (37) mit Lichtleitfasern verbunden, die zu den Photodetektoren (24a - d) führen.

Am interferometerkopfseitigen Ende des Faserkabels (35) ist ein zweiter Faserverbinder (40) zur lösbaren Verbindung der Lichtleitfasern des Faserkabels (35) mit entsprechenden Fasern im Interferometerkopf herzustellen. Im einzelnen wird über den Stecker (40) die monomode Glasfaser (32) mit der monomodalen Glasfaser (6) verbunden. Außerdem erfolgt eine optische Kopplung der Lichtleitfasern (21a - d) mit den Lichtleitfasern (33a - d) des Faserkabels (35). Das Faserkabel (35) läßt sich unter Beachtung der optischen Mindestlänge an die jeweiligen Einsatzbedingungen einfach anpassen, ist leicht verlegbar und kann bei Beschädigungen einfach und rasch ausgetauscht werden. Dieser Austausch kann sogar vom Benutzer vorgenommen werden, da eine aufwendige Justage im Anschluß an den Austausch nicht nötig ist.

In Fig. 2 ist ein Ausführungsbeispiel eines kollinear beleuchteten Etalons (41) dargestellt, das an eine Licht aus der Laserlichtquelle führende Glasfaser (46) angeschlossen ist, deren Länge wie bei dem in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiel zumindest ausreicht, um das Etalon in der Nähe der Meßstrecke anzuordnen.

Das in Fig. 2 dargestellte Etalon weist eine als Gradientenindexlinse ausgebildete Kollimationslinse (59) auf, an die das Ende der Glasfaser (46) mittels einer Haltevorrichtung in genau justierter Weise angeschlossen ist. Die ebene Austrittsfläche der Gradientenindexlinse (59) ist günstigerweise verspiegelt und bildet eine der beiden teilreflektierenden Reflexionsflächen (42) bzw. (43) des Etalons (41). Ein mit Öffnungen (44) versehener Zerodurring (45) hält die beiden Reflexionsflächen (42) und (43) in wohldefiniertem bekanntem Abstand. Die in der Amplitude des durch die teilreflektierende Reflexionsfläche (43) hindurchtretenden Lichtes enthaltene Information über die im Etalon herrschenden Umweltbedingungen wird über einen Photodetektor (60) erfaßt, der über eine elektrische Leitung (52) an eine Regel- bzw. Auswerteinrichtung angeschlossen ist.

Um von Intensitätsschwankungen der Laserlichtquelle unabhängig zu sein, ist es günstig, auch deren Intensität zu erfassen und das Interferenzsignal aus dem Etalon (41) in Relation zu diesem Referenzsignal zu bewerten. Mit dem in Fig. 3 dargestellten Ausführungsbeispiel ist dies möglich. Ein X-Faserkoppler (61) ist mit seinem ersten Anschluß (61a) an eine Licht aus der Laserlichtquelle führende Lichtleitfaser (62) angeschlossen. Das dem Faserkoppler (61) zugeführte Licht wird auf die an seinem zweiten Anschluß (61b) angeschlossene Lichtleitfaser (46) und die an seinem dritten Anschluß (61c) angeschlossene Lichtleitfaser (63) aufgeteilt. Die Lichtleitfaser (63) führt zu einem Photodetektor (64), der über die Leitung (65) ein von der Lichtintensität der Laserlichtquelle abhängiges elektrisches Referenzsignal abgibt. Das aus dem Etalon (41) stammende Interferenzsignal wird in die Lichtleitfaser (46) zurückgekoppelt und gelangt über den vierten Ausgang (61d) des Faserkopplers (61) in die Lichtleitfaser (66) und von dort auf den Photodetektor (67), der über die Leitung (68) ein elektrisches Interferenzsignal abgibt, das zusammen mit dem auf der Leitung (65) anstehenden elektrischen Signal in einer nicht dargestellten elektronischen Auswerteschaltung bzw. Regelschaltung für die Laserlichtquelle ausgewertet wird. Das Rückkopplungssignal aus dem Etalon (41) gelangt über die Lichtleitfaser (62) als ein von den Umweltbedingungen abhängiges frequenzselektives Rückkopplungssignal zurück zur Laserlichtquelle.

Um die Genauigkeit bei der Erfassung des Interferenzmusters zu erhöhen, können zwei oder mehrere Etalons verschiedener Länge vorgesehen sein, die ausgehend vom kürzesten Etalon eine sukzessive Präzisierung der Interferenzsignalinformation erlauben.

Bei dem in Fig. 4 dargestellten Ausführungsbeispiel sind zwei verschieden lange Etalons (41) und (41') vorgesehen, die im Prinzip so aufgebaut sind wie das in Fig. 1 dargestellte Etalon. Das über die Glasfaser (69) zugeführte Licht wird in einem Strahlteiler (70) auf die Lichtleitfasern (46) und (46') aufgeteilt. Das kürzere Etalon weist zwei von einem mit Öffnungen (44) versehenen Abstandsring (45) gehaltene teilreflektierende Reflexionsflächen (42) und (43) auf. Das Ende der monomodalen Glasfaser (46) wird von einem an einem Abstandhalter (48) montierten Halteteil (47) gehalten, der die Glasfaser auf einen Teil ihrer Länge umgibt. In der Brennebene der in nicht dargestellter Weise gehaltenen Linse (49) entsteht ein Interferenzringsystem, das vom Photodetektor (50) erfaßt wird.

Das längere Etalon (41') ist im Prinzip gleich aufgebaut wie das kürzere Etalon (41), die entsprechenden Bauteile tragen daher dieselben, jedoch mit einem Strich versehenen Bezugsziffern wie die für das Etalon (41) verwendeten.

Das in Fig. 4 gezeigte Stufenetalon ist in einem Gehäuse (71) untergebracht, das Öffnungen (72) und (72') aufweist, die ein Kommunizieren der Etaloninnenräume mit der Umgebungsluft erlauben.

Durch den interferometrischen Vergleich mit einer nominell statischen Maßverkörperung (Etalon) ist man in der Lage, die Einflüsse der Umwelt auf die Brechzahl der Luft zu erfassen bzw. zu kompensieren. Allerdings läßt sich ein vollkommen statisches Etalon nur schwer verwirklichen, da die Länge dieses Längennormals (des Abstandhalters im Luftspaltetalon) selbst von den Einflüssen der Umwelt, insbesondere von der Temperatur abhängt. Durch Verwendung geeigneter Materialien wie spezielle Glaskeramiken mit sehr geringem Wärmeausdehnungskoeffizienten läßt sich der Effekt des Umwelteinflusses auf das Etalon kleiner als 10^{-6} halten. Während diese, sich hauptsächlich aus der Temperaturabhängigkeit des Etalons erklärende verbleibende Ungenauigkeit für kurze Meßstrecken noch tolerierbar ist, kann diese Ungenauigkeit bei Meßstrecken im Bereich von Metern bereits zu groß sein.

Der naheliegende Gedanke, die Temperatur des Etalons zu stabilisieren, so wie es z. B. bei frequenzstabilen Argon-Ionen-Lasern gemacht wird, führt hier nicht weiter, denn dann wäre die Temperatur der Luft im Etalon und auf der eigentlichen Meßstrecke nicht gleich, damit wäre auch die Wellenlänge nicht gleich und die Messung würde verfälscht sein.

Eine Verbesserung in der Meßgenauigkeit läßt sich nun dadurch erreichen, daß man die Forderung nach der absoluten Stabilität des Längennormals (Etalon) fallenläßt und einfach die Temperatur des Etalons, genauer des Abstandhalters der beiden Reflexionsflächen (42) und (43) mißt. Dazu kann, wie in Fig. 5 dargestellt, in einer Bohrung des Abstandhalters (45) ein Temperatursensor (80) angeordnet sein. Aus der bekannten Abhängigkeit der Etalonlänge von der Temperatur läßt sich dann das Ergebnis der Längenmessung korrigieren. Bei diesem Verfahren zur Erhöhung der Meßgenauigkeit kommt es weniger auf einen geringen Ausdehnungskoeffizienten des verwendeten Materials für den Abstandhalter im Etalon an, als vielmehr auf einen bekannten Längenausdehnungskoeffizienten. Es lassen sich daher auch kostengünstigere Materialien mit höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten verwenden. Zur Messung der Temperatur eignen sich insbesondere Quarz-Temperatur-Sensoren

(80), die über Leitungen (81) in einen elektrischen Oszillatorkreis eingebaut sind, dessen temperaturabhängige Resonanzfrequenz erfaßt wird. Günstig sind insbesondere Stimmgabel-Quarزشwinger, welche eine starke und nahezu lineare Frequenz-Temperaturcharakteristik aufweisen. Diese Quarزشwinger lassen sich mit einer einfachen Oszillatorschaltung ansteuern. Wesentliche Eigenschaften eines solchen Temperaturmeßsystems sind eine geringe Leistungsaufnahme, eine gute Langzeitstabilität und kleine Abmessungen.

Bei der Längenmessung an Werkstücken eines bestimmten Materials bestünde eine Möglichkeit, die thermische Ausdehnung des Etalons zu kompensieren, auch darin, den Abstandhalter des Etalons aus demselben Material wie das Werkstück herzustellen. Dann braucht man die thermische Ausdehnung des Werkstückes nicht herauszurechnen, vielmehr wird diese automatisch kompensiert, da die temperaturbedingte relative Längenänderung des Werkstückes und des Etalons bei gleicher Temperatur gleich ist.

Gegenüber der in Fig. 1 dargestellten Etalonanordnung unterscheidet sich die in Fig. 5 schematisch dargestellte Etalonanordnung noch dadurch, daß zwischen dem Ende der monomodalen Glasfaser (46) und dem Etalon (41) eine Linse angeordnet ist, die die Divergenz des aus der Glasfaser (46) austretenden Lichtes verkleinert und das ganze Licht auf einen außermittigen Teil (schraffierter Bereich (83)) des Ringsystems konzentriert. Das nach der Linse (82) nahezu kollineare Lichtstrahlenbündel tritt dabei unter einem kleinen Winkel zum Lot auf die beiden Reflexionsflächen (42) und (43) (also leicht schräg) ins Etalon (41) ein. Im Gegensatz zu einer vollkommen divergenten Beleuchtung des Etalons, bei der man ein Ringsystem erhält, wie es mit strichlierten Kreisen (84) angedeutet ist, erzielt man durch die Anordnung in Fig. 5 eine erhöhte Lichtintensität im Bereich (83), in dem dann eine in Fig. 5 nicht dargestellte Differentialphotodiode angeordnet sein kann. Durch diese bei nahezu kollinear beleuchtetem Etalon erzielte lokale Intensitätserhöhung ist eine sichere und zuverlässige Erfassung der Lage des transversalen Interferenzmusters durch die Differentialphotodiode möglich.

Bei den gezeigten Ausführungsbeispielen wird das aus dem bzw. den Etalon(en) gewonnene Interferenzsignal dazu verwendet, um in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen die Frequenz der Lichtquelle gerade so zu verstellen, daß die Luftwellenlänge konstant bleibt. Diese Konstanzhaltung der Luftwellenlänge vereinfacht die "Ablesung" der aus dem Etalon stammenden Interferenzsignale. Grundsätzlich ist es jedoch auch möglich, die Luftwellenlänge bzw. Brechzahl des Umgebungsmediums, beispielsweise über ein hinter dem durchstrahlten Etalon angeordnetes Diodenfeld laufend zu erfassen und dann in einer elektronischen Auswerterschaltung rechnerisch zu kompensieren.

Die Erfindung ist nicht auf die konstruktiven Lösungen der dargestellten Ausführungsbeispiele beschränkt. Für den Aufbau des Etalons und des Anschlusses der Lichtleitfaser ans Etalon sind zahlreiche konstruktive Lösungen denkbar und möglich.

PATENTANSPRÜCHE

1. Interferometeranordnung, insbesondere zur Entfernungs- bzw. Verschiebewegbestimmung eines beweglichen Bauteiles, mit einer Laserlichtquelle mit zumindest einem Strahlteiler zur Aufteilung von aus der Laserlichtquelle stammendem Licht in einen Meßstrahl und einen Referenzstrahl, mit einer Rekombinationseinrichtung, an der der über Referenzstrecke geführte Referenzstrahl und der eine teilweise in einem gasförmigen Umgebungsmedium verlaufende und über einen beweglichen Meßspiegel führende Meßstrecke durchlaufende Meßstrahl interferieren, und mit einer wenigstens einen Photodetektor aufweisenden Detektoreinrichtung zur Analyse zumindest eines aus der Rekombinationseinrichtung stammenden optischen Interferenzsignals, wobei die Interferometeranordnung zur Erfassung bzw. Kompensation von variablen Umweltbedingungen mindestens ein statisches über einen Lichtwellenleiter mit Licht aus der Laserlichtquelle beleuchtetes Etalon bekannter Länge aufweist, dessen zwischen den Reflexionsflächen liegender Raumbereich mit dem Umgebungsmedium kommuniziert, dadurch gekennzeichnet, daß der Lichtwellenleiter, an den das bzw. die Etalon(e) (41 bzw. 41') angeschlossen ist bzw. sind, eine Licht aus der Laserlichtquelle (2) führende, flexible Lichtleitfaser (46 bzw. 46') ist.

2. Interferometeranordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß jede an ein Etalon angeschlossene, flexible Lichtleitfaser (46, 46') ein an sich bekannter Einmodenwellenleiter, vorzugsweise eine monomode Glasfaser ist.

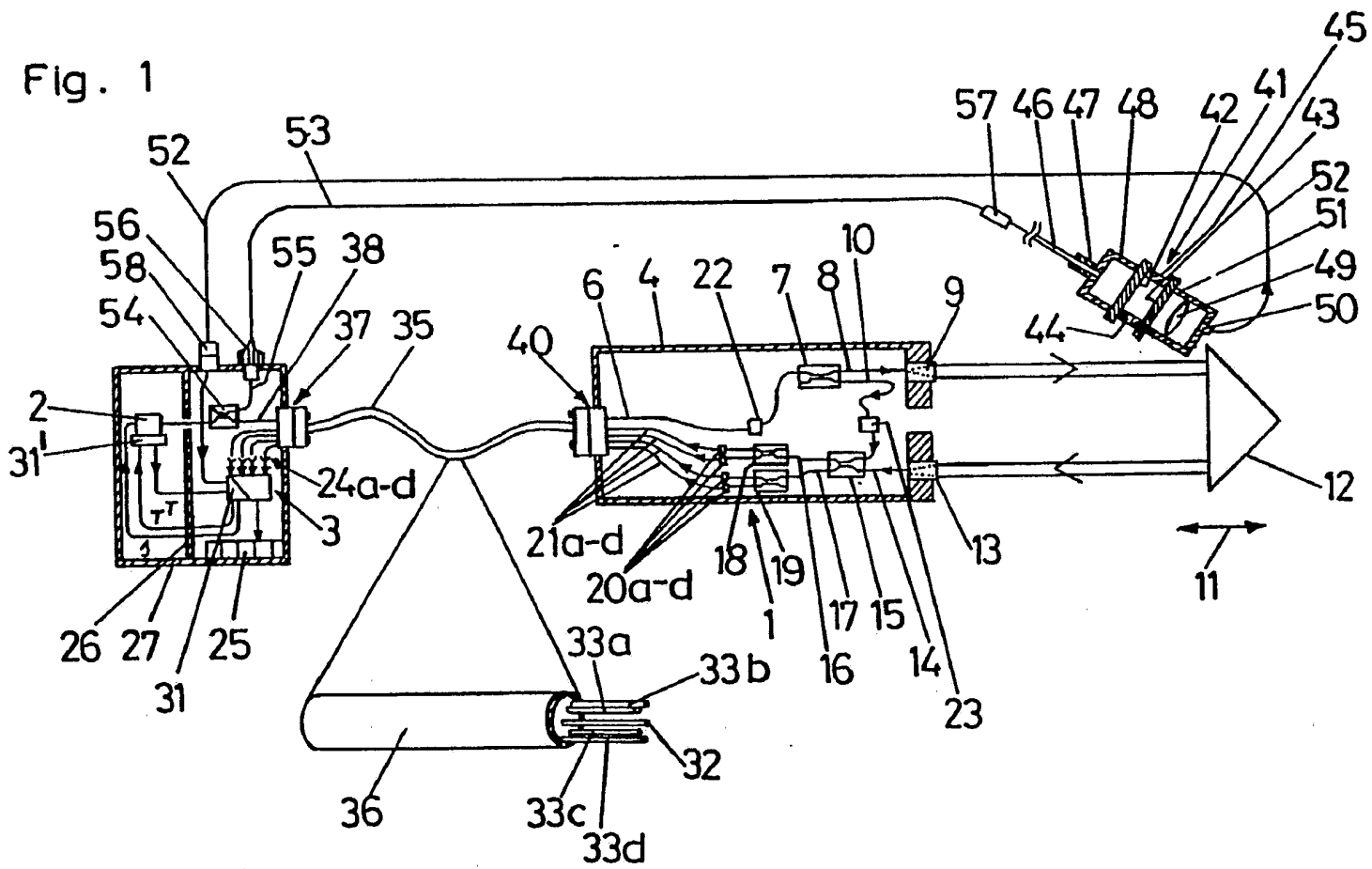
3. Interferometeranordnung nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest eine an ein Etalon (41) angeschlossene Lichtleitfaser (46) an dem dem Etalon abgewandten Ende über einen Faserverbinder (57) mit einer Licht aus der Laserlichtquelle (2) führenden Lichtleitfaser (53) lösbar verbunden ist.

4. Interferometeranordnung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß zwischen der am Etalon (41) angeschlossenen Lichtleitfaser (46) und der Laserlichtquelle (2) eine weitere Lichtleitfaser (53) angeordnet ist, deren lichtquellenseitiges Ende über einen ersten Faserverbinder (56) einer von der Laserlichtquelle (2) kommenden Lichtleitfaser (55) lösbar verbunden ist und deren etalonseitiges Ende über einen zweiten Faserverbinder (57) mit der am Etalon (41) angeschlossenen Lichtleitfaser (46) lösbar verbunden ist.
5. Interferometeranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß die gesamte optische Länge der zwischen Etalon (41) und Lichtquelle (2) liegenden Lichtleitfasern (55, 53, 46) mindestens 1 Meter, vorzugsweise mindestens 10 Meter beträgt.
6. Interferometeranordnung nach Anspruch 4 und 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß die optische Länge der weiteren Lichtleitfaser (53) mindestens 1 Meter, vorzugsweise 10 Meter beträgt.
7. Interferometeranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß zwei oder mehrere offene Etalons (41, 41') verschiedener Länge vorgesehen sind, die jeweils an eine flexible Lichtleitfaser (46 bzw. 46') angeschlossen sind.
8. Interferometeranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß das zum Etalon (41) weisende Faserende in einer vorzugsweise einstellbaren Haltevorrichtung (47) relativ zu den Reflexionsflächen (42, 43) des Etalons (41) justiert ist.
9. Interferometeranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß die das Etalon (41) beleuchtende, vorzugsweise monomode Lichtleitfaser (46) in einem festen bzw. fest einstellbaren Abstand vor der einen Reflexionsfläche (42) des Etalons endet, wobei der divergent aus der Lichtleitfaser (46) austretende Lichtkegel das Etalon (41) beleuchtet.
10. Interferometeranordnung nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß hinter der anderen Reflexionsfläche (43) eine Sammellinse (49) angeordnet ist, in deren Brennebene, vorzugsweise radial außerhalb der optischen Achse, eine das Interferenzsystem erfassende Photodetektoreinheit (50) angeordnet ist.
11. Interferometeranordnung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Photodetektoreinheit eine Differentialphotodiode (50) ist.
12. Interferometeranordnung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß zwischen Lichtleitfaser (46) und Etalon eine die Divergenz des aus der Lichtleitfaser (46) austretenden Lichtkegels verringernde Linse (82) angeordnet ist, und das nahezu kollineare Lichtstrahlenbündel nach der Linse (82) unter einem Winkel zum Lot auf die beiden Reflexionsflächen (42, 43) des Etalons (41) ins Etalon (41) einfällt.
13. Interferometeranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß zwischen dem etalonseitigen Ende der Lichtleitfaser (46) und der einen (42) der beiden Reflexionsflächen (42, 43) des Etalons (41) eine Kollimationslinse (59) angeordnet ist, aus der die Lichtstrahlen parallel zueinander und senkrecht auf die parallelen Reflexionsflächen (42, 43) in den zwischen diesen liegenden Raumbereich des Etalons (41) eintreten.
14. Interferometeranordnung nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Kollimationslinse eine Gradientenindexlinse (59) ist, deren eine ebene Fläche verspiegelt ist und die eine Reflexionsfläche (42) des Etalons bildet.
15. Interferometeranordnung nach Anspruch 13 oder 14, **dadurch gekennzeichnet**, daß hinter der zweiten Reflexionsfläche (43) ein Photodetektor (60) angeordnet ist, der das vom Etalon (41) transmittierte Interferenzsignal erfaßt.
16. Interferometeranordnung nach Anspruch 13 oder 14, **dadurch gekennzeichnet**, daß vor dem Etalon (41) und der Kollimationslinse (59) ein X-Faserkoppler (61) angeordnet ist, dessen erster Anschluß (61a) an eine Licht aus der Laserlichtquelle (2) führende Lichtleitfaser (62) angeschlossen ist, dessen gegenüberliegender zweiter Anschluß (61b) mit der zum Etalon (41) führenden Lichtfaser (46) verbunden ist, dessen dritter, neben diesem zweiten Anschluß liegender Anschluß (61c) mit einer zu einem ersten Photodetektor (64) führenden Lichtleitfaser (63) verbunden ist und dessen vierter, neben dem ersten Anschluß liegender Anschluß (61d) an eine zu einem zweiten Photodetektor (67) führende Lichtleitfaser (66) angeschlossen ist.
17. Interferometeranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Frequenz der Laserlichtquelle (2) in Abhängigkeit von der Brechzahl des zwischen den Reflexionsflächen (42, 43 bzw.

42', 43') des Etalons (41) bzw. der Etalone (41, 41') befindlichen Umgebungsmediums derart verändert wird, daß die im Umgebungsmedium vorhandene Wellenlänge konstant bleibt.

- 5 18. Interferometeranordnung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserlichtquelle eine Laserdiode (2) ist, in deren Laserresonator Licht aus wenigstens einem Etalon (41) in Abhängigkeit von der Brechzahl des zwischen den Reflexionsflächen (42, 43 bzw. 42', 43') des Etalons (41) bzw. der Etalone (41, 41') befindlichen Umgebungsmediums frequenzselektiv zurückgekoppelt wird.
- 10 19. Interferometeranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß das Etalon einen Temperatursensor (80) zur Erfassung der Temperatur des Abstandhalters (45) der beiden Reflexionsflächen (42, 43) aufweist.
- 15 20. Interferometeranordnung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß der Temperatursensor in eine Bohrung im Abstandhalter (45) eingesetzt ist.
- 20 21. Interferometeranordnung nach Anspruch 19 oder 20, dadurch gekennzeichnet, daß der Temperatursensor ein in einem elektrischen Oszillatorkreis angeordneter Quarzschwinger-Temperatursensor, insbesondere ein Stimmgabel-Quarzschwinger (45) ist.

Hiezu 4 Blatt Zeichnungen



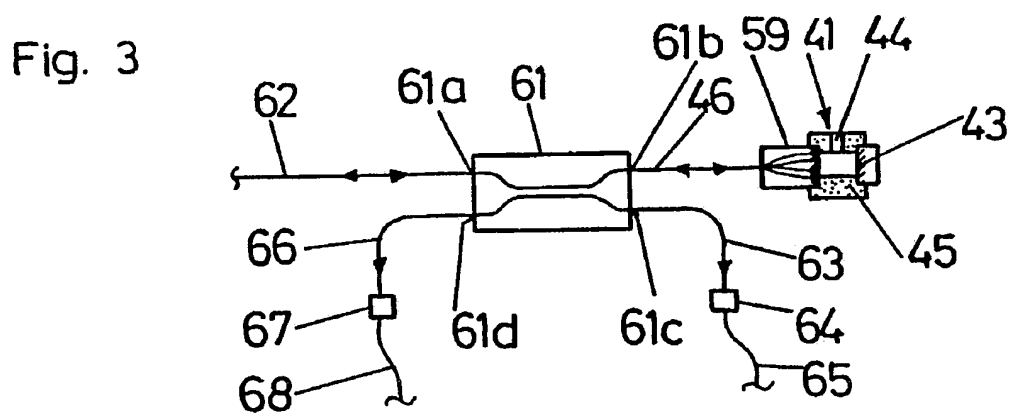
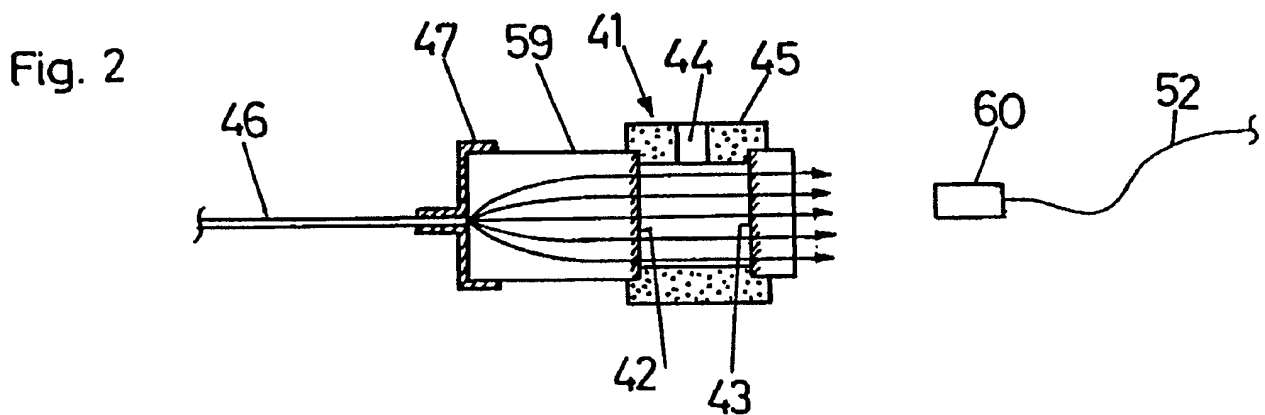


Fig. 4

