



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 130 601.3**  
(22) Anmeldetag: **19.12.2017**  
(43) Offenlegungstag: **19.06.2019**

(51) Int Cl.: **G01S 17/06 (2006.01)**  
**G01S 7/497 (2006.01)**  
**G01C 3/00 (2006.01)**  
**G01B 11/14 (2006.01)**  
**G01B 11/03 (2006.01)**

(71) Anmelder:  
**Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der  
Wissenschaften e.V., 80539 München, DE**

(74) Vertreter:  
**REHBERG HÜPPE + PARTNER Patentanwälte  
PartG mbB, 37073 Göttingen, DE**

(72) Erfinder:  
**Heinzel, Gerhard, Prof. Dr., 30419 Hannover, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**EP 2 634 594 A1**  
**HEINZEL, Gerhard [u.a.]: Deep phase  
modulation interferometry. In: Optics Express**

(OpEx), Bd. 18, 2010, H. 18, - ISSN 1094-4087 (e).  
DOI: 10.1364/OE.18.019076. URL: [https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/A29D2CBD-DCF6-BF0D-AAC44D81D416F429\\_205303/oe-18-18-19076.pdf?da=1&id=205303&seq=0&mobile=no](https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/A29D2CBD-DCF6-BF0D-AAC44D81D416F429_205303/oe-18-18-19076.pdf?da=1&id=205303&seq=0&mobile=no) [abgerufen am 2018-05-04].

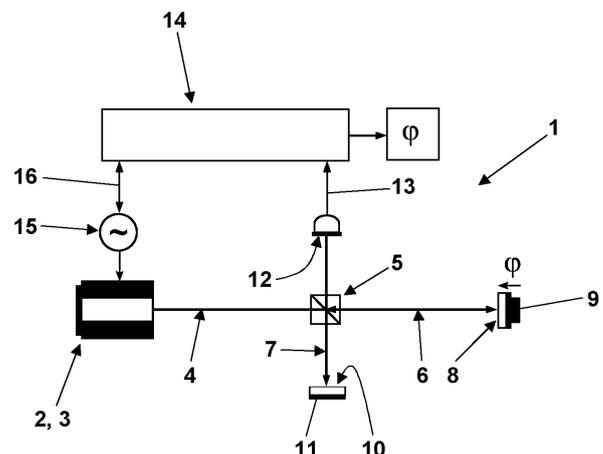
SCHADT, Frank ; MOHR, Friedemann ;  
HOLZER, Markus: Application of kalman filters  
as a tool for phase and frequency demodulation  
of IQ signals. In: Computational Technologies  
in Electrical and Electronics Engineering, 2008.  
SIBIRCON 2008. IEEE Region 8 International  
Conference on, 2008, - ISBN 978-1-4244-2133-  
6 (p); 978-1-4244-2134-3 (CD). DOI: 10.1109/  
SIBIRCON.2008.4602570. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4602570> [abgerufen am 2018-05-04].

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Interferometrische Bestimmung einer Objektposition unter Verwendung eines tieffrequenz- und/oder phasenmodulierten kohärenten Lichtstrahls und eines Kalman-Filters**

(57) Zusammenfassung: Zur interferometrischen Bestimmung der Position eines Objekts (9) wird ein kohärenter Lichtstrahl (4) in zwei Teile (6, 7) aufgeteilt, wird ein erster der beiden Teile (6) von dem Objekt reflektiert, wird ein zweiter der beiden Teile (7) von einem Referenzobjekt (11) reflektiert, werden die reflektierten ersten und zweiten Teile (6, 7) auf einem Photodetektor (12) überlagert, wird der Lichtstrahl (4) hinsichtlich seiner Frequenz und/oder einer der beiden Teile des Lichtstrahls (4) hinsichtlich seiner Phase mit niedriger Modulationsfrequenz (16) moduliert und wird ein Lichtintensität auf dem Photodetektor (12) anzeigendes Signal (13) unter Berücksichtigung der niedrigen Modulationsfrequenz (16) ausgewertet, indem Abtastwerte (23) des Signals (13) fortlaufend einem Kalman-Filter (17) zugeführt werden, das die Position des Objekts (9) als Element eines Zustandsvektors (24') anzeigt.



**Beschreibung**

## TECHNISCHES GEBIET DER ERFINDUNG

**[0001]** Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur interferometrischen Bestimmung der Position eines Objekts, bei dem ein kohärenter Lichtstrahl in zwei Teile aufgeteilt wird, bei dem ein erster der beiden Teile des Lichtstrahls von dem Objekt reflektiert wird, bei dem ein zweiter der beiden Teile des Lichtstrahls von einem Referenzobjekt reflektiert wird, bei dem die reflektierten ersten und zweiten Teile des Lichtstrahls auf einem Photodetektor überlagert werden, bei dem der Lichtstrahl hinsichtlich seiner Frequenz und/oder einer der beiden Teile des Lichtstrahls hinsichtlich seiner Phase mit niedriger Modulationsfrequenz moduliert wird und bei dem ein eine Lichtintensität auf dem Photodetektor anzeigendes Signal unter Berücksichtigung der niedrigen Modulationsfrequenz ausgewertet wird, um die Position des Objekts zu bestimmen.

**[0002]** Weiterhin bezieht sich die vorliegende Erfindung auf eine Vorrichtung zur Durchführung eines solchen Verfahrens mit einer Lichtquelle für den Lichtstrahl, einem Reflektor an dem Objekt, einem weiteren Reflektor an dem Referenzobjekt, dem Photodetektor, Modulationseinrichtungen für das Modulieren des Lichtstrahls hinsichtlich seiner Frequenz und/oder eines der beiden Teile des Lichtstrahls hinsichtlich seiner Phase mit der niedrigen Modulationsfrequenz und einer Auswerteeinrichtung.

## STAND DER TECHNIK

**[0003]** Aus O. Gerberding: Deep frequency modulation interferometry, Optics Express, Vol. 23, No. 11, 14753-14762, 27. Mai 2015 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung der eingangs beschriebenen Art mit den Merkmalen der Oberbegriffe der unabhängigen Patentansprüche 1 und 13 bekannt. Um Laserinterferometrie mit  $\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$  Präzision und einem dynamischen Bereich über mehrere Interferenzmaxima für das Messen der Bewegung eines Testobjekts im Weltraum oder auf der Erde durchzuführen, wird die Frequenz oder Phase des verwendeten Laserlichts mit niedriger Modulationsfrequenz moduliert. Bei geeigneter Wahl der Modulationsfrequenz und der Modulationstiefe wird die Position des interessierenden Objekts in dem mit einem Photodetektor erfassten zeitlichen Verlauf der Intensität der auf dem Photodetektor überlagerten, von dem interessierenden Objekt und dem Referenzobjekt zurücklaufenden Teile des Lichtstrahls codiert. Diese Vorgehensweise kommt mit einem vergleichsweise einfachen interferometrischen Aufbau und geringen Anforderungen an die den modulierten Lichtstrahl bereitstellende Lichtquelle aus. Da jedoch die mit dem Photodetektor erfasste Intensität der miteinander überlagerten Teile des Lichtstrahls nicht linear von der Lichtleistung des

Lichtstrahls, der Effizienz des Photodetektors, einem Kontrast des Signals des Photodetektors, der Modulationstiefe, der Modulationsfrequenz, einer Modulationsphase und dem interessierenden Ort des Objekts abhängt, ist die Auswertung des Signals des Photodetektors komplex. O. Gerberding beschreibt hierfür eine Demodulation von Sinus- und Kosinusanteilen des Signals bei N Harmonischen der Modulationsfrequenz und einen nicht linearen Fit der variablen Größen an die resultierenden Komponenten der komplexen Amplitude des Signals. Diese Vorgehensweise ist aufwändig und kann insbesondere nicht in Echtzeit in einer Auswerteeinrichtung einer Vorrichtung zur interferometrischen Bestimmung der Position eines Objekts durchgeführt werden.

**[0004]** Bereits aus G. Heinzl et al.: Deep phase modulation interferometry, Optics Express, Vol. 18, No. 18, 19076-19086, 30. August 2010 sind ein weiteres Verfahren und eine weitere Vorrichtung der eingangs beschriebenen Art mit den Merkmalen der Oberbegriffe der unabhängigen Patentansprüche 1 und 13 bekannt. Um homodyne Interferometer beim Echtzeit-Tracking mit konstant hoher Empfindlichkeit über viele Interferenzmaxima hinweg verwenden zu können, wird die Phase eines von zwei Teilen eines aufgeteilten Lichtstrahls über einige radian hinweg sinusförmig moduliert. Beide Teile des Lichtstrahls werden ein weiteres Mal aufgeteilt und parallel in einem Messinterferometer und in einem Referenzinterferometer auf einem Messphotodetektor und auf einem Referenzphotodetektor miteinander überlagert. Die von beiden Photodetektoren erfassten Intensitäten der miteinander überlagerten Teile des Lichtstrahls werden jeweils durch eine schnelle Fouriertransformation und einen anschließenden nichtlinearen Fit bezüglich der darin enthaltenen Informationen über die unterschiedlichen Lichtlaufstrecken ausgewertet, bevor eine Differenz der Lichtlaufstrecken gebildet wird. Das bekannte Verfahren ist durch differentielles Erfassen der Wellenfronten (Different Wavefront Sensing) auf empfindliche Winkellagemessungen ausweitbar.

## AUFGABE DER ERFINDUNG

**[0005]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur interferometrischen Bestimmung der Position eines Objekts aufzuzeigen, bei dem/der ein kohärenter Lichtstrahl hinsichtlich seiner Frequenz und/oder einer von zwei Teilen des Lichtstrahls hinsichtlich seiner Phase mit niedriger Modulationsfrequenz moduliert wird und bei dem die Position mit hoher Präzision und über einen großen dynamischen Bereich, aber dennoch in Echtzeit in einer Auswerteeinrichtung der Vorrichtung bestimmt werden kann.

## LÖSUNG

**[0006]** Die Aufgabe der Erfindung wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 1 und eine Vorrichtung mit den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 13 gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens, die sich auch auf die zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens vorgesehene Vorrichtung auswirken, sind in den abhängigen Patentansprüchen 2 bis 12 definiert.

## BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

**[0007]** Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird ein kohärenter Lichtstrahl in zwei Teile aufgeteilt, wird ein erster der beiden Teile von dem Objekt reflektiert, wird ein zweiter der beiden Teile von einem Referenzobjekt reflektiert, werden die reflektierten ersten und zweiten Teile auf einem Photodetektor überlagert und werden Abtastwerte des eine Lichtintensität auf dem Photodetektor anzeigenden Signals einem Kalman-Filter zugeführt. Das Kalman-Filter wertet die Abtastwerte unter Berücksichtigung der niedrigen Modulationsfrequenz aus, mit der der kohärente Lichtstrahl hinsichtlich seiner Frequenz und/oder einer der beiden Teile des Lichtstrahls hinsichtlich seiner Phase moduliert wird. Als Ergebnis dieser Auswertung zeigt das Kalman-Filter die interessierende Position des Objekts als Element eines Zustandsvektors an.

**[0008]** Entsprechend weist die Auswerteeinrichtung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung ein Kalman-Filter auf, und sie ist dazu ausgebildet, dem Kalman-Filter fortlaufend Abtastwerte des Signals des Photodetektors zuzuführen. Das Kalman-Filter ist dazu ausgebildet, unter Berücksichtigung der niedrigen Modulationsfrequenz, mit der die Modulationseinrichtungen den Lichtstrahl hinsichtlich seiner Frequenz und/oder einen der beiden Teile des Lichtstrahls hinsichtlich seiner Phase modulieren, die interessierende Position des Objekts als Element eines Zustandsvektors zu ermitteln und anzuzeigen.

## WEITER STAND DER TECHNIK

**[0009]** Aus F. Schadt et al.: Application of Kalman Filters as a Tool for Phase and Frequency Demodulation of IQ Signals, IEEE REGION 8 SIBIRCON 2008, 421-424 ist es bekannt, ein Kalman-Filter für eine optimale Abschätzung der momentanen Phase und der Winkelfrequenz der beiden Signale eines Quadratursignalpaars zu verwenden, das von einem homodynen Vibrometer von Mach-Zehnder-Architektur erhalten wird. Die Bestimmung der momentanen Phase und der Winkelfrequenz dieser beiden Signale kann alternativ mit einem Differenzier- und Kreuzmultiplizierverfahren (differentiate and cross-multiply algorithm = DACM) durchgeführt werden. F. Schadt et al. geben keinen Hinweis darauf, dass ein Kalman-Filter

ter auch als Ersatz für einen komplexen multidimensionalen nichtlinearen Fit mit vorheriger Demodulation zur Bestimmung verschiedener Koeffizienten einer komplexen Signalamplitude geeignet wäre.

## WEITERE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

**[0010]** Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren werden die Abtastwerte des Signals des Photodetektors fortlaufend dem Kalman-Filter zugeführt, das daraus die Position des Objekts ermittelt und anzeigt, was in Echtzeit und innerhalb einer Auswerteeinrichtung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung möglich ist. Hierzu ist es zwar erforderlich, beim Anlegen des Kalman-Filters die nichtlinearen Abhängigkeiten des Signals des Photodetektors von der interessierenden Position des Objekts und anderen variablen Größen zu berücksichtigen. Dies stellt jedoch kein grundsätzliches Problem dar, wenn der Fachmann ein geeignetes Kalman-Filter, beispielsweise ein sogenanntes erweitertes Kalman-Filter, auswählt, das für eine das Signal beschreibende nichtlineare Zustandsgleichung geeignet ist.

**[0011]** Konkret kann als nichtlineare Zustandsgleichung für das Anlegen des Kalman-Filters die Gleichung

$$V_{PD}(t) = A[1 - c \cdot \cos(m \cos(\omega_m t + \Psi) - \varphi)]$$

verwendet werden, wobei  $V_{PD}(t)$  der Abtastwert des Signals zum Zeitpunkt  $t$ ,  $A$  ein Produkt der Lichtleistung des Lichtstrahls, der Effizienz des Photodetektors sowie weiterer Konstanten,  $c$  ein Kontrast des Signals  $V_{PD}(t)$ ,  $m$  die Modulationstiefe,  $\omega_m$  die niedrige Modulationsfrequenz,  $\Psi$  die Modulationsphase und  $\varphi$  eine Objektphase ist. Dabei entspricht die Objektphase, das ist die Phase des von dem Objekt reflektierten Teils des Lichtstrahls gemäß  $\Delta d = \varphi\lambda/2\pi$  der Position  $d$  bzw. einer Positionsänderung  $\Delta d$  des interessierenden Objekts in Einheiten der Wellenlänge  $\lambda$  des Lichtstrahls. Es versteht sich, dass die obige Zustandsgleichung verschiedene Äquivalente hat. Beispielsweise können die beiden negativen Vorzeichen unabhängig voneinander durch andere Wahl des Bezugspunkts der Modulationsphase bzw. der Objektphase in positive Vorzeichen geändert werden, ohne die Zustandsgleichung in ihrer Substanz zu verändern.

**[0012]** Das Kalman-Filter kann die Position des Objekts auch generell aus der Objektphase des von dem Objekt reflektierten Teils des Lichtstrahls bestimmen und/oder zusätzlich zu der Position des Objekts die Modulationstiefe und die Modulationsphase der Modulation des Lichtstrahls und eine von der Lichtleistung des Lichtstrahls, der Effizienz des Photodetektors sowie dem Kontrast des Signals abhängige Konstante als Elemente des Zustandsvektors anzeigen.

**[0013]** Der von dem Kalman-Filter angezeigte Zustandsvektor kann weiterhin mindestens eine Ableitung der Objektphase, der Modulationstiefe, der Modulationsphase und/oder der Konstanten umfassen, um den Zustand der Messanordnung einschließlich der interessierenden Bewegung des Objekts vollständiger zu beschreiben.

**[0014]** Weiterhin können die Modulationstiefe und/oder die Modulationsphase, die von dem Kalman-Filter angezeigt werden, verwendet werden, um die Modulation des Lichtstrahls bzw. seines einen Teils auf eine vorgegebene Modulationstiefe und/oder eine vorgegebene Modulationsphase sowie auch auf eine vorgegebene Modulationsfrequenz zu regeln. Dabei ergibt sich der Istwert der Modulationsfrequenz als zeitliche Ableitung der Modulationsphase.

**[0015]** Für das Kalman-Filter benötigte Startwerte umfassen neben solchen für die Elemente des von dem Kalman-Filter anzuzeigenden Zustandsvektors die Einträge in einer Kalman-Verstärkung genannten Matrix und in einer sogenannten Kovarianzmatrix. Die Kovarianzmatrix beschreibt die Unsicherheiten in den Schätz- und Messprozessen und damit die Statistik, mit der das reale Signal des Photodetektors aufgrund von Messwertschwankungen gegenüber einem Signal variiert, das das Kalman-Filter berechnen würde, wenn ihm die von ihm auszugebenden Größen exakt bekannt wären. Die Kalman-Verstärkung zeigt die Gewichtungen eines in dem Kalman-Filter implementierten Modells und der Abtastwerte an, die beim Aktualisieren des Zustandsvektors und der Kovarianzmatrix Anwendung finden. Anders gesagt gibt die Kalman-Verstärkung an, wie groß eine sinnvolle Änderung der einzelnen von dem Kalman-Filter ausgegebenen Größen ist, wenn ein Abtastwert des Signals von dem aus den aktuell ausgegebenen Größen abgeschätzten Wert des Signals abweicht.

**[0016]** Insbesondere die Startwerte für die Elemente des Zustandsvektors können auf Basis einer schnellen Fourier-Transformation des Signals und eines nichtlinearen Fits der Elemente des Zustandsvektors an das Fourier-transformierte Signal ermittelt werden. Mit anderen Worten können diese Startwerte unter herkömmlicher Auswertung des Signals des Photodetektors festgelegt werden. Diese herkömmliche Auswertung muss dann aber nur einmal erfolgen. Sobald das Kalman-Filter mit diesen Startwerten läuft, ist eine weitere herkömmliche Auswertung des Signals mit Hilfe eines nichtlinearen Fits entbehrlich.

**[0017]** Startwerte der Elemente des Zustandsvektors, der Einträge in der Kalman-Verstärkung und/oder der Kovarianzmatrix können auch irgendwie abgeschätzt oder auch nur ausprobiert werden. Konkret kann beobachtet werden, ob eine Innovation des Kalman-Filters abnimmt, die einen Umfang der erfolgreichen Anpassungen der Elemente des Zustands-

vektors und der Einträge in der Kovarianzmatrix an die Abtastwerte des Signals anzeigt. Diese Abnahme der Innovation zeigt an, dass sich die von dem Kalman-Filter angezeigten Elemente des Zustandsvektors und Einträge in der Kovarianzmatrix an die realen Größen angepasst haben. Als konkretes Kriterium kann beobachtet werden, ob die Innovation nach einer vorgegebenen Anzahl zugeführter Abtastwerte einen Grenzwert unterschreitet. Falls dies der Fall ist, wird das Kalman-Filter weiterverwendet, um die interessierende Position des Objekts und Änderungen derselben zu bestimmen. Wenn die Innovation nach der vorgegebenen Anzahl zugeführter Abtastwerte den Grenzwert jedoch nicht unterschreitet, ist es sinnvoll, das Kalman-Filter mit anderen Startwerten erneut zu starten, bis Startwerte gefunden sind, mit denen die Innovation bis unter den Grenzwert abklingt. Der Grenzwert berücksichtigt, dass sich die relevanten Größen auch real ändern und diese Änderungen ebenfalls zu einer Innovation des Kalman-Filters führen.

**[0018]** Es können auch mehrere Kopien des Kalman-Filters mit unterschiedlichen Startwerten parallel gestartet werden. Dann kann mindestens eine der Kopien des Kalman-Filters selektiert werden, deren Innovation nach einer vorgegebenen Anzahl zugeführter Abtastwerte einen Grenzwert unterschreitet, um damit die Position des interessierenden Objekts langfristig zu bestimmen und zu verfolgen. Die Kopien des Kalman-Filters mit nicht abklingender Innovation können hingegen verworfen werden. Bei geeigneter Wahl der verschiedenen Startwerte für die mehreren Kopien des Kalman-Filters kann davon ausgegangen werden, dass zumindest eines der Kalman-Filter für die Bestimmung der Position des interessierenden Objekts geeignet ist. So wird nach relativ kurzer Zeit die weitere Bestimmung der Position des interessierenden Objekts in Echtzeit möglich.

**[0019]** Die unterschiedlichen Startwerte für die mehreren Kopien des Kalman-Filters können insbesondere mehrere gleich beabstandete Phasenwerte für die Modulationsphase und/oder für die Objektphase umfassen, so dass zumindest einer der Startwerte der tatsächlichen Modulationsphase bzw. Objektphase ausreichend nahekommt.

**[0020]** Startwerte der auszugebenden Größen und/oder einer Kovarianzmatrix für das Kalman-Filter können auch iterativ, d. h. mindestens einmal verbessert werden, indem der Zustandsvektor, die Kalman-Verstärkung und/oder die Kovarianzmatrix, die von dem Kalman-Filter nach dem Zuführen einer Mehrzahl der Abtastwerte angezeigt werden, als neue Startwerte des Kalman-Filters für das Zuführen derselben Mehrzahl der Abtastwerte verwendet werden. Es versteht sich, dass auf diese Weise nur solche Startwerte verbessert werden können, bei denen die Innovation des Kalman-Filters über die Mehrzahl der Abtastwer-

te hinweg abgenommen hat und idealerweise bereits unter den vorgegebenen Grenzwert abgefallen ist.

**[0021]** Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den Patentansprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen. Die in der Beschreibung genannten Vorteile von Merkmalen und von Kombinationen mehrerer Merkmale sind lediglich beispielhaft und können alternativ oder kumulativ zur Wirkung kommen, ohne dass die Vorteile zwingend von erfindungsgemäßen Ausführungsformen erzielt werden müssen. Ohne dass hierdurch der Gegenstand der beigefügten Patentansprüche verändert wird, gilt hinsichtlich des Offenbarungsinhalts der ursprünglichen Anmeldungsunterlagen und des Patents Folgendes: weitere Merkmale sind den Zeichnungen - insbesondere den dargestellten Geometrien und den relativen Abmessungen mehrerer Bauteile zueinander sowie deren relativer Anordnung und Wirkverbindung - zu entnehmen. Die Kombination von Merkmalen unterschiedlicher Ausführungsformen der Erfindung oder von Merkmalen unterschiedlicher Patentansprüche ist ebenfalls abweichend von den gewählten Rückbeziehungen der Patentansprüche möglich und wird hiermit angeregt. Dies betrifft auch solche Merkmale, die in separaten Zeichnungen dargestellt sind oder bei deren Beschreibung genannt werden. Diese Merkmale können auch mit Merkmalen unterschiedlicher Patentansprüche kombiniert werden. Ebenso können in den Patentansprüchen aufgeführte Merkmale für weitere Ausführungsformen der Erfindung entfallen.

**[0022]** Die in den Patentansprüchen und der Beschreibung genannten Merkmale sind bezüglich ihrer Anzahl so zu verstehen, dass genau diese Anzahl oder eine größere Anzahl als die genannte Anzahl vorhanden ist, ohne dass es einer expliziten Verwendung des Adverbs „mindestens“ bedarf. Wenn also beispielsweise von einem Kalman-Filter die Rede ist, ist dies so zu verstehen, dass genau ein Kalman-Filter, zwei Kalman-Filter oder mehr Kalman-Filter vorhanden sind. Die in den Patentansprüchen angeführten Merkmale können durch weitere Merkmale ergänzt werden oder die einzigen Merkmale sein, die das jeweilige Verfahren aufweist.

**[0023]** Die in den Patentansprüchen enthaltenen Bezugszeichen stellen keine Beschränkung des Umfangs der durch die Patentansprüche geschützten Gegenstände dar. Sie dienen lediglich dem Zweck, die Patentansprüche leichter verständlich zu machen.

#### Figurenliste

**[0024]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand in den Figuren dargestellter bevorzugter Ausführungsbeispiele weiter erläutert und beschrieben.

**Fig. 1** zeigt eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur interferometrischen Bestimmung der Position eines interessierenden Objekts mit dem Grundaufbau eines Michelson-Interferometers.

**Fig. 2** zeigt die Auswirkungen einer Modulation der Frequenz eines von einer Lichtquelle der Vorrichtung gemäß **Fig. 1** abgegebenen Lichtstrahls für verschiedene Objektphasen, die verschiedenen Positionen des interessierenden Objekts entsprechen; und

**Fig. 3** ist ein schematisches Blockdiagramm einer Auswerteeinrichtung der Vorrichtung gemäß **Fig. 1**.

#### FIGURENBESCHREIBUNG

**[0025]** Die in **Fig. 1** dargestellte Vorrichtung **1** weist eine Lichtquelle **2** in Form eines Lasers **3** auf. Die Lichtquelle **2** gibt einen kohärenten Lichtstrahl **4** aus. Der kohärente Lichtstrahl **4** wird mit einem Strahlteiler **5** in einen ersten Teil **6** und einen zweiten Teil **7** aufgeteilt. Der erste Teil **6** des Lichtstrahls **4** wird von einem Reflektor **8** an einem Objekt **9**, dessen Position in der Richtung des Abstands zu dem Strahlteiler **5** von Interesse ist, zu dem Strahlteiler **5** zurückreflektiert. Der Teil **7** des Lichtstrahls **4** wird hingegen von einem weiteren Reflektor **10** an einem Referenzobjekt **11** zu dem Strahlteiler **5** zurückreflektiert. Von dem Strahlteiler **5** werden die Teile **6** und **7** des Lichtstrahls **4** auf einem Photodetektor **12** überlagert. Ein Signal **13** des Photodetektors **12**, das die Intensität des Lichts auf dem Photodetektor **12** anzeigt, wird einer Auswerteeinrichtung **14** zugeführt. Mit Modulationseinrichtungen **15** wird die Frequenz des Lichtstrahls **4** mit einer niedrigen Modulationsfrequenz **16** moduliert. Die Modulationsfrequenz **16** dieser DFM (Deep Frequency Modulation) wird der Auswerteeinrichtung **14** mitgeteilt, und die Auswerteeinrichtung **14** bestimmt aus dem Signal **13** unter Berücksichtigung der Modulationsfrequenz **16** die Position des Objekts **9** bzw. Positionsänderungen des Objekts **9** in Richtung des Teils **6** des Lichtstrahls **4**.

**[0026]** Alternativ oder grundsätzlich auch zusätzlich zu der Frequenz des Lichtstrahls **4** kann auch die Phase eines seiner beiden Teile **6** und **7** mit der niedrigen Modulationsfrequenz **16** oder einer weiteren niedrigen Modulationsfrequenz moduliert werden. Konkret könnte das Referenzobjekt **11** in Richtung des Teils **7** sinusförmig mit der niedrigen Modulationsfrequenz **16** verlagert werden. Hinsichtlich praktischer Ausgestaltungsmöglichkeiten der DPM (Deep Phase Modulation) wird auf G. Heinzl et al., supra verwiesen.

**[0027]** Die Modulation der Frequenz und/oder Phase des Lichtstrahls **4** erfolgt, damit die Position des Objekts **9** in Richtung des Teils **6** des Lichtstrahls **4** ohne hohe apparative Anforderungen mit hoher Ge-

nauigkeit über einem großen dynamischen Bereich von mehreren Wellenlängen des Lichtstrahls **4** erfasst werden kann. Wenn auf die gleiche Weise die Positionen mehrerer nebeneinanderliegender Punkte des Objekts **9** in Richtung des Teils **6** des Lichtstrahls **4** bestimmt werden, kann auch eine Winkellage des Objekts **9** gegenüber dem Teil **6** des Lichtstrahls **4** bzw. können auch deren Änderungen erfasst werden.

**[0028]** Fig. 2 zeigt die Auswirkungen einer Modulation der Frequenz des Lichtstrahls **4** mit einer Modulationstiefe  $m$  von 6 rad bei einer Modulationsphase  $\psi$  von 0 rad für verschiedene Objektphasen  $\varphi$ , wie sie über den Teilfiguren von Fig. 2 angegeben sind. Aufgetragen ist dabei der Verlauf des Signals **13** über der Zeit  $t$  in Kehrwerten der Modulationsfrequenz  $f_{\text{mod}}$ . Jede der verschiedenen Objektphasen  $\varphi$  führt zu einem anderen zeitlichen Verlauf des Signals **13**. Entsprechend lässt sich aus dem Signal **13** die aktuelle Objektphase  $\varphi$  ermitteln. Das Signal **13** ist jedoch nicht nur von der Objektphase  $\varphi$  abhängig, sondern für den Abtastwert  $V_{\text{PD}}(t)$  des Signals **13** zum Zeitpunkt  $t$  gilt

$$V_{\text{PD}}(t) = A \left[ 1 - c \cdot \cos \left( m \cos(\omega_m t + \Psi) - \varphi \right) \right].$$

**[0029]** Dabei ist  $A$  ein Produkt der Lichtleistung des Lichtstrahls und der Effizienz des Photodetektors,  $c$  ein Kontrast des Signals **13**,  $m$  die Modulationstiefe,  $\omega_m$  die niedrige Modulationsfrequenz ausgedrückt als Kreisfrequenz,  $\psi$  die Modulationsphase und  $\varphi$  die interessierende Objektphase. Die Objektphase lässt sich gemäß  $\Delta d = \varphi \lambda / 2\pi$  in den Unterschied in der optischen Weglänge zwischen den beiden Teilen **6** und **7** des Lichtstrahls **4** gemäß Fig. 1 umrechnen, wobei  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichtstrahls **4** ist.

**[0030]** Um kontinuierlich aus den Abtastwerten  $V_{\text{PD}}(t)$  des Signals **13** die aktuelle Objektphase  $\varphi$  bestimmen zu können, umfasst die Auswerteeinrichtung **14** der Vorrichtung **1** gemäß Fig. 1 ein in Fig. 3 schematisch dargestelltes Kalman-Filter **17**. Das Signal **13** wird von einer Abtasteinrichtung **18** abgetastet, die die Abtastwerte  $V_{\text{PD}}(t)$  **23** ermittelt und an das Kalman-Filter **17** weitergibt. Von den Modulationseinrichtungen **15** erhält das Kalman-Filter **17** die Modulationsfrequenz  $\omega_m$  oder  $f_{\text{mod}}$  **16**. Diese Modulationsfrequenz **16** wird auch der Abtasteinrichtung **18** zugeführt, weil es sinnvoll ist, die Dichte der Abtastwerte auf Basis des Kehrwerts der Modulationsfrequenz  $f_{\text{mod}}$  **16**, das heißt der Modulationsperiode, festzulegen. Mindestens werden von der Abtasteinrichtung **18** je Modulationsperiode vier Abtastwerte **23** bestimmt, vorzugsweise aber zehn oder noch mehr.

**[0031]** Ausgehend von Anfangswerten **19** eines die Größen  $A$ ,  $m$ ,  $\psi$  und  $\varphi$  als Elemente umfassenden Zustandsvektors **24** sowie von Einträgen in einer Kovarianzmatrix **20** und in einer Kalman-Verstärkung **25** genannten Matrix bestimmt das Kalman-Filter **17**, das

auf die oben angegebene Abhängigkeit der Abtastwerte  $V_{\text{PD}}(t)$  von den Größen  $A$ ,  $m$ ,  $\psi$  und  $\varphi$  als Zustandsgleichung abgestimmt ist, mit jedem neuen Abtastwert  $V_{\text{PD}}(t)$  **23** unter Berücksichtigung der Modulationsfrequenz  $\omega_m$  bzw.  $f_{\text{mod}}$  aktualisierte Werte **21** der Elemente  $A'$ ,  $m'$ ,  $\psi'$  und  $\varphi'$  des Zustandsvektors **24'** und der Einträge in der Kovarianzmatrix **20'** und in der Kalman-Verstärkung **25'**. Darüber hinaus gibt das Kalman-Filter **17** eine zugehörige Innovation **22** aus, die die Differenz der vorhergesagten Abtastwerte zu den gemessenen Abtastwerten **23** angibt. Diese Innovation **22** nimmt bei passenden Startwerten **19** schnell, d. h. über eine vorgegebene Anzahl von Abtastwerten  $V_{\text{PD}}(t)$  **23**, bis unter einen Grenzwert ab. Diese Abnahme der Innovation **22** zeigt damit an, dass die ausgegebenen aktuellen Werte **21** die bestmögliche Schätzung des tatsächlichen Zustandsvektors **24** aufgrund der Abtastwerte  $V_{\text{PD}}(t)$  sind. Bei nicht abnehmender Innovation **22** sind die Startwerte **19** hingegen zu ändern, und das Kalman-Filter **17** ist neu zu starten. Alternativ können vornherein mehrere Kalman-Filter mit unterschiedlichen Sätzen von Startwerten **19** parallel gestartet werden und hieraus ein oder mehrere Kalman-Filter ausgewählt werden, deren Innovation **22** wie gewünscht unter den vorgegebenen Grenzwert fällt.

**[0032]** Hinsichtlich weiterer Details des Kalman-Filters der Auswerteeinrichtung **14** der erfindungsgemäßen Vorrichtung **1** wird auf Christoph Vorndamme: Development and characterization of a SoC-based phase readout system for deep frequency modulation, Masterarbeit, Hannover, 2017 verwiesen (DOI 10.22027/AEIMTchvorn).

#### Bezugszeichenliste

<b>1</b>	Vorrichtung
<b>2</b>	Lichtquelle
<b>3</b>	Laser
<b>4</b>	Lichtstrahl
<b>5</b>	Strahlteiler
<b>6</b>	erster Teil des Lichtstrahls <b>4</b>
<b>7</b>	zweiter Teil des Lichtstrahls <b>4</b>
<b>8</b>	Reflektor
<b>9</b>	Objekt
<b>10</b>	weiterer Reflektor
<b>11</b>	Referenzobjekt
<b>12</b>	Photodetektor
<b>13</b>	Signal des Photodetektors <b>12</b>
<b>14</b>	Auswerteeinrichtung
<b>15</b>	Modulationseinrichtungen
<b>16</b>	Modulationsfrequenz

- 17 Kalman-Filter
- 18 Abtasteinrichtung
- 19 Startwerte
- 20 Kovarianzmatrix, Startwert
- 20' Kovarianzmatrix, aktualisiert
- 21 aktualisierte Werte
- 22 Innovation
- 23 Abtastwerte
- 24 Zustandsvektor, Startwert
- 24' Zustandsvektor, aktualisiert
- 25 Kalman-Verstärkung, Startwert
- 25' Kalman-Verstärkung, aktualisiert

## ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

### Zitierte Nicht-Patentliteratur

- O. Gerberding: Deep frequency modulation interferometry, Optics Express, Vol. 23, No. 11, 14753-14762, 27. Mai 2015 [0003]
- G. Heinzel et al.: Deep phase modulation interferometry, Optics Express, Vol. 18, No. 18, 19076-19086, 30. August 2010 [0004]
- F. Schadt et al.: Application of Kalman Filters as a Tool for Phase and Frequency Demodulation of IQ Signals, IEEE REGION 8 SIBIRCON 2008, 421-424 [0009]

## Patentansprüche

1. Verfahren zur interferometrischen Bestimmung der Position eines Objekts (9),

- wobei ein kohärenter Lichtstrahl (4) in zwei Teile (6, 7) aufgeteilt wird,
- wobei ein erster der beiden Teile (6) von dem Objekt (9) reflektiert wird,
- wobei ein zweiter der beiden Teile (7) von einem Referenzobjekt (11) reflektiert wird,
- wobei die reflektierten ersten und zweiten Teile (6, 7) auf einem Photodetektor (12) überlagert werden,
- wobei der Lichtstrahl (4) hinsichtlich seiner Frequenz und/oder einer der beiden Teile des Lichtstrahls (4) hinsichtlich seiner Phase mit niedriger Modulationsfrequenz (16) moduliert wird und
- wobei ein eine Lichtintensität auf dem Photodetektor (12) anzeigendes Signal (13) unter Berücksichtigung der niedrigen Modulationsfrequenz (16) ausgewertet wird, um die Position des Objekts (9) zu bestimmen, **dadurch gekennzeichnet**,
- dass Abtastwerte (23) des Signals (13) fortlaufend einem Kalman-Filter (17) zugeführt werden, das die Position des Objekts (9) als Element eines Zustandsvektors (24') anzeigt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Kalman-Filter (17) die Position des Objekts (9) aus einer Objektphase des von dem Objekt (9) reflektierten Teils (6) des Lichtstrahls (4) bestimmt.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der von dem Kalman-Filter (17) angezeigte Zustandsvektor (24') weiterhin eine Modulationstiefe und eine Modulationsphase der Modulation des Lichtstrahls (4) und eine von einer Lichtleistung des Lichtstrahls (4), einer Effizienz des Photodetektors (12) und einem Kontrast des Signals (13) abhängige Konstante umfasst.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass der von dem Kalman-Filter (17) angezeigte Zustandsvektor (24') weiterhin mindestens eine Ableitung der Objektphase, der Modulationstiefe, der Modulationsphase und/oder der Konstanten umfasst.

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Modulationstiefe und/oder die Modulationsphase, die von dem Kalman-Filter (17) angezeigt werden, verwendet werden, um die Modulation des Lichtstrahls (4) und/oder des einen seiner beiden Teile auf eine vorgegebene Modulationstiefe und/oder eine vorgegebene Modulationsphase und/oder eine vorgegebene Modulationsfrequenz (16) zu regeln.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Kalman-Filter

(17) ein erweitertes Kalman-Filter (17) ist, das für eine das Signal (13) beschreibende nichtlineare Zustandsgleichung geeignet ist.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass als nichtlineare Zustandsgleichung für das erweiterte Kalman-Filter (17) die Gleichung

$$V_{PD}(t) = A \left[ 1 - c \cdot \cos \left( m \cos(\omega_m t + \Psi) - \varphi \right) \right]$$

verwendet wird, wobei  $V_{PD}(t)$  der Abtastwert des Signals (13) zum Zeitpunkt  $t$ ,  $A$  ein Produkt der Lichtleistung des Lichtstrahls (4), der Effizienz des Photodetektors (12) sowie weiterer Konstanten,  $c$  ein Kontrast des Signals  $V_{PD}(t)$ ,  $m$  die Modulationstiefe,  $\omega_m$  die niedrige Modulationsfrequenz,  $\Psi$  die Modulationsphase und  $\varphi$  die Objektphase ist.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass Startwerte (19) für das Kalman-Filter (17) auf der Basis einer schnellen Fourier-Transformation des Signals und eines nichtlinearen Fits der auszugebenden Größen an das fouriertransformierte Signal ermittelt werden.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass beobachtet wird, ob eine Innovation des Kalman-Filter (17) bei einem ersten Satz von Startwerten (19) für das Kalman-Filter (17) nach einer vorgegebenen Anzahl zugeführter Abtastwerte einen Grenzwert unterschreitet, und dass dann, wenn die Innovation (22) den Grenzwert nicht unterschreitet, das Kalman-Filter (17) mit anderen Startwerten (19) erneut gestartet wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere Kopien des Kalman-Filters (17) mit unterschiedlichen Startwerten (19) parallel gestartet werden und dass mindestens eine der Kopien des Kalman-Filters (17) selektiert wird, deren Innovation (22) nach einer vorgegebenen Anzahl zugeführter Abtastwerte einen Grenzwert unterschreitet.

11. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die unterschiedlichen Startwerte (19) mehrere gleich beabstandete Phasenwerte für die Modulationsphase und/oder für die Objektphase umfassen.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass Startwerte (19) für das Kalman-Filter zumindest einmal verbessert werden, indem der Zustandsvektor (24), eine Kalman-Verstärkung (25') und/oder eine Kovarianzmatrix (20'), der/die von dem Kalman-Filter (17) nach dem Zuführen einer Mehrzahl der Abtastwerte (23) ausgegeben werden, als neue Startwerte (19)

des Kalman-Filters (17) für das Zuführen der Mehrzahl der Abtastwerte (23) verwendet wird/werden.

13. Vorrichtung zur interferometrischen Bestimmung der Position eines Objekts gemäß dem Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit

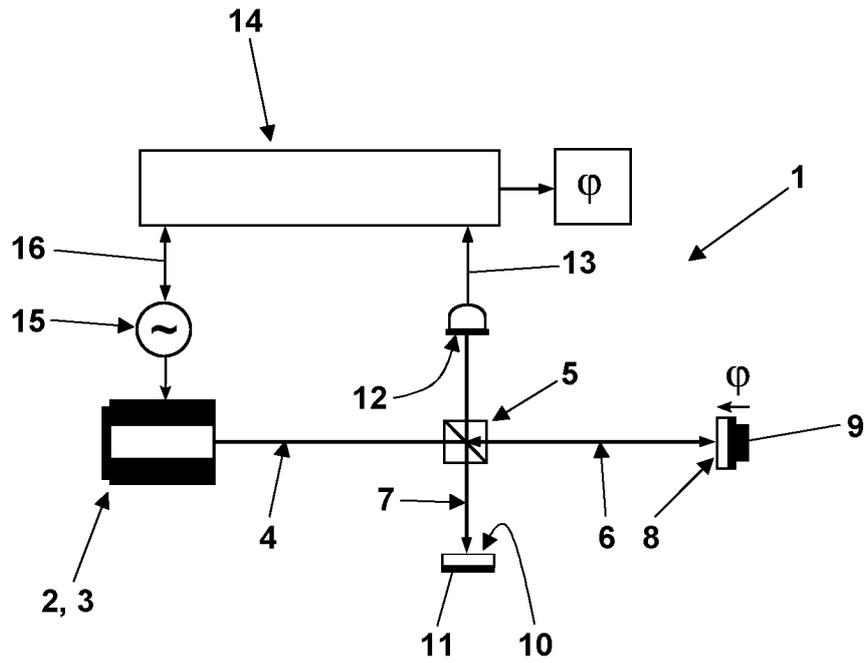
- einer Lichtquelle (2), die einen kohärenten Lichtstrahl (4) abgibt,
- einem Strahlteiler (5), der dazu ausgebildet ist, den Lichtstrahl (4) in zwei Teile (6, 7) aufzuteilen,
- einem Reflektor (8) an dem Objekt (9), der dazu ausgebildet ist, einen ersten der beiden Teile (6) zu reflektieren,
- einem weiteren Reflektor (10) an einem Referenzobjekt (11), der dazu ausgebildet ist, einen zweiten der beiden Teile (7) zu reflektieren,
- einem Photodetektor (12), wobei der oder ein weiterer Strahlteiler (5) dazu ausgebildet ist, die reflektierten ersten und zweiten Teile (6, 7) auf dem Photodetektor (12) zu überlagern,
- Modulationseinrichtungen (15), die ausgebildet sind, um den Lichtstrahl (4) hinsichtlich seiner Frequenz und/oder einen der beiden Teile des Lichtstrahls (4) hinsichtlich seiner Phase mit niedriger Modulationsfrequenz (16) zu modulieren und
- einer Auswerteeinrichtung (14), die dazu ausgebildet ist, ein eine Lichtintensität auf dem Photodetektor (12) anzeigendes Signal (13) unter Berücksichtigung der niedrigen Modulationsfrequenz (16) auszuwerten, um die Position des Objekts (9) zu bestimmen,

**dadurch gekennzeichnet,**

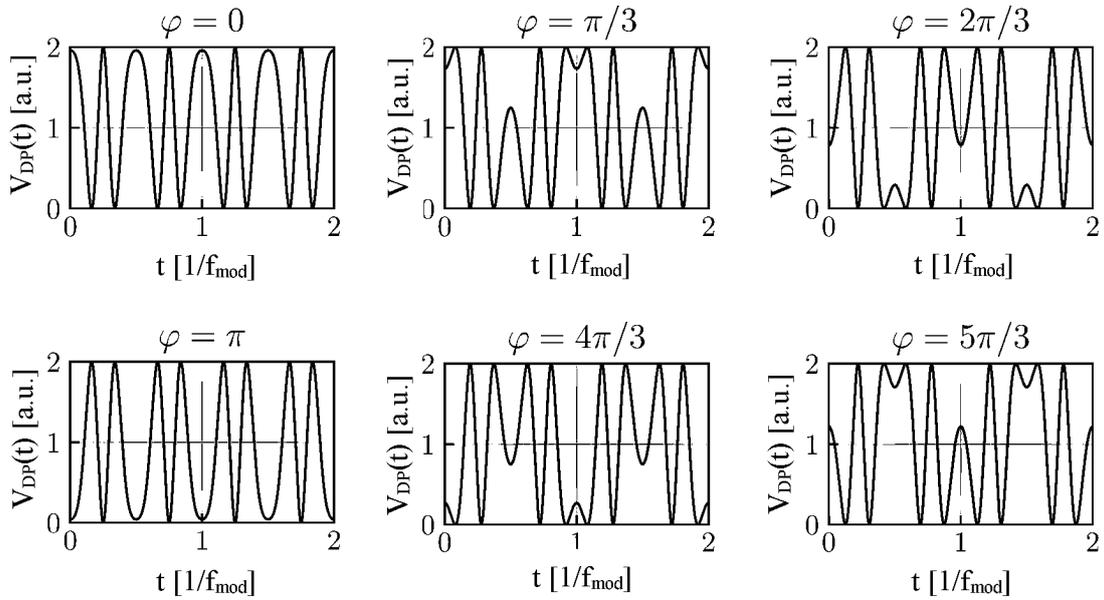
- dass die Auswerteeinrichtung (14) ein Kalman-Filter (17) aufweist, wobei die Auswerteeinrichtung (14) dazu ausgebildet ist, Abtastwerte (23) des Signals (13) dem Kalman-Filter (17) fortlaufend zuzuführen, und wobei das Kalman-Filter (17) dazu ausgebildet ist, die Position des Objekts (9) als Element eines Zustandsvektors (24') anzuzeigen.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

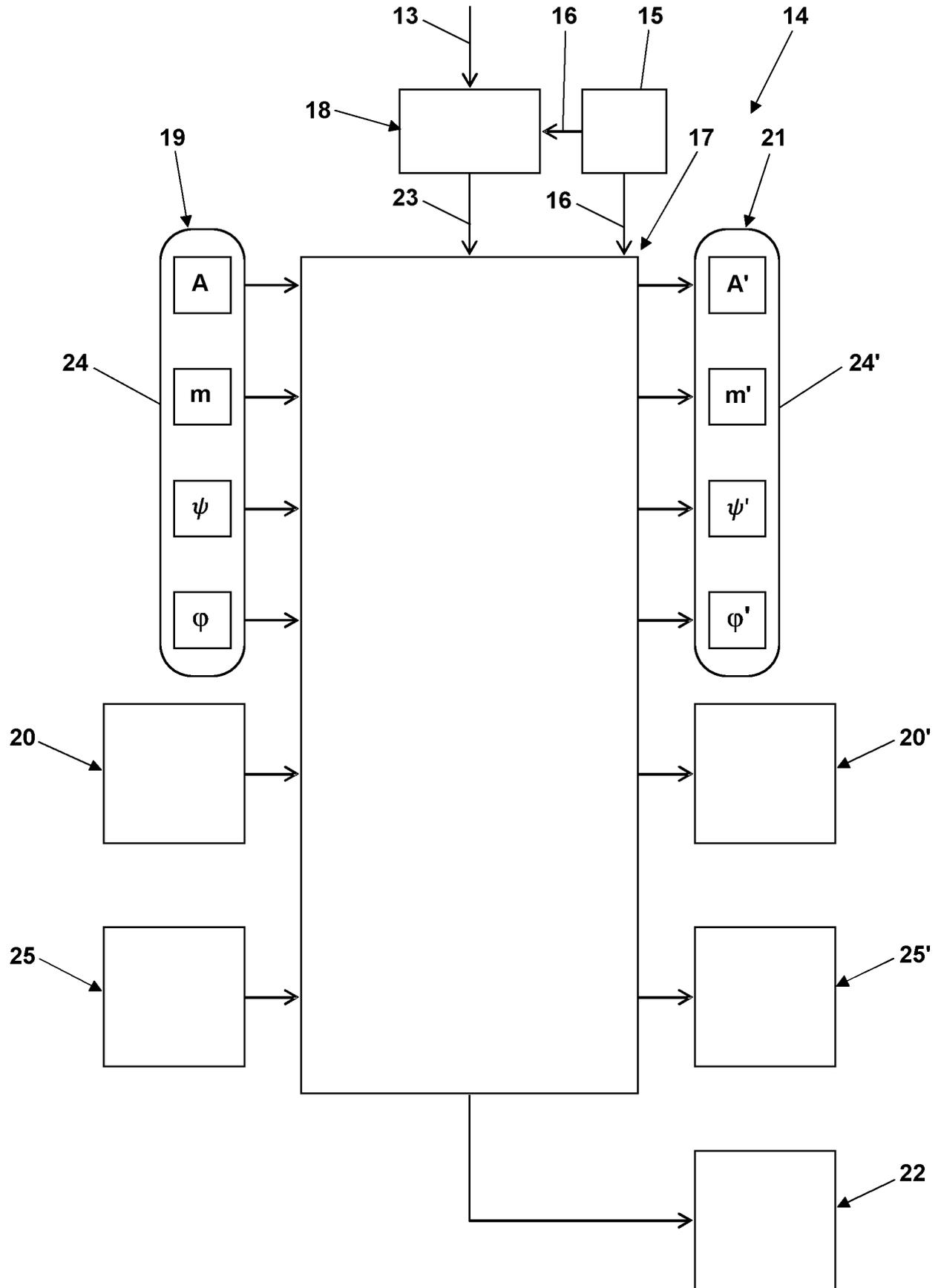
Anhängende Zeichnungen



**Fig. 1**



**Fig. 2**



**Fig. 3**