

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
16. Dezember 2010 (16.12.2010)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2010/142758 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01S 17/36 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2010/058139

(22) Internationales Anmeldedatum:
10. Juni 2010 (10.06.2010)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
102009024460.3 10. Juni 2009 (10.06.2009) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **CARL ZEISS AG** [DE/DE]; Carl-Zeiss-Str. 22, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **SPRUCK, Bernd** [DE/DE]; Lehrer-Lipp-Straße 9, 73563 Mögglingen (DE). **HÖLLER, Frank** [DE/DE]; Milanweg 25, 73434 Aalen (DE). **ALVAREZ DIEZ, Cristina** [DE/DE]; Jahnstr. 35, 73431 Aalen (DE).

(74) Anwalt: **BERTSCH, Florian**; Thomas-Wimmer-Ring 15, 80539 München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(54) Title: EVALUATION DEVICE, MEASURING ARRANGEMENT AND METHOD FOR PATH LENGTH MEASUREMENT

(54) Bezeichnung : AUSWERTEEINRICHTUNG, MESSANORDNUNG UND VERFAHREN ZUR WEGLÄNGENMESSUNG

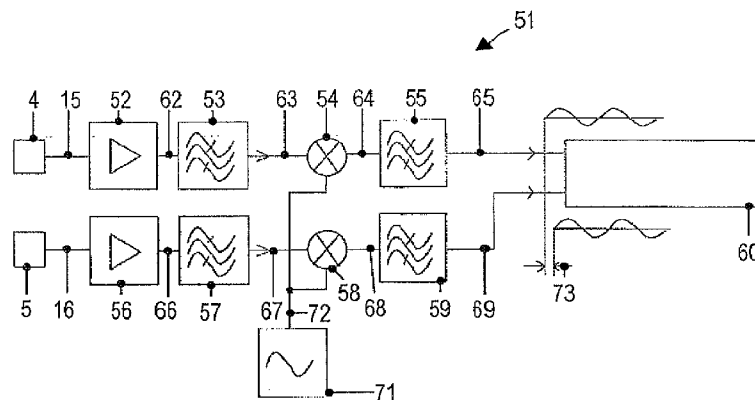


Fig. 5

(57) Abstract: An evaluation device (51) for path length measurement is adapted to evaluate a measured signal (15) which represents an intensity of a sequence of pulses of electromagnetic radiation as a function of time. The sequence of pulses has a repetition rate. The evaluation device (51) is adapted to evaluate a phase difference between a component (63) of the measured signal (15), which component oscillates with a first frequency, and a reference signal (67) which oscillates with said frequency. The evaluation device (51) produces, for example by frequency mixing, a first signal (65) and a second signal (69) having a second phase difference (73) in such a manner that the first signal (65) and the second signal (69) each oscillates with another frequency that is different from the frequency, and such that the second phase difference (73) has a predetermined relation to the phase difference (47).

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2010/142758 A1



Eine Auswerteeinrichtung (51) für eine Weglängenmessung ist eingerichtet, um ein Messsignal (15), das eine Intensität einer Folge von Pulsen elektromagnetischer Strahlung als Funktion der Zeit repräsentiert, auszuwerten. Die Folge von Pulsen weist eine Repetitionsrate auf. Die Auswerteeinrichtung (51) ist eingerichtet, um eine Phasendifferenz zwischen einer mit einer Frequenz oszillierenden Komponente (63) des Messsignals (15) und einem mit der Frequenz oszillierenden Referenzsignal (67) zu bestimmen. Dazu erzeugt die Auswerteeinrichtung (51), beispielsweise durch Frequenzmischung, ein erstes Signal (65) und ein zweites Signal (69) mit einer weiteren Phasendifferenz (73) derart, dass das erste Signal (65) und das zweite Signal (69) jeweils mit einer weiteren Frequenz oszilliert, die von der Frequenz verschieden ist, und dass die weitere Phasendifferenz (73) eine vorgegebene Beziehung zu der Phasendifferenz (47) aufweist.

Auswerteeinrichtung, Messanordnung und Verfahren zur Weglängenmessung

5

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Auswerteeinrichtung, eine Messanordnung und ein Verfahren zur Weglängenmessung. Insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung eine Auswerteeinrichtung, eine Messanordnung und ein Verfahren zur Weglängenmessung unter Verwendung optischer Messverfahren.

10

Die Messung von Entfernungen hat zahlreiche Anwendungsgebiete, beispielsweise bei der Steuerung oder Regelung von verschiedenen Maschinen und Geräten in der Industrie, Medizin oder Unterhaltungsbranche. Messungen von Entfernungen eines Objekts relativ zu mehreren Referenzpositionen oder von mehreren Punkten eines Objekts zu einer Referenzposition erlauben die Bestimmung der Position eines Objekts in einem zwei- oder dreidimensionalen Raum, die beispielsweise in der Fertigungstechnik oder Qualitätskontrolle zahlreiche Anwendungen findet.

15

Entfernungen können durch die Messung einer von elektromagnetischer Strahlung, beispielsweise Licht, zurückgelegten Weglänge bestimmt werden. Dazu durchläuft die elektromagnetische Strahlung die Strecke zwischen einer Referenzposition und dem Objekt einmal oder mehrfach, so dass aus der von der Strahlung zurückgelegten Weglänge die Entfernung ableitbar ist.

20

Die Realisierung von Vorrichtungen und Verfahren, bei denen Entfernungen oder Objektpositionen in Räumen von einigen Metern Länge mit einer Genauigkeit im Bereich einiger Mikrometer oder einiger zehn Mikrometer bestimmt wird, stellt eine technische Herausforderung dar. Dies gilt insbesondere, wenn Positionen mit einer hohen Rate und kurzen Signalverarbeitungszeit bestimmt werden sollen, um eine Positionsbestimmung nahezu in Echtzeit zu ermöglichen.

30

Laserweglängenmessgeräte erlauben die Bestimmung eines Abstands eines Objekts. In K. Minoshima and H. Matsumoto, „High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser“, Applied Optics, Vol. 39, No. 30, pp. 5512-5517 (2000) wird eine Distanzmessung unter Verwendung von Frequenzkammen beschrieben. Bei diesem Messverfahren wird die Phasenlage einer Signalkomponente der Intensität des Laserstrahl-Frequenzkamms nach Durch-

35

laufen der Strecke zwischen Lichtquelle, Objekt und Detektor ausgewertet, um die von dem Laserstrahl zurückgelegte Weglänge zu ermitteln. Dazu wird die Signal-
komponente derart gewählt, dass sie mit einer Frequenz oszilliert, die einem typi-
scherweise großen Vielfachen der Repetitionsrate des Laserstrahls entspricht. Ent-
sprechend hohe Anforderungen sind an die Auswerteelektronik zu stellen, die in der
5 Lage sein muss, Signale mit Frequenzen zu verarbeiten, insbesondere zu mischen,
die typischerweise im Bereich von mehreren 10 GHz liegen. Ähnlich hohe Anforde-
rungen bestehen an die verwendeten Fotodetektoren, die in der Lage sein müssen,
Änderungen der empfangenen Intensität mit Frequenzen im Bereich von mehreren
10 10 GHz zu erfassen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine verbesserte Auswerteeinrichtung,
eine verbesserte Messanordnung und verbessertes Verfahren zur Weglängenmes-
sung anzugeben. Insbesondere liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine Aus-
werteeinrichtung, eine Messanordnung und ein Verfahren anzugeben, die bzw. das
15 eine schnelle Positionsbestimmung mit guter Ortsauflösung erlaubt.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe gelöst durch eine Auswerteeinrichtung, eine
Messanordnung und ein Verfahren, wie sie in den unabhängigen Ansprüchen ange-
geben sind. Die abhängigen Ansprüche definieren vorteilhafte oder bevorzugte Aus-
führungsbeispiele.
20

Nach einem Aspekt wird eine Auswerteeinrichtung für eine Weglängenmessung an-
gegeben. Die Auswerteeinrichtung ist zur Verwendung für eine Weglängenmessung
25 eingerichtet, bei der eine Folge von Pulsen elektromagnetischer Strahlung, insbe-
sondere eine Folge von Lichtpulsen, eine zu messende Weglänge durchläuft, wobei
die Folge von Pulsen eine Repetitionsrate aufweist. Die Auswerteeinrichtung ist ein-
gerichtet, um ein Messsignal auszuwerten, das eine Intensität der Folge von Pulsen
nach Durchlaufen der zu messenden Weglänge als Funktion der Zeit repräsentiert.
30 Die Auswerteeinrichtung ist zum Ermitteln einer Phasendifferenz zwischen einer mit
einer Frequenz oszillierenden Komponente des Messsignals und einem mit der Fre-
quenz oszillierenden Referenzsignal eingerichtet, wobei die Frequenz der Repetiti-
onsrate oder einem Vielfachen der Repetitionsrate entspricht. Die Auswerteeinrich-
tung ist eingerichtet, um zum Ermitteln der Phasendifferenz ein erstes Signal und ein
35 zweites Signal mit einer weiteren Phasendifferenz derart zu erzeugen, dass das ers-
te Signal und das zweite Signal jeweils mit einer weiteren Frequenz oszilliert, die von

der Frequenz verschieden ist, und dass die weitere Phasendifferenz eine vorgegebene Beziehung zu der Phasendifferenz aufweist.

5 Als mit einer Frequenz oszillierende Komponente des Messsignals wird hierbei eine spektrale Komponente des Messsignals, d.h. der erfassten Lichtintensität als Funktion der Zeit, bezeichnet. Beispielsweise kann die mit der Frequenz oszillierende Komponente die der entsprechenden Frequenz zugeordnete Komponente in einer Fourier-Darstellung des Messsignals sein. Unter einem „Vielfachen der Repetitionsrate“ wird ein ganzzahliges Vielfaches der Repetitionsrate verstanden.

10

Da die Auswerteeinrichtung das erste Signal und das zweite Signal derart erzeugt, dass die weitere Frequenz von der Frequenz des Messsignals verschieden ist, kann die weitere Phasendifferenz durch Auswertung des ersten Signals und des zweiten Signals ermittelt werden, die bei der weiteren Frequenz oszillieren. Dies erlaubt es, 15 die weitere Frequenz nach den jeweiligen Anforderungen an die Messgenauigkeit und verfügbare Phasemesser geeignet zu wählen.

Die Auswerteeinrichtung kann eingerichtet sein, um das erste Signal und das zweite Signal derart zu erzeugen, dass die weitere Phasendifferenz gleich der Phasendifferenz 20 zwischen der Komponente des Messsignals und dem Referenzsignal ist. Insbesondere impliziert der Begriff „weitere Phasendifferenz“ nicht, dass die weitere Phasendifferenz einen von der Phasendifferenz verschiedenen Wert aufweisen muss. Wenn die weitere Phasendifferenz gleich der Phasendifferenz ist, kann durch Ermittlung der weiteren Phasendifferenz unmittelbar die Phasendifferenz ermittelt werden, 25 die ein Maß für die von der Folge von Pulsen durchlaufene Weglänge angibt.

Die Auswerteeinrichtung kann eingerichtet sein, um das erste Signal und das zweite Signal derart zu erzeugen, dass die weitere Frequenz, mit der das erzeugte erste Signal und das erzeugte zweite Signal oszillieren, kleiner als die Frequenz ist. Die 30 Auswerteeinrichtung kann insbesondere eingerichtet sein, um das erste Signal und das zweite Signal derart zu erzeugen, dass die weitere Frequenz, mit der das erzeugte erste Signal und das erzeugte zweite Signal oszillieren, kleiner als die Repetitionsrate ist. Aufgrund der im Vergleich zu der Frequenz der Komponente des Messsignals kleineren Frequenz des ersten und zweiten Signals kann die Ermittlung der 35 weiteren Phasendifferenz an langsamer oszillierenden Signalen durchgeführt werden, beispielsweise durch Messung eines zeitlichen Versatzes zwischen dem ersten Signal und dem zweiten Signal.

Die Auswerteeinrichtung kann eingerichtet sein, um das erste Signal durch Abwärtsmischen der Komponente des Messsignals zu erzeugen. Die Auswerteeinrichtung kann auch eingerichtet sein, um das zweite Signal durch Abwärtsmischen des Referenzsignals zu erzeugen. Unter einem „Abwärtsmischen“ eines gegebenen Signals wird insbesondere ein Vorgang verstanden, bei dem das gegebene Signal einer Frequenzmischung unterzogen wird, um ein weiteres, mit kleinerer Frequenz oszillierendes Signal zu erzeugen. Ein Ausgangssignal der Frequenzmischung kann einer Band- oder Tiefpassfilterung unterzogen werden, um das mit einer kleineren Differenzfrequenz oszillierende Signal aus dem Mischprodukt zu erhalten. Die Auswerteeinrichtung kann eingerichtet sein, um zum Erzeugen des ersten Signals und des zweiten Signals die Komponente des Messsignals bzw. das Referenzsignal jeweils mit demselben dritten oszillierenden Signal zu mischen.

Die Auswerteeinrichtung kann einen Signalverarbeitungspfad für das Messsignal und einen weiteren Signalverarbeitungspfad für das Referenzsignal aufweisen, um das erste Signal und das zweite Signal zu erzeugen.

Der Signalverarbeitungspfad für das Messsignal kann einen Mischer aufweisen, um zum Erzeugen des ersten Signals die Komponente des Messsignals mit einem dritten oszillierenden Signal zu mischen. Der Signalverarbeitungspfad kann ein Filter zum Filtern eines Ausgangssignals des Mixers aufweisen, das insbesondere ein Bandpass- oder Tiefpassfilter sein kann. Das Filter kann einen Durchlassbereich aufweisen, der eine Frequenz umfasst, die kleiner als die Repetitionsrate ist.

Der Signalverarbeitungspfad kann wenigstens einen zweiten Mischer aufweisen, um zum Erzeugen des ersten Signals ein Ausgangssignal des Mixers mit einem vierten oszillierenden Signal zu mischen. Auf diese Weise kann das erste Signal erzeugt werden, indem die Komponente des Messsignals in mehreren Stufen abwärts gemischt wird. Beispielsweise kann zunächst ein Signal in einem Zwischenfrequenzbereich erzeugt werden, das dem wenigstens einen zweiten Mischer zugeführt wird.

Der weitere Signalverarbeitungspfad für das Referenzsignal kann einen weiteren Mischer aufweisen, um zum Erzeugen des zweiten Signals das Referenzsignal mit dem dritten oszillierenden Signal zu mischen. Der weitere Signalverarbeitungspfad kann ein weiteres Filter zum Filtern eines Ausgangssignals des weiteren Mixers aufweisen.

Der weitere Signalverarbeitungspfad kann wenigstens einen weiteren zweiten Mischer aufweisen, um zum Erzeugen des zweiten Signals ein Ausgangssignal des weiteren Mixers mit dem vierten oszillierenden Signal zu mischen. Auf diese Weise kann das zweite Signal durch Abwärtsmischen des Referenzsignals in mehreren Stufen, das heißt über einen Zwischenfrequenzbereich, erzeugt werden.

Das dritte oszillierende Signal kann eine Frequenz aufweisen, die derart gewählt ist, dass ein Quotient aus der Frequenz des dritten oszillierenden Signals und der Repetitionsrate keine ganze Zahl ist. Dadurch können das erste und zweite oszillierende Signal derart erzeugt werden, dass die weitere Frequenz kleiner als die Repetitionsrate wählbar ist.

Die Auswerteeinrichtung kann eingerichtet sein, um das dritte oszillierende Signal aus dem Referenzsignal zu erzeugen. Dazu kann ein Frequenzteiler vorgesehen sein, der eingangsseitig mit Signalverarbeitungspfad oder dem weiteren Signalverarbeitungspfad gekoppelt ist, um das dritte oszillierende Signal mit einer Frequenz zu erzeugen, die kein Vielfaches der Repetitionsrate ist. Der Frequenzteiler kann als digitaler Frequenzteiler ausgebildet sein.

Die Auswerteeinrichtung kann eine Phasenmesseinrichtung mit Eingängen für das erste Signal und das zweite Signal zum Ermitteln der weiteren Phasendifferenz umfassen. Die Phasenmesseinrichtung kann eingerichtet sein, um zum Ermitteln der weiteren Phasendifferenz eine Zeit zwischen einem Nulldurchgang des ersten Signals und einem Nulldurchgang des zweiten Signals zu messen. Dazu kann beispielsweise ein erster Komparator oder Begrenzer-Verstärker und ein zweiter Komparator oder Begrenzer-Verstärker vorgesehen sein, um Nulldurchgänge des ersten Signals bzw. des zweiten Signals zu erfassen, und ein Zähler kann vorgesehen sein, um eine Anzahl von Impulsen eines Taktsignals zwischen den erfassten Nulldurchgängen des ersten und zweiten Signals zu bestimmen. Aus der erfassten Zahl von Zählimpulsen zwischen den Nulldurchgängen und der weiteren Frequenz des ersten und zweiten Signals ist die weitere Phasendifferenz bestimmbar. Die Phasenmeseinrichtung kann auch einen Zeit-Digital-Wandler umfassen.

Nach einem weiteren Aspekt wird eine Messanordnung zur Weglängenmessung angegeben. Die Messanordnung umfasst einen Detektor, der eingerichtet ist, um eine Intensität einer Folge von Pulsen elektromagnetischer Strahlung, insbesondere einer

Folge von Lichtpulsen, nach Durchlaufen einer zu messenden Weglänge als Funktion der Zeit zu erfassen, wobei die Folge von Pulsen eine Repetitionsrate aufweist. Der Detektor ist eingerichtet, um ein die erfasste Intensität repräsentierendes Messsignal bereitzustellen. Die Messanordnung umfasst weiterhin eine Auswerteeinrichtung, die mit dem Detektor gekoppelt ist, um das von dem Detektor bereitgestellte Messsignal zu verarbeiten, wobei die Auswerteeinrichtung als Auswerteeinrichtung nach einem Aspekt oder Ausführungsbeispiel der Erfindung ausgebildet ist.

Die Messanordnung kann eine Lichtquelle zum Erzeugen der Folge von Pulsen umfassen. Die Lichtquelle kann einen Laser, insbesondere einen Kurzpulslaser, umfassen. Die Lichtquelle kann einen Frequenzkammgenerator umfassen. Frequenzkämme können eine hohe Frequenz- und Phasenstabilität aufweisen und sind daher als Lichtquellen zur Abstandsmessung geeignet.

In der Messanordnung kann das Referenzsignal auf verschiedene Weisen bereitgestellt werden. Beispielsweise kann die Lichtquelle eingerichtet sein, um ein eine Intensität der von ihr erzeugten Folge von Pulsen als Funktion der Zeit repräsentierendes Ausgangssignal auszugeben, wobei die Auswerteeinrichtung mit der Lichtquelle gekoppelt und eingerichtet ist, um aus dem Ausgangssignal der Lichtquelle das Referenzsignal zu erzeugen. Die Messanordnung kann auch einen weiteren Detektor umfassen, der eingerichtet ist, um eine Intensität der erzeugten Folge von Pulsen als Funktion der Zeit an einer Referenzposition zu erfassen. Die Auswerteeinrichtung kann dann mit dem weiteren Detektor gekoppelt und eingerichtet sein, um aus einem Ausgangssignal des weiteren Detektors das Referenzsignal zu erzeugen. Es kann ein Strahlteiler vorgesehen sein, der im Strahlenweg der von der Lichtquelle erzeugten Folge von Pulsen anordenbar ist, um einen Referenzstrahl zu dem weiteren Detektor zu lenken, während ein Messstrahl die zu messende Weglänge durchläuft.

Nach einem weiteren Aspekt wird ein Verfahren zur Weglängemessung angegeben. Bei dem Verfahren wird ein Messsignal, das eine Intensität einer Folge von Pulsen elektromagnetischer Strahlung, insbesondere einer Folge von Lichtpulsen, nach Durchlaufen einer zu messenden Weglänge als Funktion der Zeit repräsentiert, erfasst und ausgewertet. Das Verfahren umfasst ein Ermitteln einer Phasendifferenz zwischen einer mit einer Frequenz oszillierenden Komponente des Messsignals und einem mit der Frequenz oszillierenden Referenzsignal, wobei die Frequenz der Repetitionsrate oder einem Vielfachen der Repetitionsrate entspricht. Um die Phasendifferenz zu ermitteln, werden ein erstes Signal und ein zweites Signal derart er-

zeugt, dass das erste Signal und das zweite Signal jeweils mit einer weiteren Frequenz oszilliert, die von der Frequenz verschieden ist, und dass das erste Signal und das zweite Signal eine weitere Phasendifferenz aufweisen, die in einer vorgegebenen Beziehung zu der Phasendifferenz steht.

5

Da das erste Signal und das zweite Signal derart erzeugt werden, dass die weitere Frequenz von der Frequenz des Messsignals verschieden ist, kann die weitere Phasendifferenz durch Auswertung des ersten Signals und des zweiten Signals ermittelt werden, die bei der weiteren Frequenz oszillieren. Da die weitere Phasendifferenz in einer vorgegebenen Beziehung zu der Phasendifferenz zwischen der Komponente des Messsignals und dem Referenzsignal steht, ist die Phasendifferenz aus der weiteren Phasendifferenz bestimmbar.

10

Das erste Signal und das zweite Signal können derart erzeugt werden, dass die weitere Phasendifferenz gleich der Phasendifferenz zwischen der Komponente des Messsignals und dem Referenzsignal ist.

15

Das erste Signal und das zweite Signal können so erzeugt werden, dass die weitere Frequenz, mit der das erzeugte erste Signal und das erzeugte zweite Signal oszillieren, kleiner als die Frequenz ist. Insbesondere kann die weitere Frequenz kleiner als die Repetitionsrate der Folge von Pulsen elektromagnetischer Strahlung sein.

20

Die Komponente des Messsignals kann abwärts gemischt werden, um das erste Signal zu erzeugen. Die Komponente des Messsignals kann in mehreren Stufen abwärts gemischt werden. Beispielsweise kann die Komponente des Messsignals abwärts gemischt werden, um ein Signal in einem Zwischenfrequenzbereich zu erzeugen, und das Signal in dem Zwischenfrequenzbereich kann weiter abwärts gemischt werden, um das erste Signal zu erzeugen.

25

Das Referenzsignal kann abwärts gemischt werden, um das zweite Signal zu erzeugen. Das Referenzsignal kann in mehreren Stufen abwärts gemischt werden.

30

Die Komponente des Messsignals und das Referenzsignal können jeweils mit einem dritten oszillierenden Signal gemischt werden, um das erste Signal und das zweite Signal durch Abwärtsmischen zu erzeugen. Eine Frequenz des dritten oszillierenden Signals kann derart gewählt werden, dass die Frequenz des dritten oszillierenden Signals kein Vielfaches der Repetitionsrate ist. Insbesondere kann die Frequenz des

35

dritten oszillierenden Signals so gewählt werden, dass ein Quotient aus der Frequenz des dritten oszillierenden Signals und der Repetitionsrate keine ganze Zahl ist.

5 Die weitere Phase kann ermittelt werden, indem eine Zeitdifferenz zwischen Null-durchgängen des erste Signals und des zweiten Signals ermittelt wird.

Die Folge von Pulsen elektromagnetischer Strahlung kann mit einem Kurzpuls laser erzeugt werden. Insbesondere kann der Kurzpuls laser als Frequenzkammgenerator eingerichtet werden.

10

Bei dem Verfahren kann das Messsignal mit der Auswerteeinrichtung nach einem Aspekt oder Ausführungsbeispiel der Erfindung ausgewertet werden. Das Verfahren kann mit der Messanordnung nach einem Aspekt oder Ausführungsbeispiel durchgeführt werden.

15

Die Auswerteeinrichtung, die Messanordnung und das Verfahren nach den verschiedenen Aspekten und Ausführungsbeispielen kann eingerichtet sein, um einen Abstand eines Objekts zu einer Referenzposition zu ermitteln. Dazu kann eine Anordnung gewählt werden, bei der die Folge von Pulsen elektromagnetischer Strahlung den Weg zwischen Referenzposition und Objekt zweimal durchläuft. Beispielsweise kann an dem Objekt ein Reflektor vorgesehen sein, um die Folge von Pulsen elektromagnetischer Strahlung zu reflektieren. Es kann auch eine Anordnung gewählt werden, bei der der Detektor an dem Objekt vorgesehen ist oder die Folge von Lichtpulsen von dem Objekt aus abgestrahlt wird.

20

Die Auswerteeinrichtung, die Messanordnung und das Verfahren nach den verschiedenen Aspekten und Ausführungsbeispielen kann auch eingesetzt werden, um die Abstände eines Objekts von mehreren Referenzpositionen zu bestimmen, oder um die Abstände von mehreren voneinander beabstandeten Bereichen des Objekts zu einer Referenzposition zu bestimmen. Beispielsweise durch Trilateration kann dann aus den ermittelten Abständen die Position und/oder Ausrichtung des Objekts im Raum bestimmt werden. Beispielsweise kann die Auswerteeinrichtung, die Messanordnung und das Verfahren nach den verschiedenen Aspekten und Ausführungsbeispielen zur Positionsbestimmung bei den in der DE 10 2008 045 387 und DE 10 2008 045 386 beschriebenen Anwendungen eingesetzt werden. Die Auswerteeinrichtung, die Messanordnung und das Verfahren nach den verschiedenen Aspekten und Ausführungsbeispielen kann auch zur Positionsbestimmung eines Tastkopfes

25

30

35

einer Koordinatenmessmaschine verwendet werden, wie sie in der am selben Tag eingereichten deutschen Patentanmeldung „Auswerteeinrichtung, Messanordnung und Verfahren zur Weglängenmessung sowie Messanordnung und Verfahren für ein Koordinatenmessgerät und Koordinatenmessgerät“ der Anmelderin beschrieben ist.

5

Die Auswerteeinrichtungen, Messanordnungen und Verfahren nach verschiedenen Ausführungsbeispielen der Erfindung können allgemein zur Weglängenmessung, insbesondere für eine Abstandsmessung oder Positionsbestimmung, eingesetzt werden. Ein beispielhaftes Anwendungsfeld sind Messanwendungen in industriellen Anlagen, beispielsweise in automatisierten Fertigungs- oder Transportanlagen. Jedoch sind die Ausführungsbeispiele der Erfindung nicht auf diese Anwendungen beschränkt.

10

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die beigefügte Zeichnung näher erläutert.

15

Fig. 1 ist eine schematische Darstellung einer Messanordnung nach einem Ausführungsbeispiel.

Fig. 2 ist eine schematische Darstellung einer Messanordnung nach einem weiteren Ausführungsbeispiel.

20

Fig. 3A zeigt beispielhaft eine Folge von Lichtpulsen als Funktion der Zeit, und Fig. 3B zeigt schematisch ein Fourier-Spektrum der Folge von Lichtpulsen von Fig. 3A.

25

Fig. 4A und 4B zeigen schematisch Signale, die in einer Auswerteeinrichtung nach einem Ausführungsbeispiel auftreten können.

Fig. 5 zeigt eine Auswerteeinrichtung nach einem Ausführungsbeispiel.

30

Fig. 6 zeigt eine Auswerteeinrichtung nach einem Ausführungsbeispiel.

Fig. 7 zeigt eine weitere Auswerteeinrichtung.

Fig. 8 veranschaulicht eine Implementierung einer Phasenmessenrichtung bei einer Auswerteeinrichtung nach einem Ausführungsbeispiel.

35

Fig. 9 veranschaulicht in der Phasenmesseinrichtung von Fig. 8 auftretende Signale.

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung näher erläutert. Die Merkmale der verschiedenen Ausführungsbeispiele können miteinander kombiniert werden, sofern dies in der nachfolgenden Beschreibung nicht ausdrücklich ausgeschlossen wird. Auch wenn einzelne Ausführungsbeispiele im Hinblick auf spezifische Anwendungen, wie eine Positionsbestimmung in industriellen Einrichtungen, beschrieben werden, ist die vorliegende Erfindung nicht auf diese Anwendungen beschränkt.

Die verschiedenen Ausführungsbeispiele sind eingerichtet für eine Weglängenmessung, bei der eine Folge von Pulsen elektromagnetischer Strahlung eine zu messende Weglänge durchläuft. Die Folge von Pulsen weist eine mit einer Repetitionsrate modulierte Amplitude auf. Um die Weglängemessung durchzuführen, werden die Pulse der Folge von einer geeigneten Einrichtung, beispielsweise einem Kurzpuls-Laser, mit der Repetitionsrate erzeugt, so dass an einer vorgegebenen Position des Strahlenwegs die Amplitude und somit die Leistungsdichte oder Strahlungsintensität der elektromagnetischen Strahlung sich mit der Repetitionsrate wiederholende Maxima aufweist.

Fig. 1 ist eine schematische Darstellung einer Messanordnung 1 nach einem Ausführungsbeispiel. Die Messanordnung 1 umfasst eine Lichtquelle 2, einen an einem Objekt anzubringenden Reflektor 3, einen Detektor 4, einen weiteren Detektor 5 und eine Auswerteeinrichtung 6. Weiterhin sind ein Strahlteiler 7 und ein Umlenkspiegel 8 vorgesehen, um einen Referenzstrahl zu dem weiteren Detektor 5 und einen Messstrahl zu dem Detektor 4 zu lenken.

Die Lichtquelle 2 kann als ein als Frequenzkammgenerator arbeitender Laser ausgebildet sein. Insbesondere kann die Lichtquelle 2 eingerichtet sein, um ein Signal mit hoher Frequenz- und Phasenstabilität zu erzeugen. Die Lichtquelle 2 erzeugt eine Folge von Lichtpulsen mit einer Repetitionsrate, wie unter Bezugnahme auf Fig. 3 noch näher beschrieben werden wird.

Der Strahlteiler 7 ist in einem Strahlenweg 11 der von der Lichtquelle 2 erzeugten Folge von Lichtpulsen angeordnet, um einen Teilstrahl in Richtung des weiteren Detektors 5 auszukoppeln. Der von dem Strahlteiler 7 durchgelassene Teilstrahl 12 läuft von dem Strahlteiler 7 zu dem Reflektor 3, wo er in einen Strahl 13 in Richtung des Umlenkspiegels 8 reflektiert wird, der den Strahl 13 auf den Detektor 4 lenkt.

Der von dem Strahlteiler 7 ausgekoppelte Teilstrahl 14, der auf den weiteren Detektor 5 gelenkt wird, durchläuft eine durch die Geometrie der Messanordnung 1 bedingte Weglänge. Der von dem Strahlteiler 7 durchgelassene Teilstrahl 12, der zu dem an dem Objekt vorgesehenen Reflektor 3 weiterläuft, durchläuft den Weg von dem Strahlteiler 7 über den Reflektor 3 und den Umlenkspiegel 8 zu dem Detektor 4, dessen Weglänge von der Position des Objekts abhängt, an dem der Reflektor 3 angebracht ist. Die unterschiedlichen Wege, die der von dem Detektor 4 erfasste Strahl und der von dem weiteren Detektor 5 erfasste Strahl zurücklegen, führen zu einer dem Laufzeitunterschied entsprechenden zeitlichen Verschiebung zwischen den erfassten Signalen. Der Laufzeitunterschied führt zu einer Phasenverschiebung von Komponenten in der Fourier-Darstellung der von dem Detektor 4 und dem weiteren Detektor 5 erfassten Signale. Wenigstens eine dieser Phasenverschiebungen wird ermittelt, um den Weglängenunterschied zwischen den beiden Strahlen zu bestimmen, die der Detektor 4 und der weitere Detektor 5 erfassen. Da ein nur durch die Vorrichtungsgometrie bedingter Anteil des Weglängenunterschieds, beispielsweise aufgrund der von dem Teilstrahl 14 von dem Strahlteiler 7 zu dem Detektor 5 zurückgelegten Strecke, entweder bekannt ist oder als Offset durch eine Kalibrierung der Messanordnung berücksichtigt werden kann, kann durch die Bestimmung des Weglängenunterschieds der Abstand des Objekts, an dem der Reflektor 3 angebracht ist, von einer Referenzposition, beispielsweise dem Strahlteiler 7 oder dem Umlenkspiegel 8 ermittelt werden. Eine veränderliche Position des Objekts ist schematisch mit dem Pfeil 9 angedeutet.

Da der von dem Strahlteiler 7 über den Reflektor 3 und den Umlenkspiegel 8 zu dem Detektor 4 verlaufende Strahl 12, 13, der im Folgenden als Messstrahl bezeichnet wird, unter Umständen eine deutlich längere Strecke zurücklegt als der Referenzstrahl 14, der vom Strahlteiler 7 zu dem weiteren Detektor ausgekoppelt wird, kann der Strahlteiler 7 so eingerichtet sein, dass er einen verhältnismäßig großen Anteil, beispielsweise ca. 99 %, der Intensität der auf ihn einfallenden Folge von Lichtpulsen als Messstrahl transmittiert und nur ca. 1 % als Referenzstrahl zu dem weiteren Detektor 5 lenkt. Dies erleichtert es, auch bei großen Abständen zwischen Objekt und Strahlteiler 7 bzw. bei einer weniger gut reflektierenden Oberfläche des Objekts noch ein ausreichendes Nutzsignal zu erhalten.

Der Detektor 4 kann als Fotodetektor ausgestaltet sein, der eine Intensität des auf ihn einfallenden Messstrahls als Funktion der Zeit erfasst und ein Messsignal

ausgibt, das die erfasste Intensität als Funktion der Zeit repräsentiert. Der weitere Detektor 5 kann als Fotodetektor ausgestaltet sein, der eine Intensität des auf ihn einfallenden Referenzstrahls als Funktion der Zeit erfasst und ein weiteres elektrisches Signal 16 ausgibt, das die erfasste Intensität als Funktion der Zeit repräsentiert. Die Auswerteeinrichtung 6 ist mit dem Detektor 4 und dem weiteren Detektor 5 gekoppelt, um das Messsignal 15 und das die Intensität des Referenzstrahls repräsentierende weitere Signal 16 auszuwerten. Wie noch ausführlicher beschrieben werden wird, ist die Auswerteeinrichtung 6 eingerichtet, um eine Phasendifferenz zwischen spektralen Komponente der Signale 15, 16 zu ermitteln.

10

Fig. 2 ist eine schematische Darstellung einer Messanordnung 21 nach einem weiteren Ausführungsbeispiel. Die Messanordnung 21 umfasst eine Lichtquelle 2, einen an einem Objekt anzubringenden Reflektor 3', einen Detektor 4, einen weiteren Detektor 5 und eine Auswerteeinrichtung 6, die in Aufbau, Anordnung und Funktion den mit denselben Bezugszeichen versehenen Elementen oder Einrichtungen der Messanordnung 1 entsprechen. Weiterhin ist ein Strahlteiler 27 vorgesehen.

15

Der Reflektor 3' ist bei der Messanordnung 21 als Retroreflektor ausgestaltet, der den von dem Strahlteiler 27 in Richtung des Reflektors 3' laufenden Messstrahl 22 in sich zurückreflektiert. Der Strahlteiler 27 ist so ausgestaltet, dass er den von dem Objekt zurückreflektierten Messstrahl 22 zu dem Detektor 4 lenkt. Der Strahlteiler 27 kann dabei so ausgebildet sein, dass ein großer Teil, beispielsweise im Wesentlichen die gesamte Intensität des auf den Strahlteiler 27 von dem Reflektor 3' einfallenden Messstrahls 22, auf den Detektor 4 gelenkt wird.

25

Die weitere Ausgestaltung der Messanordnung 21 entspricht derjenigen der Messanordnung 1. Insbesondere ist die Auswerteeinrichtung 6 eingerichtet, um von dem Detektor 4 ein Messsignal 15 zu empfangen und zur Weglängenmessung eine Phasendifferenz einer Komponente des Messsignals 15 zu bestimmen.

30

Die Messanordnungen 1 und 21 sind beispielhafte Anwendungsgebiete für die Auswerteeinrichtung und das Verfahren zur Abstandmessung, die unter Bezugnahme auf Fig. 3-9 noch näher erläutert werden. Bei Messanordnungen nach weiteren Ausführungsbeispielen können verschiedene Abwandlungen vorgenommen werden.

35

Während beispielsweise bei den unter Bezugnahme auf Fig. 1 und 2 erläuterten Messanordnungen 1 und 21 die Folge von Lichtpulsen frei propagiert, kann bei

Messanordnungen nach weiteren Ausführungsbeispielen das Licht auch teilweise in einem Lichtwellenleiter, insbesondere einer Lichtleitfaser aus Glas oder Kunststoff, geführt sein. So kann beispielsweise die Messanordnung eine Lichtleitfaser umfassen, deren eines Ende an dem Objekt angebracht wird, dessen Abstand zu einer Referenzposition bestimmt werden soll. Bei einem Ausführungsbeispiel kann das andere Ende der Lichtleitfaser in der Nähe des Detektors 4 vorgesehen sein. Die Folge von Lichtpulsen wird von der Lichtquelle 2 in Richtung des an dem Objekt angebrachten Endes der Lichtleitfaser eingestrahlt. An dem Objekt wird die Folge von Lichtpulsen in die Lichtleitfaser eingekoppelt und zu dem Detektor 4 geführt. Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel kann das andere Ende der Lichtleitfaser mit der Lichtquelle 2 gekoppelt sein, so dass die Folge von Lichtpulsen von dem an dem Objekt angebrachten Ende der Lichtleitfaser ausgestrahlt wird und zu dem Detektor 4 läuft.

Während bei den unter Bezugnahme auf Fig. 1 und 2 erläuterten Messanordnungen 1 und 21 der weitere Detektor 5 vorgesehen ist, um die Lichtintensität als Funktion der Zeit an einer Referenzposition zu erfassen, kann ein entsprechendes Referenzsignal auch anderweitig bereitgestellt werden. Bei einem Ausführungsbeispiel kann beispielsweise der als Frequenzkammgenerator arbeitende Laser 2 einen Ausgang aufweisen, um ein elektrisches Signal auszugeben, welches die von dem Laser 2 abgestrahlte Lichtintensität als Funktion der Zeit repräsentiert. Dieser Ausgang des Lasers 2 kann mit der Auswerteeinrichtung 6 gekoppelt sein, die das von dem Laser 2 bereitgestellte Signal als Referenzsignal oder zur Erzeugung des Referenzsignals für die Phasenmessung verwendet.

Während bei den Messanordnungen 1 und 21 schematisch eine Abstandsmessung in einer Dimension dargestellt ist, können auch mehrere Detektoren 4 und/oder mehrere an dem Objekt anzubringende Reflektoren 3 verwendet werden, um den Abstand eines Reflektors zu verschiedenen Referenzpositionen oder den Abstand verschiedener Reflektoren zu einer Referenzposition zu bestimmen, wie dies beispielsweise in der DE 10 2008 045 387 beschrieben ist. Beispielsweise durch Trilateration können dann die Koordinaten des Reflektors in zwei oder drei Dimensionen ermittelt werden.

Anstelle eines an dem Objekt anzubringenden Reflektors kann auch die Oberfläche des Objekts selbst Licht reflektieren oder streuen, so dass bei weiteren Ausführungsformen auf einen separaten Reflektor am Objekt verzichtet werden kann.

Die Messung von Weglängen unter Verwendung der Lichtquelle 2, des Detektors 4 und der Auswerteeinrichtung 6 der Messanordnung wird unter Bezugnahme auf Fig. 3-6 näher beschrieben.

5

Die Lichtquelle 2 erzeugt ein optisches Signal, das mit einer periodischen Funktion moduliert ist und das eine Grundfrequenz f_0 sowie ausgeprägte Anteile von Oberwellen der Grundfrequenz f_0 , d.h. ausgeprägte Frequenzkomponenten mit Frequenzen aufweist, die Vielfache von f_0 sind. Ein solches Signal wird beispielsweise durch einen Kurzpulslaser erzeugt, der eine Folge von Lichtpulsen in einem wohldefinierten zeitlichen Abstand $T_0=1/f_0$, d.h. mit einer Repetitionsrate f_0 , erzeugt, wobei die Dauer jedes Pulses kurz ist im Vergleich zum zeitlichen Abstand T_0 zwischen aufeinanderfolgenden Pulsen.

10

15

Fig. 3A zeigt beispielhaft die Intensität einer derartigen Folge kurzer Lichtpulse 31, wobei die Ausgangsleistung P der Lichtquelle 2 als Funktion der Zeit t dargestellt ist. Der Zeitabstand T_0 zwischen aufeinanderfolgenden Pulsen ist bei dem Bezugszeichen 32 schematisch dargestellt, während die Dauer jedes Lichtpulses bei dem Bezugszeichen 33 schematisch dargestellt ist. Die Dauer jedes Lichtpulses kann im Vergleich zu dem Zeitabstand T_0 zwischen aufeinanderfolgenden Lichtpulsen sehr klein sein, beispielsweise von der Größenordnung $1 \cdot 10^{-5}$. Die Repetitionsrate f_0 und die Zeitdauer jedes Pulses können geeignet in Abhängigkeit von einer gewünschten Messgenauigkeit bei der Weglängen- oder Abstandsmessung, einer anfänglichen Unsicherheit über die Position des Objekts, den Signalverarbeitungseigenschaften der Auswerteeinrichtung 6 oder in Abhängigkeit von weiteren Faktoren gewählt werden. Soll zur Bestimmung der Phasendifferenz die k -te Oberwelle von f_0 verwendet werden, werden die Dauer jedes Lichtpulses und der Zeitabstand T_0 zwischen aufeinanderfolgenden Lichtpulsen so gewählt, dass die von der Lichtquelle 2 ausgegebene Folge von Lichtsignalen noch ein ausreichendes spektrales Gewicht bei der Frequenz $k \cdot f_0$ aufweist. Auch wenn in Fig. 3A beispielhaft eine Folge von Rechteckspulsen dargestellt ist, können ebenso andere geeignete Pulsformen gewählt werden, beispielsweise das Quadrat eines hyperbolischen Secans oder eine Gaussfunktion.

20

25

30

35

Fig. 3B zeigt beispielhaft ein Frequenzspektrum 35 der Intensität einer Folge von Lichtpulsen, die mit einer Repetitionsrate f_0 erzeugt werden, wobei die Dauer jedes Lichtpulses kurz im Vergleich zu $T_0=1/f_0$ ist. Das Frequenzspektrum 35 weist eine Anzahl von Peaks mit einem konstanten Frequenzabstand f_0 auf, der bei dem Be-

zugszeichen 36 schematisch dargestellt ist. Das spektrale Gewicht der einzelnen Peaks nimmt zu höheren Frequenzen hin ab, wobei die Stärke des Abfalls durch das Verhältnis von Zeitabstand zwischen aufeinanderfolgenden Lichtpulsen und Lichtpulsdauer bestimmt ist. Diese Größen sind bei der Lichtquelle 2 der Vorrichtung 1 so gewählt, dass das spektrale Gewicht der Komponente 37 mit Frequenz $k \cdot f_0$, die zur Bestimmung von Phasendifferenz verwendet wird, in der Folge von Lichtpulsen ausreichend hoch für die Durchführung von Phasenmessungen ist.

Eine Folge von Lichtpulsen, wie sie schematisch in Fig. 3 dargestellt ist, kann von verschiedenen Lasern erzeugt werden, die für die Erzeugung kurzer Lichtpulse eingerichtet sind. Insbesondere können optische Frequenzsynthesizer verwendet werden. Beispielsweise kann ein elektrisch gepumpter Diodenlaser, z.B. ein gütegeschalteter Laser, ein verstärkungsgeschalteter (gain switched) Laser, ein aktiv oder passiv modengekoppelter Laser oder ein Laser mit hybrider Modenkopplung, oder ein modengekoppelter oberflächenemittierender Laser mit vertikalem Resonator (Vertical-Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL) als Lichtquelle 2 verwendet werden. Es kann auch ein optisch gepumpter Laser, beispielsweise ein passiv modengekoppelter oberflächenemittierender Laser mit externem vertikalem Resonator (Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers, VECSEL) oder ein auf photonische-Kristallfasern basierender Laser (photonic-crystal-fiber laser) als Lichtquelle 2 verwendet werden. Beispielhafte Pulsdauern der Lichtquelle 2 liegen in einem Bereich von 100 fs und 100 ps. Beispielhafte Repetitionsraten liegen in einem Bereich von 50 MHz bis 50 GHz. Beispielhafte mittlere Leistungen liegen in einem Bereich von 1 mW bis 10 W. Beispielhafte Werte für den Pulsjitter liegen zwischen 10 fs und 1 ps Effektivwert (quadratischer Mittelwert).

Bei den Messanordnungen 1 bzw. 21 erfasst der Detektor 4 die Intensität des Messstrahls als Funktion der Zeit, und der weitere Detektor 5 erfasst die Intensität der von der Lichtquelle 2 erzeugten Folge von Lichtpulsen an einer Referenzposition.

In einer Fourier-Repräsentation hat die von dem weiteren Detektor 5 erfasste Intensität des Referenzstrahls beispielsweise die Spektraldarstellung

$$P_R(t) = \sum_i a_i \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_0 \cdot t + \phi_{R,i}), \quad (1)$$

wobei der Summierindex i über die natürlichen Zahlen mit 0 läuft, f_0 die Repetitionsrate ist, a_i das spektrale Gewicht der Spektralkomponente mit Frequenz $i \cdot f_0$ ist, t die Zeit ist und $\phi_{R,i}$ eine Phase der Spektralkomponente mit Frequenz $i \cdot f_0$ ist, die die

Wegstrecke berücksichtigt, die der Referenzstrahl von dem Punkt, an dem er von dem Messstrahl ausgekoppelt wird, bis zu dem weiteren Detektor 5 zurücklegt.

Ähnlich hat in einer Fourier-Repräsentation die von dem Detektor 4 erfasste Intensität des Messstrahls die Darstellung

$$P_M(t) = \sum_i b_i \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_0 \cdot t + \phi_{M,i}), \quad (2)$$

wobei der Summierindex i über die natürlichen Zahlen mit 0 läuft, f_0 die Repetitionsrate ist, b_i das spektrale Gewicht der Spektralkomponente mit Frequenz $i \cdot f_0$ ist, t die Zeit ist und $\phi_{M,i}$ eine Phase der Spektralkomponente mit Frequenz $i \cdot f_0$ ist, die die Wegstrecke berücksichtigt, die der Messstrahl von dem Punkt, an dem er von dem Referenzstrahl getrennt wird, bis zu dem Detektor 4 zurücklegt.

Die Zeitverschiebung τ zwischen dem Messsignal 42 und dem die Intensität der Folge von Lichtpulsen an einer Referenzposition repräsentierenden Signal 41 führt zu einer Phasenverschiebung oder Phasendifferenz

$$\Delta\phi_i = \phi_{M,i} - \phi_{R,i} \quad (3)$$

zwischen den mit Frequenz $i \cdot f_0$ oszillierenden Komponenten der Signale $P_M(t)$ und $P_R(t)$. Der Betrag der Phasendifferenz ist proportional zur Zeitverschiebung τ zwischen den von dem Detektor 4 und dem weiteren Detektor 5 erfassten Intensitäten,

$$|\Delta\phi_i| = 2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_0 \cdot \tau = 2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_0 \cdot d/c. \quad (4)$$

Dabei bezeichnet d einen Weglängenunterschied zwischen dem Messstrahl und dem Referenzstrahl und c die Lichtgeschwindigkeit.

Fig. 4A illustriert Signale, wie sie an den Eingängen der Auswerteeinrichtung 6 auftreten können, wenn die Lichtquelle 2 eine Folge kurzer Lichtpulse mit wohldefinierter Repetitionsrate erzeugt. Fig. 4A zeigt ein beispielhaftes Signal 41, wie es von dem weiteren Detektor 5 erfasst wird, wobei die von dem weiteren Detektor 5 empfangene Leistung des Referenzstrahls als Funktion der Zeit dargestellt ist. Das Messsignal 42, wie es von dem Detektor 4 erfasst werden kann, weist eine bei 43 dargestellte Zeitverschiebung τ gegenüber dem Signal 41 auf, das die Intensität des Referenzstrahls repräsentiert.

Fig. 4B zeigt beispielhaft eine mit einer Frequenz $i \cdot f_0$ oszillierende Komponente 46 des Messsignals 4 und ein mit der Frequenz $i \cdot f_0$ oszillierendes Referenzsignal 45, das beispielsweise die mit der Frequenz $i \cdot f_0$ oszillierende Komponente des von dem weiteren Detektor 5 erfassten Signals sein kann. Die oszillierende Komponente 46 des Messsignals weist eine Phasendifferenz $\Delta\phi_i$ relativ zu dem Referenzsignal 45 auf.

Durch Ermittlung der Phasendifferenz $\Delta\phi_k$ für eine der Fourier-Komponenten kann gemäß Gleichung (4) der Weglängenunterschied bestimmt werden. Da die Phasenverschiebung $\Delta\phi_k$ nur bis auf ganzzahlige Vielfache von $2\cdot\pi$ bestimmt werden kann, wird angenommen, dass ein Schätzwert dS für die Weglängendifferenz d zwischen Messstrahl und Referenzstrahl bekannt ist, der diese mit einer Genauigkeit von $c/(k\cdot f_0)$ annähert, so dass

$$|d - dS| < c/(k\cdot f_0). \quad (5)$$

Dabei ist k eine natürliche Zahl, die diejenige Komponente des Messsignals bezeichnet, für die die Phasendifferenz ermittelt werden soll. Der Schätzwert dS für den Weglängenunterschied kann beispielsweise vorbekannt sein, wenn sich das Objekt, dessen Position bestimmt werden soll, nur in einem begrenzten Raumbereich bewegen kann, dessen Abmessungen so klein sind, dass d nur innerhalb eines Eindeutigkeitsbereiches variieren kann, oder kann mit anderen Messverfahren mit einer größeren Auflösung bestimmt werden. Falls beispielsweise ein Laser mit einer Repetitionsrate von $f_0=100$ MHz verwendet wird und zur Weglängenmessung die Phasendifferenz für die Grundwelle mit $k=1$ bestimmt wird, ist ein Schätzwert erforderlich, der den Weglängenunterschied mit einer Genauigkeit von ca. 3 m annähert.

Auf der Basis von dS kann der Anteil der Phasenverschiebung $\Delta\phi_k$ bestimmt werden, der ein ganzzahliges Vielfaches von $2\cdot\pi$ ist. Basierend auf dS wird eine ganze Zahl m ermittelt, so dass

$$d = d' + m\cdot c/(k\cdot f_0), \text{ wobei } 0 < d' < c/(k\cdot f_0). \quad (6)$$

Folglich ist, für positives $\Delta\phi_k$,

$$\begin{aligned} \Delta\phi_k' &= \Delta\phi_k - 2\cdot\pi\cdot m \\ &= 2\cdot\pi\cdot k\cdot f_0\cdot(d'/c) \end{aligned} \quad (7)$$

eine im Intervall von 0 bis $2\cdot\pi$ liegende Größe, die durch Messung der Phasenlage zwischen einer mit der Frequenz $k\cdot f_0$ oszillierenden Komponente des Messsignals und einem Referenzsignal bestimmt werden kann. Die Größe d' , die dann gemäß

$$d' = c\cdot\Delta\phi_k'/(2\cdot\pi\cdot k\cdot f_0) \quad (8)$$

ermittelt werden kann, führt gemäß Gleichung (6) zu einem verbesserten Wert für den Weglängenunterschied d .

Da sich die beiden Größen $\Delta\phi_k'$ und $\Delta\phi_k$ nur um ein für die Bestimmung der Phasendifferenz irrelevantes ganzzahliges Vielfaches von $2\cdot\pi$ unterscheiden, werden beide Größen nachfolgend als Phasendifferenz bezeichnet und nicht weiter unterschieden.

Bei der Messanordnung nach verschiedenen Ausführungsbeispielen, beispielsweise bei der Messanordnung 1 von Fig. 1 oder bei der Messanordnung 21 von Fig. 2, ist die Auswerteeinrichtung 6 eingerichtet, um zur Weglängenmessung die Phasendifferenz zwischen einer Komponente des von dem Detektor 4 erfassten Messsignals, die mit der Repetitionsrate oder einem Vielfachen der Repetitionsrate oszilliert, und einem Referenzsignal zu bestimmen.

Fig. 5 ist ein Schaltbild einer mit Fotodetektoren 4, 5 gekoppelten Auswerteeinrichtung 51 nach einem Ausführungsbeispiel. Die Auswerteeinrichtung 51 kann als Auswerteeinrichtung 6 bei der Messanordnung 1 von Fig. 1 oder bei der Messanordnung 21 von Fig. 2 verwendet werden.

Die Auswerteeinrichtung 51 weist einen Eingang auf, um ein Messsignal zu empfangen. Der Eingang zum Empfangen des Messsignals kann, wie in Fig. 5 dargestellt, mit dem Detektor 4 gekoppelt sein, um das Messsignal 15 zu empfangen, das die von dem Detektor 4 erfasste Intensität des Messstrahls repräsentiert. Die Auswerteeinrichtung 51 weist einen weiteren Eingang auf, um das Referenzsignal oder ein Signal zu empfangen, aus dem das Referenzsignal ableitbar ist, beispielsweise durch Filterung. Der weitere Eingang kann, wie in Fig. 5 dargestellt, mit dem weiteren Detektor 5 gekoppelt sein, um das Signal 16 von diesem zu empfangen, das die von dem weiteren Detektor 5 erfasste Intensität des Referenzstrahls repräsentiert. Falls kein weiterer Detektor 5 zum Erfassen der Intensität der Folge von Lichtpulsen an einer Referenzposition vorgesehen ist, kann der weitere Eingang der Auswerteeinrichtung 51 mit einem Ausgang der Lichtquelle 2 gekoppelt sein, um von dieser ein die Intensität der erzeugten Folge von Lichtpulsen als Funktion der Zeit anzeigendes Signal zu empfangen.

Die Auswerteeinrichtung 51 ist eingerichtet, um eine Phasendifferenz zwischen einer Komponente des Messsignals, die mit einer Frequenz $k \cdot f_0$ oszilliert, und einem mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierenden Referenzsignal zu bestimmen. Dabei bezeichnet k eine natürliche Zahl größer oder gleich 1 und f_0 die Repetitionsrate der Folge von Lichtpulsen. Die Auswerteeinrichtung 51 ist derart ausgebildet, dass zur Ermittlung der Phasendifferenz eine Abwärtsmischung vorgenommen wird, um ein erstes oszillierendes Signal und ein zweites oszillierendes Signal zu erzeugen, die mit einer weiteren Frequenz oszillieren, die von der Frequenz $k \cdot f_0$ verschieden ist.

Die Auswerteeinrichtung 51 weist einen Signalverarbeitungspfad für das Messsignal und einen weiteren Signalverarbeitungspfad für das Referenzsignal auf. In dem Signalverarbeitungspfad für das Messsignal erfolgt eine Mischung und Filterung, um durch Abwärtsmischen der Komponente des Messsignals das erste oszillierende
5 Signal zu erzeugen. In dem weiteren Signalverarbeitungspfad für das Referenzsignal erfolgt eine Mischung und Filterung, um durch Abwärtsmischen des Referenzsignals das zweite oszillierende Signal zu erzeugen.

Der Signalverarbeitungspfad für das Messsignal umfasst einen Eingangsverstärker
10 52, ein Bandpassfilter 53, einen Mischer 54 und ein Filter 55. Mit dem Eingangsverstärker 52 wird das Messsignal 15 verstärkt. Das verstärkte Messsignal 62 wird dem Bandpassfilter 53 zugeführt. Das Bandpassfilter 53 hat einen Durchlassbereich, in dem die Frequenz $k \cdot f_0$ liegt. Bei einem Ausführungsbeispiel kann das Bandpassfilter so eingerichtet sein, dass außer der Frequenz $k \cdot f_0$ keine weitere Frequenz $p \cdot f_0$
15 in dem Durchlassbereich liegt, wobei p eine von k verschiedene ganze Zahl ist. In diesem Fall entspricht das Ausgangssignal 63 des Bandpassfilters 53 im Wesentlichen der mit $k \cdot f_0$ oszillierenden Komponente des Messsignals.

Das Ausgangssignal 63 des Bandpassfilters 53 und ein drittes oszillierendes Signal
20 72 werden dem Mischer 54 zugeführt. Die Auswerteeinrichtung 51 kann beispielsweise einen Eingang aufweisen, um das dritte oszillierende Signal 72 von einem externen Oszillator 71 zu empfangen. Ein Ausgangssignal 64 des Mixers 54 weist eine Komponente, die mit der Summe aus $k \cdot f_0$ und der Frequenz des dritten oszillierenden Signals 72 oszilliert, und eine Komponente mit niedrigerer Frequenz, die mit dem Betrag der Differenz dieser Frequenzen oszilliert, auf. Das Ausgangssignal 64
25 des Mixers 54 wird dem Filter 55 zugeführt. Das Filter 55 kann als Bandpassfilter oder Tiefpassfilter ausgebildet sein. Das Filter 55 weist einen Durchlassbereich auf, der so gewählt ist, dass die Komponente des Ausgangssignals 64 des Mixers 54 mit niedrigerer Frequenz durchgelassen und die mit der Summenfrequenz oszillierende
30 Komponente des Ausgangssignals 64 des Mixers 54 im Vergleich dazu unterdrückt wird.

Der weitere Signalverarbeitungspfad für das Referenzsignal umfasst einen Eingangsverstärker 56, ein Bandpassfilter 57, einen Mischer 58 und ein Filter 59. Mit dem Eingangsverstärker 56 wird das von dem weiteren Detektor 5 bereitgestellte Signal 16 verstärkt. Das verstärkte Signal 66 wird dem Bandpassfilter 57 zugeführt.

5 Das Bandpassfilter 57 hat einen Durchlassbereich, in dem die Frequenz $k \cdot f_0$ liegt. Bei einem Ausführungsbeispiel kann das Bandpassfilter so eingerichtet sein, dass außer der Frequenz $k \cdot f_0$ keine weitere Frequenz $p \cdot f_0$ in dem Durchlassbereich liegt, wobei p eine von k verschiedene ganze Zahl ist. In diesem Fall ist das Ausgangssignal 67 des Bandpassfilters 57 ein im Wesentlichen mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierendes Referenzsignal, das der mit $k \cdot f_0$ oszillierenden Komponente des von dem weiteren Detektor 5 erfassten Signals 16 entspricht.

10

Das Ausgangssignal 67 des Bandpassfilters 57 und das dritte oszillierende Signal 72 werden dem Mischer 58 zugeführt. Ein Ausgangssignal 68 des Mixers 58 weist

15 eine Komponente, die mit der Summe aus $k \cdot f_0$ und der Frequenz des dritten oszillierenden Signals 72 oszilliert, und eine Komponente mit niedrigerer Frequenz, die mit dem Betrag der Differenz dieser Frequenzen oszilliert, auf. Das Ausgangssignal 68 des Mixers 58 wird dem Filter 59 zugeführt. Das Filter 59 kann als Bandpassfilter oder Tiefpassfilter ausgebildet sein. Das Filter 59 weist einen Durchlassbereich auf,

20 der so gewählt ist, dass die Komponente des Ausgangssignals 68 des Mixers 58 mit niedrigerer Frequenz durchgelassen und die mit der Summenfrequenz oszillierende Komponente des Ausgangssignals 68 des Mixers 58 im Vergleich dazu unterdrückt wird.

25 Das Ausgangssignal des Filters 55 im Signalverarbeitungspfad für das Messsignal stellt das erste oszillierende Signal 65 und das Ausgangssignal des Filters 59 im Signalverarbeitungspfad für das Referenzsignal das zweite oszillierende Signal 69 dar, die von der Auswerteeinrichtung 51 erzeugt werden. Aufgrund der Frequenzmischung mit den Mixern 54, 58 und der anschließenden Filterung oszillieren das

30 erste und das zweite Signal mit einer weiteren Frequenz, die kleiner als die Frequenz $k \cdot f_0$ der Komponente des Messsignals ist, für die die Phasendifferenz bestimmt werden soll. Da sowohl am Mischer 54 als auch am Mischer 58 eine Mischung mit dem

dritten oszillierenden Signal 72 erfolgt, bleibt die Phasendifferenz zwischen den Signalverarbeitungspfaden erhalten, d.h. das erste Signal 65 und das zweite Signal 69 weisen dieselbe Phasendifferenz auf wie die mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierende Komponente 63 des Messsignals und das mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierende Referenzsignal 67. Die weitere Phasendifferenz zwischen dem ersten Signal 65 und dem zweiten Signal 69 ist somit gleich der Phasendifferenz zwischen der mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierenden Komponente 63 des Messsignals und dem mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierende Referenzsignal 67.

Das erste Signal 65 und das zweite Signal 69 werden einer Phasenmesseinrichtung 60 zugeführt, die die weitere Phasendifferenz 73 zwischen dem ersten oszillierenden Signal 65 und dem zweiten oszillierenden Signal 69 misst. Die Phasenmesseinrichtung 60 kann die weitere Phasendifferenz 73 beispielsweise durch Ermittlung des Zeitabstands zwischen einem Nulldurchgang des ersten Signals 65 und einem darauf folgenden Nulldurchgang des zweiten Signals 69 in derselben Richtung bestimmen. Eine mögliche Ausgestaltung der Phasenmesseinrichtung 60 wird unter Bezugnahme auf Fig. 8 und 9 ausführlicher beschrieben werden. Die Phasenmesseinrichtung 60 kann auch einen Zeit-Digital-Wandler umfassen, mit dem beispielsweise die Zeit zwischen einem Nulldurchgang des ersten Signals 65 und einem darauf folgenden Nulldurchgang des zweiten Signals 69 in derselben Richtung mit hoher Auflösung bestimmt werden kann. Die Phasenmesseinrichtung 60 kann auch einen oder mehrere herkömmliche Phasenauswerter aufweisen.

Die von der Auswerteeinrichtung 51 verarbeiteten Signale können geeignete elektrische Signale, beispielsweise Strom- oder Spannungssignale sein. Die mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierenden Komponente 63 des Messsignals kann dann beispielsweise dargestellt werden als

$$U_M(t) = U_M \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot k \cdot f_0 \cdot t + \phi_{M,k}). \quad (9)$$

Das mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierende Referenzsignal kann dargestellt werden als

$$U_R(t) = U_R \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot k \cdot f_0 \cdot t + \phi_{R,k}). \quad (10)$$

Dabei bezeichnen U_M bzw. U_R Amplituden der Signale, f_0 die Repetitionsrate der Folge von Lichtpulsen, t die Zeit und $\phi_{M,k}$ und $\phi_{R,k}$ Phasen der Signale aufgrund der von dem Messstrahl bzw. Referenzstrahl zurückgelegten Wegstrecke.

- 5 Das dritte oszillierende Signal 72 kann dargestellt werden als

$$U_x(t) = U_x \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_x \cdot t + \phi_x), \quad (11)$$

wobei U_x eine Amplitude, f_x eine Frequenz und ϕ_x eine im Allgemeinen unbekannte Phasenlage des dritten oszillierenden Signals 72 ist.

- 10 Durch Frequenzmischung der mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierenden Komponente 63 des Messsignals mit dem dritten oszillierenden Signal 72 wird ein Signal

$$U_M(t) \cdot U_x(t) = U_M \cdot U_x \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot k \cdot f_0 \cdot t + \phi_{M,k}) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_x \cdot t + \phi_x) \quad (12)$$

erzeugt, das eine mit der Summenfrequenz $k \cdot f_0 + f_x$ und eine mit der Differenzfrequenz $k \cdot f_0 - f_x$ oszillierende Komponente aufweist. Die durch Filterung mit dem Filter

- 15 55 erhaltene, mit der Differenzfrequenz oszillierende Komponente ist gegeben durch

$$U_1(t) = (1/2) \cdot U_M \cdot U_x \cdot \cos[2 \cdot \pi \cdot (k \cdot f_0 - f_x) \cdot t + (\phi_{M,k} - \phi_x)] \quad (13)$$

und stellt das erzeugte erste Signal 65 dar.

- 20 Durch Frequenzmischung des mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierenden Referenzsignals 67 mit dem dritten oszillierenden Signal 72 wird ein Signal

$$U_R(t) \cdot U_x(t) = U_R \cdot U_x \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot k \cdot f_0 \cdot t + \phi_{R,k}) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_x \cdot t + \phi_x) \quad (14)$$

erzeugt, das eine mit der Summenfrequenz $k \cdot f_0 + f_x$ und eine mit der Differenzfrequenz $k \cdot f_0 - f_x$ oszillierende Komponente aufweist. Die durch Filterung mit dem Filter

- 59 erhaltene, mit der Differenzfrequenz oszillierende Komponente ist gegeben durch

25
$$U_2(t) = (1/2) \cdot U_R \cdot U_x \cdot \cos[2 \cdot \pi \cdot (k \cdot f_0 - f_x) \cdot t + (\phi_{R,k} - \phi_x)] \quad (15)$$

und stellt das erzeugte zweite Signal 69 dar.

- Das durch Abwärtsmischen der mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierenden Komponente $U_M(t)$ des Messsignals erzeugte erste Signal $U_1(t)$ und das durch Abwärtsmischen
 30 des mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierenden Referenzsignals $U_R(t)$ erzeugte zweite Signal $U_2(t)$ oszillieren jeweils mit der Differenzfrequenz $k \cdot f_0 - f_x$ und weisen eine Phasendifferenz

$$\Delta\phi_{1-2} = (\phi_{M,k} - \phi_x) - (\phi_{R,k} - \phi_x) = \Delta\phi_k \quad (16)$$

auf, die gleich der Phasendifferenz zwischen $U_M(t)$ und $U_R(t)$ ist.

Die Auswerteeinrichtung 51 ist somit eingerichtet, um die mit der Frequenz $k \cdot f_0$ oszillierenden Komponente des Messsignals und das Referenzsignal unter Beibehaltung der relativen Phasenlage abwärts zu mischen.

Da das erste und zweite Signal mit einer Frequenz oszillieren, die von der Frequenz $k \cdot f_0$ verschieden ist, können durch geeignete Wahl der Frequenz f_x des dritten oszillierenden Signals das erste und zweite Signal derart erzeugt werden, dass sie mit einer für die anschließende Bestimmung der Phasendifferenz günstigen Frequenz aufweisen. Falls beispielsweise die Phasendifferenz durch Messung eines Zeitabstands zwischen einem Nulldurchgang des ersten Signals und einem Nulldurchgang des zweiten Signals in gleicher Richtung ermittelt wird, kann die Frequenz f_x des dritten oszillierenden Signals so gewählt werden, dass das erste Signal und das zweite Signal mit der weiteren Frequenz oszillieren, die klein im Vergleich zu der Frequenz $k \cdot f_0$ ist. Bei vorgegebener zeitlicher Auflösung der Phasenmeseinrichtung 60 kann so die Phasenauflösung erhöht werden. Die Frequenz f_x des dritten oszillierenden Signals kann insbesondere auch so gewählt werden, dass das erste Signal und das zweite Signal mit der weiteren Frequenz oszillieren, die kleiner als die Repetitionsrate f_0 ist.

Bei einem Ausführungsbeispiel kann beispielsweise $k=1$ gewählt werden, d.h. zur Weglängenmessung kann die Phasendifferenz für die mit f_0 oszillierende Grundwelle der Lichtintensität ermittelt werden. Dann kann das dritte Signal auch mit einer Frequenz f_x oszillieren, die kleiner als f_0 ist, beispielsweise mit $f_x = 0,9 \cdot f_0$.

Wenn das dritte oszillierende Signal 72 von einem externen Oszillator 71 bereitgestellt wird, kann insbesondere ein Oszillator 71 gewählt werden, der hohe Phasen- und Frequenzstabilität aufweist. Alternativ kann die Auswerteeinrichtung 51 auch derart eingerichtet sein, dass sie das dritte oszillierende Signal beispielsweise aus dem Referenzsignal oder einer Komponente des Messsignals erzeugt. Dazu kann

die Auswerteeinrichtung einen entsprechenden Abzweig von dem Signalverarbeitungspfad oder von dem weiteren Signalverarbeitungspfad aufweisen, um durch Frequenzdivision und/oder Frequenzmultiplikation das dritte oszillierende Signal zu erzeugen. Beispielsweise kann die Auswerteeinrichtung einen Frequenzteiler umfassen, um aus dem Referenzsignal oder einer Komponente des Messsignals das dritte oszillierende Signal zu erzeugen, dessen Frequenz nicht mit einem Vielfachen der Repetitionsrate entspricht. Die Frequenz des dritten oszillierenden Signals kann insbesondere dem Produkt aus der Repetitionsrate f_0 und einer rationalen Zahl u/v , wobei u und v ganze Zahlen sind, entsprechen. Derartige dritte oszillierende Signale können beispielsweise durch Frequenzteilung und Mischung synthetisch erzeugt werden.

Bei Auswerteeinrichtungen nach weiteren Ausführungsbeispielen können Abwandlungen der Auswerteeinrichtung 51 implementiert werden. Beispielsweise können die Bandpassfilter 53, 57 auch weggelassen werden, wenn die Filter 55 und 59 mit einem derartigen Durchlassbereich konfiguriert sind, dass sie von dem Ausgangssignal der Mischer das erste und zweite Signal durchlassen. Somit kann beispielsweise bei weiteren Ausführungsbeispielen das Referenzsignal zusammen mit den weiteren Spektralkomponenten des von dem weiteren Detektor 5 bereitgestellten Signals 16 abwärts gemischt werden, bevor das Filter 59 das zweite Signal aus dem Ausgangssignal des Mischers 58 durchlässt.

Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel kann die Abwärtsmischung im Signalverarbeitungspfad für das Messsignal und im weiteren Signalverarbeitungspfad für das Referenzsignal in mehreren Stufen erfolgen.

Fig. 6 ist ein Schaltbild einer mit Fotodetektoren 4, 5 gekoppelten Auswerteeinrichtung 80 nach einem Ausführungsbeispiel. Die Auswerteeinrichtung 80 kann als Auswerteeinrichtung 6 bei der Messanordnung 1 von Fig. 1 oder bei der Messanordnung 21 von Fig. 2 verwendet werden. Elemente und Einrichtungen der Auswerteeinrichtung 80, die in ihrer Ausgestaltung oder Funktion Elementen und Einrichtungen der Auswerteeinrichtung 51 entsprechen, sind mit denselben Bezugszeichen versehen,

wobei ergänzend auf die Beschreibung der Auswerteeinrichtung 51 Bezug genommen wird.

Die Auswerteeinrichtung 80 umfasst einen Signalverarbeitungspfad für das Messsig-
5 nal mit einem Verstärker 52, einem Bandpassfilter 53, einem Mischer 54 und einem
Filter 55, die in ihrer Funktionsweise den entsprechenden Elementen der Auswerte-
einrichtung 51 entsprechen. Der Signalverarbeitungspfad für das Messsignal weist
einen zweiten Mischer 81 und ein Filter 82 zum Filtern eines Ausgangssignals 91 des
10 Mischers 81 auf. Dem zweiten Mischer 81 wird das Ausgangssignal 65 des Filters 55
und ein viertes oszillierendes Signal 86 zugeführt. Das vierte oszillierende Signal 86
kann beispielsweise von einem Oszillator 85 erzeugt werden. Das Ausgangssignal
91 des zweiten Mischers 81 umfasst eine Komponente, die mit der Summe der Fre-
quenz des Ausgangssignals 65 des Filters 55 und der Frequenz des vierten oszillie-
15 renden Signals 86 oszilliert, und eine Komponente, die mit einer niedrigeren Diffe-
renzfrequenz oszilliert. Das Ausgangssignal 91 des zweiten Mischers 81 wird dem
Filter 82 zugeführt. Das Filter 82 kann derart ausgestaltet sein, dass die mit der nied-
rigeren Differenzfrequenz oszillierende Komponente des Ausgangssignals 91 des
zweiten Mischers 81 im Durchlassbereich des Filters 82 liegt, während die mit der
Summenfrequenz oszillierende Komponente im Vergleich dazu stark abgeschwächt
20 wird. Das Ausgangssignal des Filters 82 dient als erstes Signal 92. Das erste Signal
92 oszilliert mit einer Frequenz, die der Differenz zwischen der Frequenz des Aus-
gangssignals 65 des Filters 55 und der Frequenz des vierten oszillierenden Signals
86 entspricht.

25 Die Auswerteeinrichtung 80 umfasst einen weiteren Signalverarbeitungspfad für das
Referenzsignal mit einem Verstärker 56, einem Bandpassfilter 57, einem Mischer 58
und einem Filter 59, die in ihrer Funktionsweise den entsprechenden Elementen der
Auswerteeinrichtung 51 entsprechen. Der Signalverarbeitungspfad für das Messsig-
nal weist einen zweiten Mischer 83 und ein Filter 84 zum Filtern eines Ausgangssig-
30 nals 93 des Mischers 83 auf. Dem zweiten Mischer 83 wird das Ausgangssignal 69
des Filters 59 und das vierte oszillierende Signal 86 zugeführt. Das Ausgangssignal
93 des zweiten Mischers 83 umfasst eine Komponente, die mit der Summe der Fre-
quenz des Ausgangssignals 69 des Filters 59 und der Frequenz des vierten oszillie-

renden Signals 86 oszilliert, und eine Komponente, die mit einer niedrigeren Differenzfrequenz oszilliert. Das Ausgangssignal 93 des zweiten Mischers 83 wird dem Filter 84 zugeführt. Das Filter 84 kann derart ausgestaltet sein, dass die mit der niedrigeren Differenzfrequenz oszillierende Komponente des Ausgangssignals 93 des zweiten Mischers 83 im Durchlassbereich des Filters 84 liegt, während die mit der Summenfrequenz oszillierende Komponente im Vergleich dazu stark abgeschwächt wird. Das Ausgangssignal des Filters 84 dient als zweites Signal 94. Das zweite Signal 94 oszilliert mit einer Frequenz, die der Differenz zwischen der Frequenz des Ausgangssignals 69 des Filters 59 und der Frequenz des vierten oszillierenden Signals 86 entspricht.

Da der weitere Mischer 81 im Signalverarbeitungspfad für das Messsignal und der weitere Mischer 83 im Signalverarbeitungspfad für das Referenzsignal mit demselben vierten oszillierenden Signal 86 gespeist werden, bleibt auch bei der zweistufigen Mischung in der Auswerteeinrichtung 80 die Phasendifferenz zwischen den mit der Differenzfrequenz oszillierenden Komponenten der Signale 91, 93 erhalten. Die weitere Phasendifferenz zwischen dem ersten Signal 92 und dem zweiten Signal 94 ist gleich der Phasendifferenz zwischen der Komponente des Messsignals, die mit der Repetitionsrate oder einem Vielfachen der Repetitionsrate oszilliert, und dem mit dieser Frequenz oszillierenden Referenzsignal.

Bei der Auswerteeinrichtung 80 kann das vierte oszillierende Signal 86 von einem externen Oszillator 85 bereitgestellt werden. Alternativ kann die Auswerteeinrichtung derart eingerichtet sein, dass sie das vierte oszillierende Signal beispielsweise aus dem Referenzsignal oder einer Komponente des Messsignals synthetisch erzeugt. Dazu kann die Auswerteeinrichtung einen entsprechenden Abzweig von dem Signalverarbeitungspfad oder von dem weiteren Signalverarbeitungspfad aufweisen, um durch Frequenzdivision und/oder Frequenzmultiplikation das vierte oszillierende Signal zu erzeugen.

30

Bei der Auswerteeinrichtung 80 können die mit der Frequenz oszillierende Komponente des Messsignals und das Referenzsignal über eine Zwischenfrequenz in meh-

5 reren Stufen abwärts gemischt werden. Falls beispielsweise eine Lichtquelle mit einer Repetitionsrate $f_0=100$ MHz verwendet wird, kann der Oszillator 71 auf eine Frequenz von 96 MHz abgestimmt sein. Die Signale 65 und 69 weisen entsprechend eine Frequenz von 4 MHz auf. Der Oszillator 85 kann beispielsweise auf eine Frequenz von 3,990 MHz abgestimmt sein. Das erste Signal 92 und das zweite Signal 94, die von der Auswerteeinrichtung 80 erzeugt werden, weisen entsprechend eine Frequenz von 10 kHz auf, wobei die Phasendifferenz durch das Abwärtsmischen unverändert bleibt.

10 Wird die Phasendifferenz von der Phasenmesseinrichtung 60 beispielsweise durch Messung der Zeitdauer zwischen einem Nulldurchgang des ersten Signals 92 und dem darauffolgenden Nulldurchgang des zweiten Signals 94 in derselben Richtung bestimmt, ist bei vorgegebener Zeitauflösung bei der Messung der Zeitdauer zwischen den Nulldurchgängen eine höhere Phasenauflösung erzielbar, wenn das erste und zweite Signal 92, 94 aufgrund des Abwärtsmischens mit einer kleineren Frequenz oszillieren.

20 Fig. 7 ist ein Schaltbild einer mit Fotodetektoren 4, 5 gekoppelten weiteren Auswerteeinrichtung 101 nach einem weiteren Aspekt der Erfindung. Die Auswerteeinrichtung 101 kann als Auswerteeinrichtung 6 bei der Messanordnung 1 von Fig. 1 oder bei der Messanordnung 21 von Fig. 2 verwendet werden.

25 Die Auswerteeinrichtung 101 kann insbesondere zur Weglängenmessung eingesetzt werden, falls auch für mit der Repetitionsrate f_0 oszillierende Signale die Phasendifferenz mit einer Genauigkeit bestimmt werden kann, die ausreicht, um eine Soll-Genauigkeit der Weglängenmessung zu erreichen.

30 Die Auswerteeinrichtung 101 umfasst einen Signalverarbeitungspfad für ein Messsignal, dem das von dem Detektor 4 erfasste Messsignal 15 als Eingangssignal zugeführt wird, und einen Signalverarbeitungspfad für ein Referenzsignal, dem das Ausgangssignal 16 des weiteren Detektors 5 als Eingangssignal zugeführt wird.

Der Signalverarbeitungspfad für das Messsignal weist einen Eingangsverstärker 52 und ein Bandpassfilter 53 auf. Das Ausgangssignal 62 des Verstärkers 52 wird dem

Bandpassfilter 53 zugeführt. Das Bandpassfilter 53 weist einen Durchlassbereich auf, in dem beispielsweise die der Repetitionsrate f_0 entsprechende Frequenz oder ein niederzahliges Vielfaches $k \cdot f_0$ der Repetitionsrate liegt. Beispielsweise kann der Durchlassbereich des Bandpassfilters 53 die Repetitionsrate f_0 umfassen und eine
5 Breite aufweisen, die kleiner als f_0 ist. Das Ausgangssignal 102 des Bandpassfilters 53 ist dann die mit der Frequenz f_0 oszillierende Komponente des Messsignals 15.

Der weitere Signalverarbeitungspfad für Referenzsignal weist einen Eingangsverstärker 56 und ein Bandpassfilter 57 auf. Das Ausgangssignal 66 des Verstärkers 56
10 wird dem Bandpassfilter 57 zugeführt. Das Bandpassfilter 57 weist einen Durchlassbereich auf, in dem beispielsweise die der Repetitionsrate f_0 entsprechende Frequenz oder ein niederzahliges Vielfaches $k \cdot f_0$ der Repetitionsrate liegt. Beispielsweise kann der Durchlassbereich des Bandpassfilters 57 die Repetitionsrate f_0 umfassen und eine Breite aufweisen, die kleiner als f_0 ist. Das Ausgangssignal 103 des
15 Bandpassfilters 57 ist dann die mit der Frequenz f_0 oszillierende Komponente des von dem weiteren Detektor bereitgestellten Signals 16.

Das Ausgangssignal 102 des Bandpassfilters 53 und das Ausgangssignal 103 des Bandpassfilters 57 wird der Phasenmesseinrichtung 60 zugeführt, die die Phasendifferenz 73 zwischen den Signalen bestimmt. Die Ermittlung der Phasendifferenz erfolgt bei der Auswerteeinrichtung 101 somit für eine mit f_0 oder einem niederzahligen Vielfachen von f_0 oszillierende Komponente der erfassten Intensität des Mess- und Referenzstrahls.
20

25 Unter Bezugnahme auf Fig. 8 und 9 wird eine mögliche Ausgestaltung einer Phasenmesseinrichtung beschrieben.

Fig. 8 ist ein schematisches Schaltbild einer Phasenmesseinrichtung 111. Die Phasenmesseinrichtung 111 kann als Phasenmesseinrichtung 60 bei der Auswerteeinrichtung 51 von Fig. 5, bei der Auswerteeinrichtung 80 von Fig. 6 oder bei der Auswerteeinrichtung 101 von Fig. 7 verwendet werden.
30

Die Phasenmesseinrichtung 111 ist eingerichtet, um den Zeitabstand zwischen einem Nulldurchgang eines ersten oszillierenden Signals 121 und einem darauf folgenden Nulldurchgang eines zweiten oszillierenden Signals 122 in der gleichen Richtung zu ermitteln. Bei bekannter Schwingungsfrequenz des ersten und zweiten oszillierenden Signals 121, 122 ist die Phasendifferenz als Produkt des Zeitabstands zwi-
35

schen den Nulldurchgängen und der Schwingungsfrequenz des ersten und zweiten oszillierenden Signals 121, 122 bestimmbar. Der Zeitabstand ist schematisch bei dem Bezugszeichen 123 dargestellt.

- 5 Wenn die Phasenmesseinrichtung 111 bei der Auswerteeinrichtung nach einem Ausführungsbeispiel verwendet wird, kann das erste oszillierende Signal 121 das von der Auswerteeinrichtung durch Abwärtsmischen der Komponente des Messsignals erzeugte erste oszillierende Signal und das zweite oszillierende Signal 122 das von der Auswerteeinrichtung durch Abwärtsmischen der Referenzsignals erzeugte zweite oszillierende Signal sein.

- Die Phasenmesseinrichtung 111 umfasst ein erstes Schaltungselement 112, beispielsweise einen Komparator oder Begrenzer-Verstärker, das eingerichtet ist, um das erste oszillierende Signal 121 in ein rechteckförmiges Signal 124 umzuwandeln.
- 15 Beispielsweise kann das erste Schaltungselement 112 so eingerichtet sein, dass das Ausgangssignal 124 des ersten Schaltungselements 112 den logischen Wert „1“ hat, wenn das erste oszillierende Signal 121 positiv oder gleich 0 ist, und den logischen Wert „0“ hat, wenn das erste oszillierende Signal 121 negativ ist. Die Phasenmeseinrichtung 111 umfasst ein zweites Schaltungselement 113, beispielsweise einen
- 20 Komparator oder Begrenzer-Verstärker, das eingerichtet ist, um das zweite oszillierende Signal 122 in ein rechteckförmiges Signal 125 umzuwandeln. Beispielsweise kann das zweite Schaltungselement 113 so eingerichtet sein, dass das Ausgangssignal 125 des zweiten Schaltungselements 113 den logischen Wert „1“ hat, wenn das zweite oszillierende Signal 122 positiv oder gleich 0 ist, und den logischen Wert
- 25 „0“ hat, wenn das zweite oszillierende Signal 122 negativ ist.

- Die beiden rechteckförmigen Signale 124, 125 können einer digitalen Auswertung zugeführt werden, bei der z.B. mit der positiven Flanke des Signals 124 ein Zähler 114 gestartet wird. Mit der positiven Flanke des Signals 125 wird der Zähler 114 gestoppt. Der Zähler wird von einer Taktsignalquelle 115 mit einem periodischen Taktsignal 127 gespeist und zählt die Pulse des Taktsignals 127 in dem Zeitabstand 126
- 30 zwischen den positiven Flanken der rechteckförmigen Signale 124, 125. Der Zeitabstand 126 zwischen den positiven Flanken der rechteckförmigen Signale 124, 125 ist gleich dem Zeitabstand 123 zwischen dem Nulldurchgang des ersten oszillierenden
- 35 Signals 121 und dem darauf folgenden Nulldurchgang des zweiten oszillierenden Signals 122 in der gleichen Richtung.

- Fig. 9 illustriert die verschiedenen Signale an dem Zähler 114. Das rechteckförmige Signal 124, das den Zähler startet, und das rechteckförmige Signal 125, das den Zähler stoppt, definieren ein durch das Signal 132 repräsentiertes Zeitfenster. In dem Zeitfenster wird die Weiterleitung der von dem Taktsignalgenerator 115 erzeugten Impulse 127 auf eine Zählleinheit derart zugelassen, dass der Zählerwert im Zeitfenster zwischen den positiven Flanken der rechteckförmigen Signale 124, 125 gemäß der Zahl der Impulse erhöht wird. Beispielsweise kann dazu das Taktsignal 127 nur in dem durch das Signal 132 repräsentierte Zeitfenster zum Eingang der Zählleinheit weitergeleitet werden, wie im Signal 133 dargestellt ist. Die Zahl der von dem Taktsignalgenerator 115 in diesem Zeitfenster bereitgestellten Impulse ist proportional zu der Phasendifferenz. Der Zählerwert, der die Phasendifferenz repräsentiert, kann mit herkömmlichen Verfahren, beispielsweise über eine Rechner-Schnittstelle, ausgelesen und einem Rechner zur Verfügung gestellt werden.
- 15 In einer weiteren Betriebsart der Phasenmesseinrichtung kann beispielsweise die oben beschriebene Messung mehrfach durchgeführt werden. Dazu zählt die Zählleinheit des Zählers 114 mehrfach, beispielsweise zehn Mal, die Zahl der von dem Taktsignalgenerator 115 bereitgestellten Impulse zwischen den ansteigenden Flanken der rechteckförmigen Signale 124 und 125. Der Zählerwert kann anschließend durch die Anzahl der Messwiederholungen dividiert werden. Auf diese Art und Weise kann eine Mittelwertbildung über mehrere Zählperioden vorgenommen werden.
- 25 Verschiedene Abwandlungen des Phasenmessers 111 können bei weiteren Ausführungsbeispielen realisiert werden. Beispielsweise kann der Zähler zusätzlich auch mit den abfallenden Flanken der rechteckförmigen Signale 124, 125 getriggert werden, so dass pro Periode zwei Phasenmessungen ausgeführt werden. Der Taktsignalgenerator 115 kann derart implementiert werden, dass er das Taktsignal 127 aus dem Messsignal oder einer Komponente des Messsignals ableitet.
- 30 Die Phasenauflösung oder Genauigkeit, die der Phasenmesser 111 erreicht, ist bestimmt durch das Verhältnis der weiteren Frequenz, mit der das erste oszillierende Signal 121 und das zweiten oszillierende Signal 122 oszillieren, und des von dem Taktsignalgenerator 115 bereitgestellten Taktsignals 127. Wenn beispielsweise das erste oszillierende Signal 121 und das zweiten oszillierende Signal 122 eine Frequenz von 10 kHz aufweisen und der Taktsignalgenerator 115 Impulse mit einer Frequenz von 100 MHz ausgibt, kann eine Phase von $2\cdot\pi$ bzw. 360° mit einer Auflösung von 10 000 Schritten gemessen werden. Entsprechend könnte bei einem Taktsignal-
- 35

generator 115, der Impulse mit einer Frequenz von 1 GHz ausgibt, wie dies beispielsweise bei PCs üblich ist, ein Winkel von $2\cdot\pi$ bzw. 360° mit einer Auslösung 10^5 Schritten gemessen werden.

- 5 Falls eine Auswerteeinrichtung mit einer derartigen Phasenneinrichtung verwendet wird, um die Phasendifferenz beispielsweise in der Messanordnung 1 von Fig. 1 oder in der Messanordnung 2 von Fig. 2 zu messen, sind Weglängenmessungen im Bereich einiger Mikrometer oder einiger zehn Mikrometer möglich. Falls beispielsweise die Lichtquelle als Frequenzkammgenerator ausgebildet ist und Lichtpulse mit einer Repetitionsrate $f_0 = 100$ MHz erzeugt und die Phasendifferenz für die mit der Frequenz f_0 oszillierende Komponente des Messsignals, also die Grundwelle mit der Frequenz f_0 , zur Weglängenmessung bestimmt wird, indem diese Komponente auf eine Frequenz von 10 kHz abwärts gemischt wird, kann eine Weglängenmessung mit einer Auflösung von $3m/10^5 = 30$ μm durchgeführt werden, falls der Taktsignalgenerator 115 Impulse mit einer Frequenz von 1 GHz ausgibt. Im Reflexionsmodus, bei dem der Messstrahl den Abstand zwischen der Lichtquelle und Detektoranordnung und dem Objekt zweimal durchläuft, ergibt sich somit eine Abstandsauflösung von 15 μm .
- 10
- 15
- 20 Falls nicht die Grundwelle, sondern eine Oberwelle zur Bestimmung der Phasendifferenz herangezogen wird, kann die Auflösung weiter erhöht werden. Falls beispielsweise für die im vorhergehenden Absatz genannten Parameter die mit der Frequenz $1\text{ GHz} = 10\cdot f_0$ oszillierende Komponente des Messsignals zur Weglängenmessung auf 10 kHz heruntergemischt und ausgewertet wird, ergibt sich aufgrund der größeren Phasendifferenz eine Abstandsauflösung von 1,5 μm .
- 25

Andere Phasenneinrichtungen können bei Auswerteeinrichtungen nach weiteren Ausführungsformen verwendet werden. Beispielsweise können das erste und zweite oszillierende Signal abgetastet werden, wobei anschließend ein Fit an die abgetasteten Werte erfolgt, um die Phasendifferenz zu bestimmen. Es kann auch ein herkömmlicher Phasenneinrichtung verwendet werden.

30

Auswerteeinrichtungen, Messanordnungen und Verfahren nach verschiedenen Ausführungsbeispielen der Erfindung wurden detailliert beschrieben. Weitere Abwandlungen können bei weiteren Ausführungsbeispielen realisiert Die Weglängenmessung kann unter Verwendung einer Folge von Lichtpulsen erfolgen, wobei das Licht eine Wellenlänge im sichtbaren, ultravioletten und insbesondere auch infraroten

35

Spektralbereich aufweisen kann. Bei weiteren Ausführungsbeispielen kann anstelle einer Folge von Lichtpulsen auch eine Folge von elektromagnetischen Pulsen mit einer Wellenlänge außerhalb des optischen Spektralbereichs verwendet werden.

- 5 Die Auswerteeinrichtungen, Messanordnungen und Verfahren nach verschiedenen Ausführungsbeispielen der Erfindung erlauben eine Weglängenmessung mit hoher Ortsauflösung, insbesondere mit optischen Methoden. Die Weglängenmessung kann beispielsweise zur Messung des Abstands eines Objekts von einer Referenzposition eingesetzt werden. Durch Kombination von mindestens zwei derartigen Weglängen-
- 10 messungen kann durch Trilateration die Position eines Objekts in einer Ebene bestimmt werden. Durch Kombination von mindestens drei derartigen Weglängenmessungen kann beispielsweise durch Trilateration die Position eines Objekts in einem dreidimensionalen Raum bestimmt werden. Die verschiedenen Ausführungsbeispiele können allgemein zur Abstands- oder Positionsbestimmung eingesetzt werden, wo-
- 15 bei beispielhafte Anwendungsfelder Messanwendungen in industriellen Anlagen, beispielsweise in automatisierten Fertigungs- oder Transportanlagen sind.

ANSPRÜCHE

- 5 1. Auswerteeinrichtung für eine Weglängenmessung, welche zum Auswerten eines Messsignals (15; 42), das eine Intensität einer Folge von Pulsen elektromagnetischer Strahlung, insbesondere einer Folge von Lichtpulsen, nach Durchlaufen einer zu messenden Weglänge als Funktion der Zeit repräsentiert, eingerichtet ist, wobei die Folge von Pulsen eine Repetitionsrate aufweist,
- 10 wobei die Auswerteeinrichtung (6; 51; 80) zum Ermitteln einer Phasendifferenz (47) zwischen einer mit einer Frequenz oszillierenden Komponente (46; 63) des Messsignals (15; 42) und einem mit der Frequenz oszillierenden Referenzsignal (45; 67) eingerichtet ist, wobei die Frequenz der Repetitionsrate oder einem Vielfachen der Repetitionsrate entspricht, und
- 15 wobei die Auswerteeinrichtung (6; 51; 80) eingerichtet ist, um zum Ermitteln der Phasendifferenz (47) ein erstes Signal (65; 92) und ein zweites Signal (69; 94) mit einer weiteren Phasendifferenz (73) derart zu erzeugen, dass das erste Signal (65; 92) und das zweite Signal (69; 94) jeweils mit einer weiteren Frequenz oszilliert, die von der Frequenz verschieden ist, und dass die weitere Phasendifferenz (73) eine vorgegebene Beziehung zu der Phasendifferenz (47) aufweist.
- 20
2. Auswerteeinrichtung nach Anspruch 1, wobei die Auswerteeinrichtung (6; 51; 80) eingerichtet ist, um das erste Signal (65; 92) und das zweite Signal (69; 94) derart zu erzeugen, dass die weitere Phasendifferenz (73) gleich der Phasendifferenz (47) zwischen der Komponente (46; 63) des Messsignals (15; 42) und dem Referenzsignal (45; 67) ist.
- 25
3. Auswerteeinrichtung nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Auswerteeinrichtung (6; 51; 80) eingerichtet ist, um das erste Signal (65; 92) und das zweite Signal (69; 94) derart zu erzeugen, dass die weitere Frequenz, mit der das erzeugte erste Signal (65; 92) und das erzeugte zweite Signal (69; 94) oszillieren, kleiner als die Frequenz ist.
- 30
4. Auswerteeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Auswerteeinrichtung (6; 51; 80) eingerichtet ist, um das erste Signal (65; 92) und das zweite Signal (69; 94) derart zu erzeugen, dass die weitere Frequenz,
- 35

mit der das erzeugte erste Signal (65; 92) und das erzeugte zweite Signal (69; 94) oszillieren, kleiner als die Repetitionsrate ist.

- 5 5. Auswerteeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend einen Signalverarbeitungspfad (52-55; 52-55, 81, 82) für das Messsignal (15), welcher einen Mischer (54) aufweist, um zum Erzeugen des ersten Signals (65; 92) die Komponente (46; 63) des Messsignals (15; 42) mit einem dritten oszillierenden Signal (72) zu mischen.
- 10 6. Auswerteeinrichtung nach Anspruch 5, wobei der Signalverarbeitungspfad (52-55; 52-55, 81, 82) ein Filter (55) zum Filtern eines Ausgangssignals des Mixers (54) aufweist.
- 15 7. Auswerteeinrichtung nach Anspruch 5 oder 6, wobei der Signalverarbeitungspfad (52-55, 81, 82) wenigstens einen zweiten Mischer (80) aufweist, um zum Erzeugen des ersten Signals (92) ein Ausgangssignal des Mixers mit einem vierten oszillierenden Signal (86) zu mischen.
- 20 8. Auswerteeinrichtung nach einem der Ansprüche 5-7, umfassend einen weiteren Signalverarbeitungspfad (56-59; 56-59, 83, 84) für das Referenzsignal (45; 67), welcher einen weiteren Mischer (58) aufweist, um zum Erzeugen des zweiten Signals (69; 94) das Referenzsignal (45; 67) mit dem dritten oszillierenden Signal (72) zu mischen.
- 25 9. Auswerteeinrichtung nach Anspruch 8, wobei der weitere Signalverarbeitungspfad (56-59; 56-59, 83, 84) ein weiteres Filter (59) zum Filtern eines Ausgangssignals des weiteren Mixers (58) aufweist.
- 30 10. Auswerteeinrichtung nach Anspruch 8 oder 9 und nach Anspruch 6, wobei der weitere Signalverarbeitungspfad (56-59, 83, 84) wenigstens einen weiteren zweiten Mischer (83) aufweist, um zum Erzeugen des zweiten Signals (94) ein Ausgangssignal des weiteren Mixers (58) mit dem vierten oszillierenden Signal (86) zu mischen.
- 35 11. Auswerteeinrichtung nach einem der Ansprüche 5-10,

wobei das dritte oszillierende Signal (72) eine Frequenz aufweist, die derart gewählt ist, dass ein Quotient zwischen der Frequenz des dritten oszillierenden Signals (72) und der Repetitionsrate keine ganze Zahl ist.

- 5 12. Auswerteeinrichtung nach Anspruch 11,
welche eingerichtet ist, um das dritte oszillierende Signal (72) aus dem Messsignal
(15) oder dem Referenzsignal (45; 67) zu erzeugen.
- 10 13. Auswerteeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend
eine Phasenmesseinrichtung (60; 111) mit Eingängen für das erste Signal (65; 92)
und das zweite Signal (69; 94) zum Ermitteln der weiteren Phasendifferenz (73).
- 15 14. Auswerteeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei die Auswerteeinrichtung (6; 51; 80) eingerichtet ist, um zum Ermitteln der wei-
teren Phasendifferenz (73) eine Zeit zwischen einem Nulldurchgang des ersten Sig-
nals (65; 92) und einem Nulldurchgang des zweiten Signals (69; 94) zu messen.
- 20 15. Messanordnung zur Weglängenmessung, umfassend
einen Detektor (4), der eingerichtet ist, um eine Intensität einer Folge von Pulsen e-
lektromagnetischer Strahlung, insbesondere einer Folge von Lichtpulsen, nach
Durchlaufen einer zu messenden Weglänge als Funktion der Zeit zu erfassen, wobei
die Folge von Pulsen eine Repetitionsrate aufweist, wobei der Detektor (4) eingerich-
tet ist, um ein die erfasste Intensität repräsentierendes Messsignal (15; 42) bereitzu-
stellen, und
25 eine Auswerteeinrichtung (6; 51; 80) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, die
mit dem Detektor (4) gekoppelt ist, um das von dem Detektor (4) bereitgestellte
Messsignal (15; 42) zu verarbeiten.
- 30 16. Messanordnung nach Anspruch 15, umfassend
eine Lichtquelle (2) zum Erzeugen der Folge von Pulsen.
17. Messanordnung nach Anspruch 16,
wobei die Lichtquelle (2) einen Laser, insbesondere einen Kurzpuls laser, umfasst.
- 35 18. Messanordnung nach Anspruch 16 oder 17,
wobei die Lichtquelle (2) einen Frequenzkammgenerator umfasst.

19. Messanordnung nach einem der Ansprüche 16-18, wobei die Lichtquelle (2) eingerichtet ist, um ein eine Intensität der erzeugten Folge von Pulsen als Funktion der Zeit repräsentierendes Ausgangssignal auszugeben, wobei die Auswerteeinrichtung (6; 51; 80) mit der Lichtquelle (2) gekoppelt und ein-
5 gerichtet ist, um aus dem Ausgangssignal der Lichtquelle (2) das Referenzsignal (45; 67) zu erzeugen.
20. Messanordnung nach einem der Ansprüche 16-18, umfassend
10 einen weiteren Detektor (5), der eingerichtet ist, um eine Intensität der erzeugten Folge von Pulsen als Funktion der Zeit an einer Referenzposition zu erfassen, wobei die Auswerteeinrichtung (6; 51; 80) mit dem weiteren Detektor (5) gekoppelt und ein-
gerichtet ist, um aus einem Ausgangssignal (16) des weiteren Detektors (5) das Re-
ferenzsignal (45; 67) zu erzeugen.
21. Verfahren zur Weglängemessung, bei dem ein Messsignal (15; 42), welches
15 eine Intensität einer Folge von Pulsen elektromagnetischer Strahlung, insbesondere einer Folge von Lichtpulsen, nach Durchlaufen einer zu messenden Weglänge als Funktion der Zeit repräsentiert, erfasst und ausgewertet wird, wobei die Folge von
20 Pulsen eine Repetitionsrate aufweist, wobei das Verfahren ein Ermitteln einer Pha-
sendifferenz (47) zwischen einer mit einer Frequenz oszillierenden Komponente (46; 63) des Messsignals (15; 42) und einem mit der Frequenz oszillierenden Referenz-
signal (45; 67) umfasst, wobei die Frequenz der Repetitionsrate oder einem Vielfa-
chen der Repetitionsrate entspricht,
wobei zum Ermitteln der Phasendifferenz (47) ein erstes Signal (65; 92) und ein
25 zweites Signal (69; 94) derart erzeugt werden, dass das erste Signal (65; 92) und
das zweite Signal (69; 94) jeweils mit einer weiteren Frequenz oszilliert, die von der
Frequenz verschieden ist, und dass das erste Signal (65; 92) und das zweite Signal
(69; 94) eine weitere Phasendifferenz (73) aufweisen, die in einer vorgegebenen Be-
ziehung zu der Phasendifferenz (47) steht.
30
22. Verfahren nach Anspruch 21,
wobei das erste Signal (65; 92) und das zweite Signal (69; 94) derart erzeugt wer-
den, dass die weitere Phasendifferenz (73) gleich der Phasendifferenz (47) zwischen
der Komponente (46; 63) des Messsignals (15; 42) und dem Referenzsignal (45; 67)
35 ist.
23. Verfahren nach Anspruch 21 oder 22,

wobei das erste Signal (65; 92) und das zweite Signal (69; 94) derart erzeugt werden, dass die weitere Frequenz, mit der das erzeugte erste Signal (65; 92) und das erzeugte zweite Signal (69; 94) oszillieren, kleiner als die Frequenz ist.

- 5 24. Verfahren nach einem der Ansprüche 21-23,
wobei das erste Signal (65; 92) und das zweite Signal (69; 94) derart erzeugt werden, dass die weitere Frequenz, mit der das erzeugte erste Signal (65; 92) und das erzeugte zweite Signal (69; 94) oszillieren, kleiner als die Repetitionsrate ist.
- 10 25. Verfahren nach einem der Ansprüche 21-24,
wobei zum Erzeugen des ersten Signals die Komponente (46; 63) des Messsignals (15; 42) abwärts gemischt wird.
- 15 26. Verfahren nach Anspruch 25,
wobei die Komponente (46; 63) des Messsignals (15; 42) in mehreren Stufen abwärts gemischt wird.
- 20 27. Verfahren nach einem der Ansprüche 21-26,
wobei zum Erzeugen des zweiten Signals (69; 94) das Referenzsignal (45; 67) abwärts gemischt wird.
- 25 28. Verfahren nach Anspruch 26 oder 27,
wobei das Referenzsignal (45; 67) in mehreren Stufen abwärts gemischt wird.
29. Verfahren nach einem der Ansprüche 21-28,
wobei die Komponente (46; 63) des Messsignals (15; 42) und das Referenzsignal (45; 67) jeweils mit einem dritten oszillierenden Signal (72) gemischt wird.
- 30 30. Verfahren nach Anspruch 29,
wobei eine Frequenz des dritten oszillierenden Signals (72) derart gewählt wird, dass ein Quotient zwischen der Frequenz des dritten oszillierenden Signals (72) und der Repetitionsrate keine ganze Zahl ist.
- 35 31. Verfahren nach einem der Ansprüche 21-30,
wobei die weitere Phasendifferenz (73) ermittelt wird, indem ein Zeitabstand zwischen Nulldurchgängen des ersten Signals (65; 92) und des zweiten Signals (69; 94) ermittelt wird.

32. Verfahren nach einem der Ansprüche 21-31,
wobei die Folge von Lichtpulsen mit einem Kurzpulslaser (2) erzeugt wird.
- 5 33. Verfahren nach einem der Ansprüche 21-32,
wobei das Messsignal (15; 42) mit der Auswerteeinrichtung (6; 51; 80) nach einem
der Ansprüche 1-14 ausgewertet wird.
- 10 34. Verfahren nach einem der Ansprüche 21-33,
welches zur Bestimmung mehrerer Koordinaten eines Objekts in einem zwei- oder
dreidimensionalen Raumbereich eingesetzt wird.

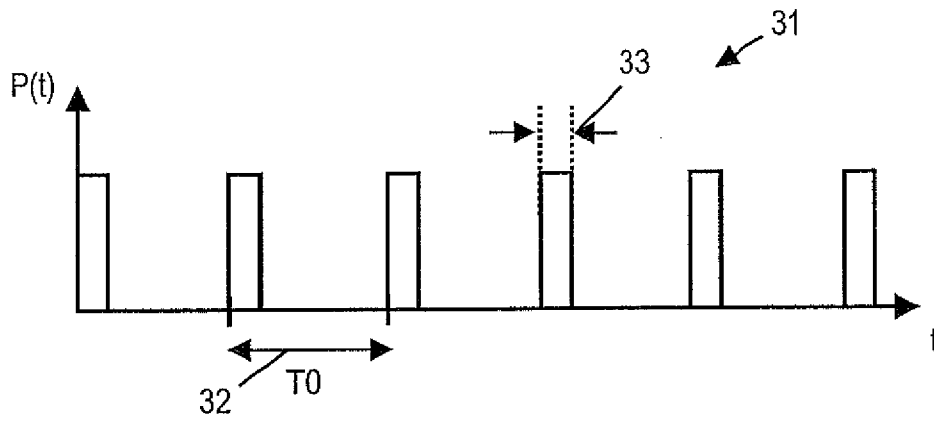


Fig. 3 A

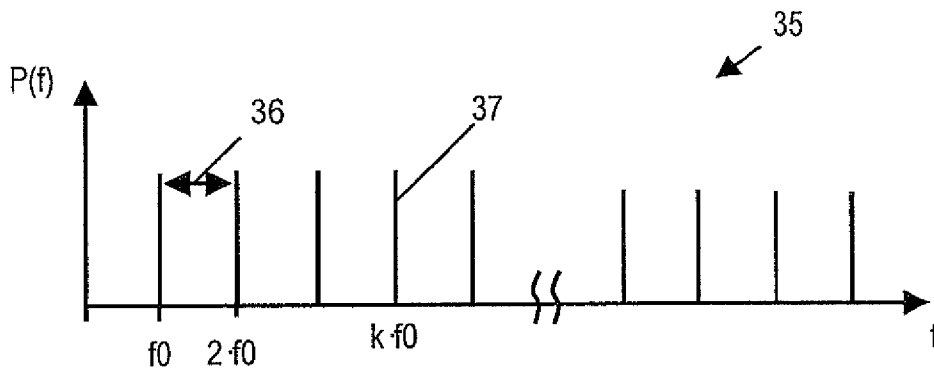


Fig. 3 B

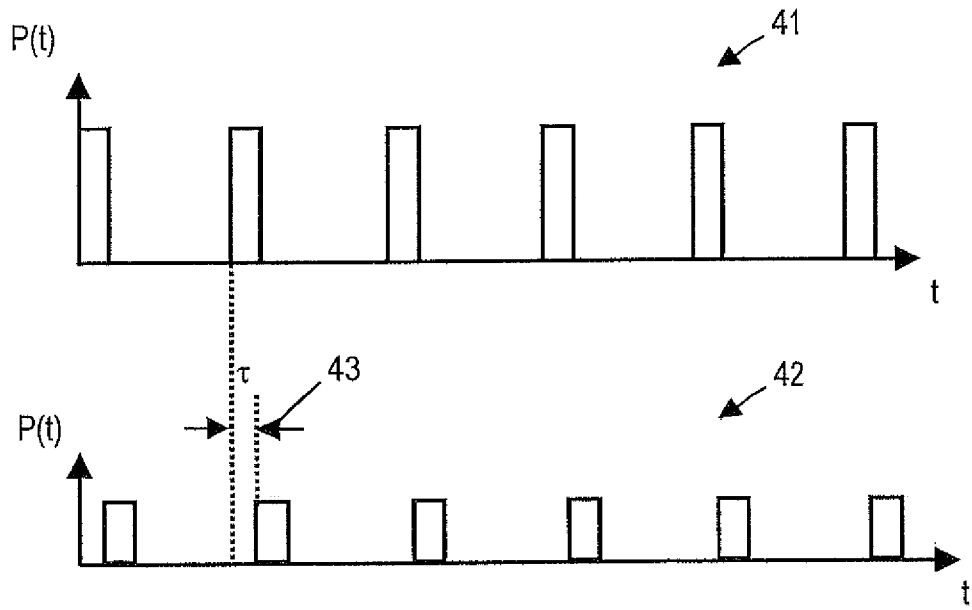


Fig. 4 A

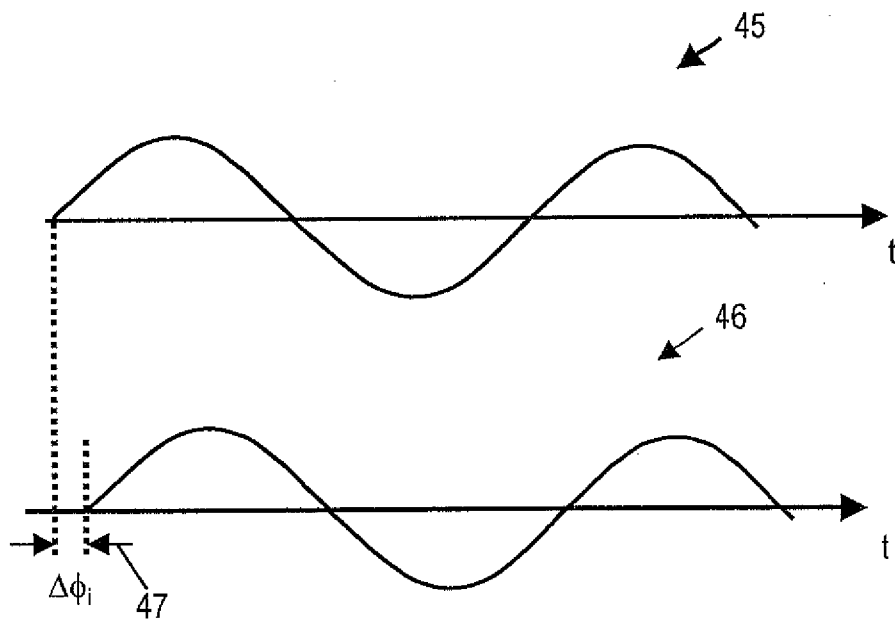


Fig. 4 B

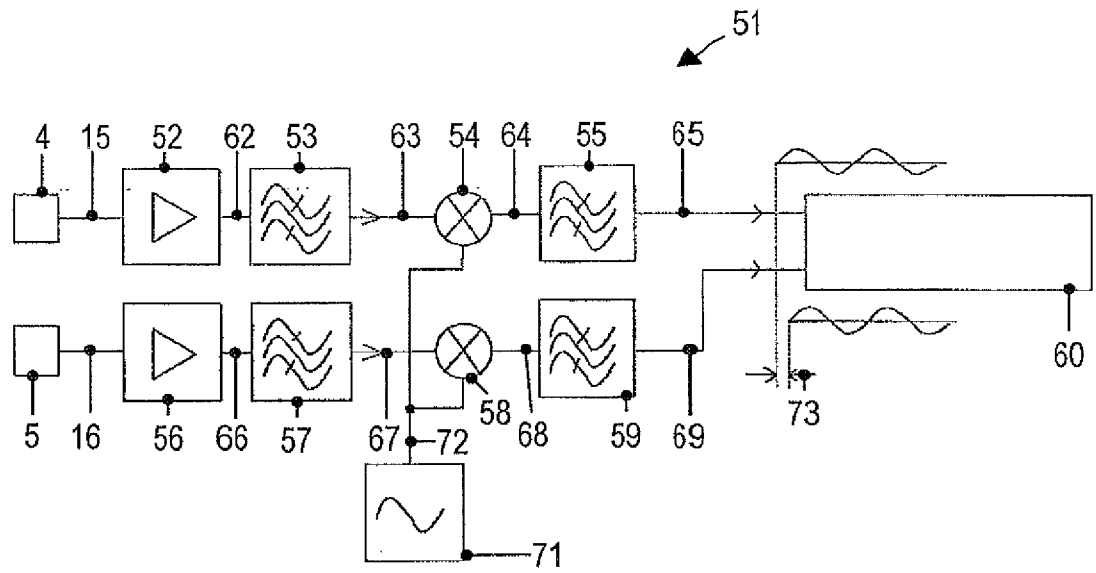


Fig. 5

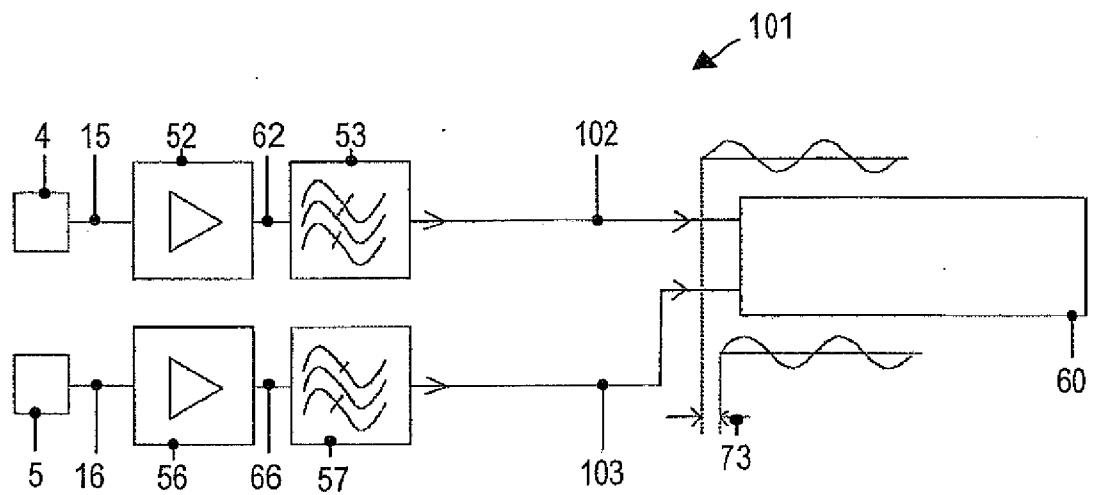


Fig. 7

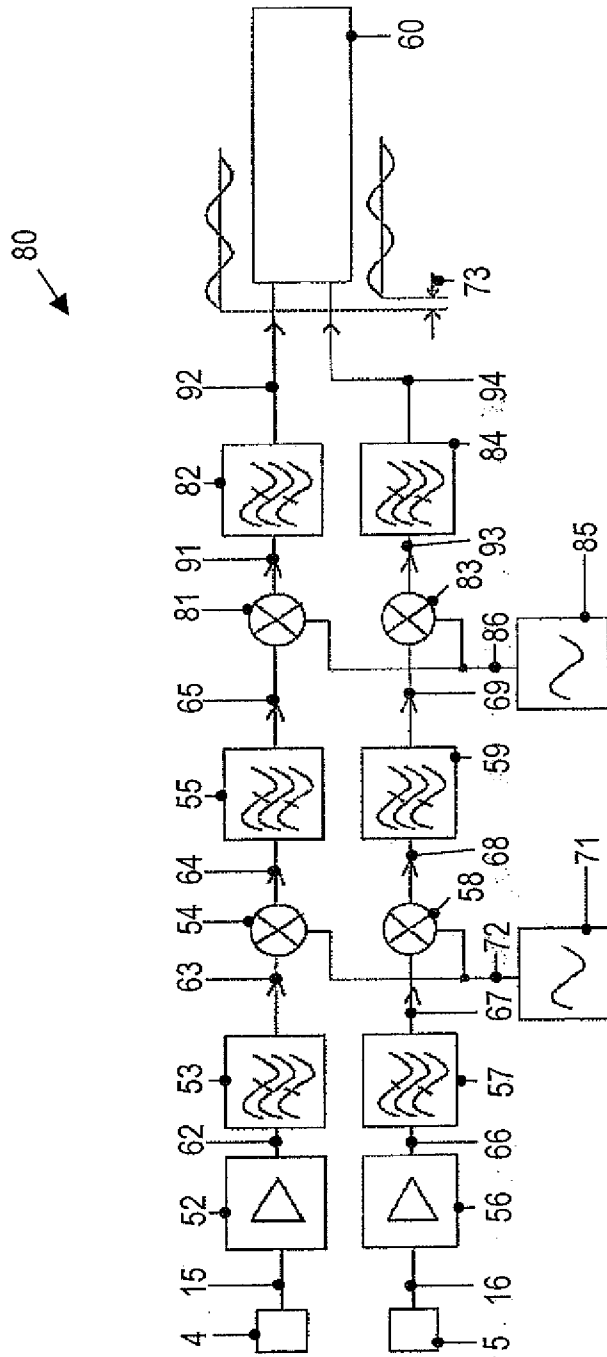


Fig. 6

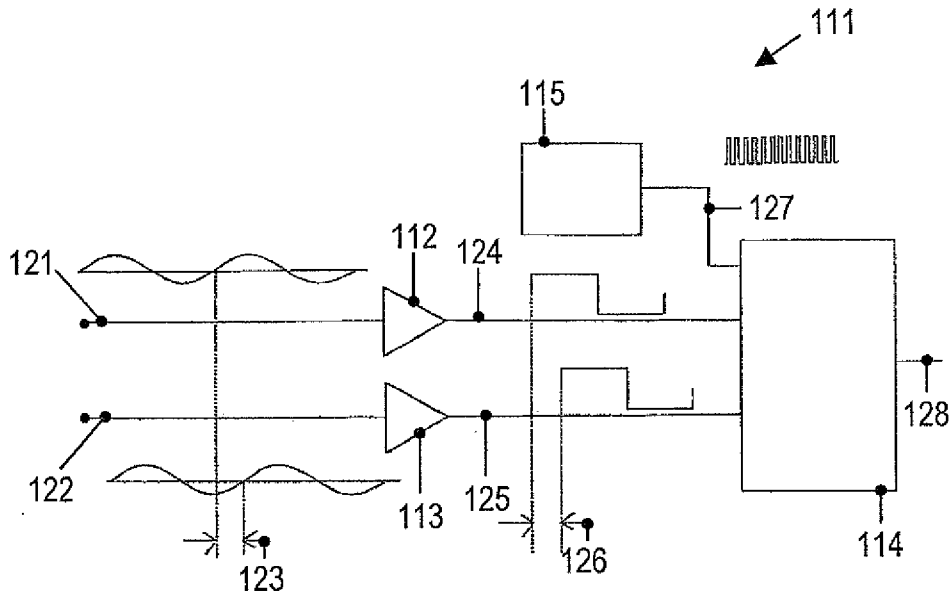


Fig. 8

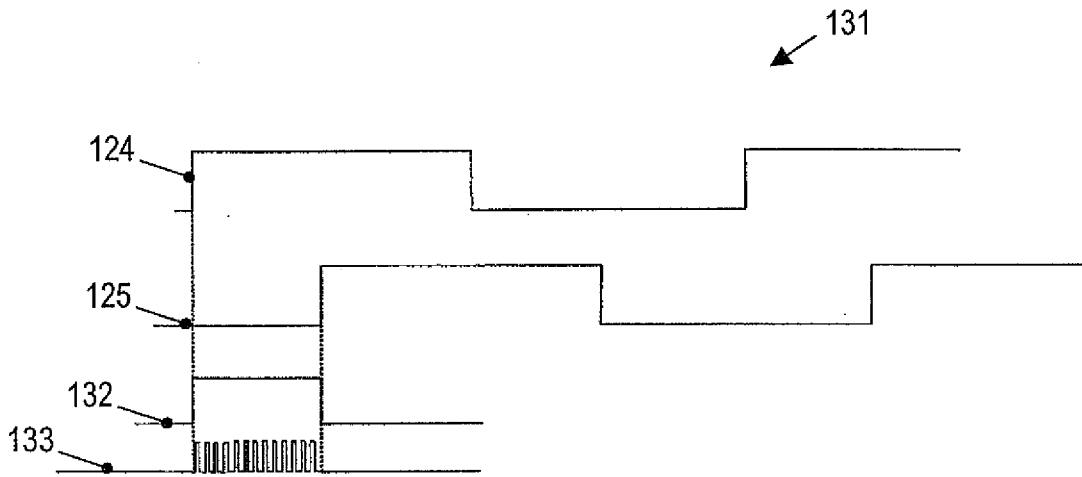


Fig. 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2010/058139

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. G01S17/36 ADD.		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01S		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 4 537 502 A (MILLER DALE D [US] ET AL) 27 August 1985 (1985-08-27) column 1, lines 57-60; figures 2,3,5,4a,4b column 2, lines 2-5,14-40 column 3, lines 1-3	1-14, 16-34
Y	MOHNS E ET AL: "Heterodyne Measurement System (HMS) for Determining Phase Angles" IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US LNKD- DOI:10.1109/TIM.2007.890624, vol. 56, no. 2, 1 April 2007 (2007-04-01), pages 505-508, XP011184280 ISSN: 0018-9456 Gleichung 5; paragraph [00II]; figure 1	1,2, 4-10,13, 16-22, 24,29, 32-34
-/--		
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C.		
<input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents :		
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention	
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone	
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.	
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
Date of the actual completion of the international search <div style="text-align: center; font-weight: bold;">19 August 2010</div>	Date of mailing of the international search report <div style="text-align: center; font-weight: bold;">25/08/2010</div>	
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer <div style="text-align: center; font-weight: bold;">Metz, Carsten</div>	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2010/058139

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	<p>STEIN S ET AL: "Automated High-Accuracy Phase Measurement System" IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 56, no. 1, 1 March 1983 (1983-03-01), pages 227-231, XP011201646 ISSN: 0018-9456 page 228, right-hand column, lines 3-5; figures 1,2 Abschnitt: performance ; page 229, line 9</p>	<p>1,3-5,7, 8,10-14, 16-21, 23-34</p>
X	<p>MINOSHIMA K ET AL: "HIGH-ACCURACY MEASUREMENT OF 240-M DISTANCE IN AN OPTICAL TUNNEL BY USE OF A COMPACT FEMTOSECOND LASER" APPLIED OPTICS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, US LNKD- DOI:10.1364/AO.39.005512, vol. 39, no. 30, 20 October 2000 (2000-10-20), pages 5512-5517, XP000981158 ISSN: 0003-6935 cited in the application page 5512, right-hand column, paragraph 2; figure 2 page 5513, paragraph 3 page 5514, left-hand column, paragraph 1</p>	<p>1,2,13, 15-22, 32-34</p>
A	<p>CH 685 516 A5 (MIVAG AG [LI]) 31 July 1995 (1995-07-31) figure 1</p>	<p>1-34</p>
A	<p>US 6 100 540 A (DUCHARME ALFRED D [US] ET AL) 8 August 2000 (2000-08-08) figures 1,2</p>	<p>1-34</p>

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No PCT/EP2010/058139

Patent document cited in search report	Publication date	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 4537502	A	27-08-1985	NONE	
CH 685516	A5	31-07-1995	AT 402562 B DE 4418608 A1	25-06-1997 01-12-1994
US 6100540	A	08-08-2000	AU 2341600 A CA 2337026 A1 EP 1163489 A1 JP 2002538418 T WO 0050843 A1	14-09-2000 31-08-2000 19-12-2001 12-11-2002 31-08-2000

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2010/058139

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G01S17/36
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTER GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G01S

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	US 4 537 502 A (MILLER DALE D [US] ET AL) 27. August 1985 (1985-08-27) Spalte 1, Zeilen 57-60; Abbildungen 2,3,5,4a,4b Spalte 2, Zeilen 2-5,14-40 Spalte 3, Zeilen 1-3	1-14, 16-34
Y	MOHNS E ET AL: "Heterodyne Measurement System (HMS) for Determining Phase Angles" IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US LNKD-DOI:10.1109/TIM.2007.890624, Bd. 56, Nr. 2, 1. April 2007 (2007-04-01), Seiten 505-508, XP011184280 ISSN: 0018-9456 Gleichung 5; Absatz [00II]; Abbildung 1	1,2, 4-10,13, 16-22, 24,29, 32-34



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

19. August 2010

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

25/08/2010

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Metz, Carsten

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	<p>STEIN S ET AL: "Automated High-Accuracy Phase Measurement System" IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, Bd. 56, Nr. 1, 1. März 1983 (1983-03-01), Seiten 227-231, XP011201646 ISSN: 0018-9456 Seite 228, rechte Spalte, Zeilen 3-5; Abbildungen 1,2 Abschnitt: performance ; Seite 229, Zeile 9</p>	<p>1,3-5,7, 8,10-14, 16-21, 23-34</p>
X	<p>MINOSHIMA K ET AL: "HIGH-ACCURACY MEASUREMENT OF 240-M DISTANCE IN AN OPTICAL TUNNEL BY USE OF A COMPACT FEMTOSECOND LASER" APPLIED OPTICS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, US LNKD- DOI:10.1364/AO.39.005512, Bd. 39, Nr. 30, 20. Oktober 2000 (2000-10-20), Seiten 5512-5517, XP000981158 ISSN: 0003-6935 in der Anmeldung erwähnt Seite 5512, rechte Spalte, Absatz 2; Abbildung 2 Seite 5513, Absatz 3 Seite 5514, linke Spalte, Absatz 1</p>	<p>1,2,13, 15-22, 32-34</p>
A	<p>CH 685 516 A5 (MIVAG AG [LI]) 31. Juli 1995 (1995-07-31) Abbildung 1</p>	<p>1-34</p>
A	<p>US 6 100 540 A (DUCHARME ALFRED D [US] ET AL) 8. August 2000 (2000-08-08) Abbildungen 1,2</p>	<p>1-34</p>

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2010/058139

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 4537502	A	27-08-1985 KEINE	
CH 685516	A5	31-07-1995 AT DE	402562 B 25-06-1997 4418608 A1 01-12-1994
US 6100540	A	08-08-2000 AU CA EP JP WO	2341600 A 14-09-2000 2337026 A1 31-08-2000 1163489 A1 19-12-2001 2002538418 T 12-11-2002 0050843 A1 31-08-2000