



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2004 028 204 B3** 2005.10.06

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2004 028 204.8**

(22) Anmeldetag: **09.06.2004**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **06.10.2005**

(51) Int Cl.7: **G01B 9/02**  
**G01J 9/02, G01N 21/17**

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**Medizinisches Laserzentrum Lübeck GmbH,  
23562 Lübeck, DE**

(74) Vertreter:  
**BOEHMERT & BOEHMERT, 24105 Kiel**

(72) Erfinder:  
**Koch, Peter, 23558 Lübeck, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:  
**DE 42 09 260 C2**  
**DE 198 32 175 A1**  
**DE 198 14 068 A1**  
**DE 100 35 833 A1**  
**US2003/02 20 749 A1**  
**US 63 21 501 A**  
**US 61 11 645 A**  
**US 52 20 463 A**  
**US 63 41 870 B1**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Signalauswertung bei der OCT**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zur Signalauswertung bei der OCT mit zeitlich veränderlicher optischer Weglänge im Referenzarm, die durch einen repetierend arbeitenden Phasenmodulator während eines Messzyklus von einem ersten zu einem zweiten Endwert geändert wird durch Ermitteln der Änderungsgeschwindigkeit der optischen Weglänge als Funktion der Zeit aus dem OCT-Messsignal während wenigstens eines Messzyklus und Nutzen der ermittelten Änderungsgeschwindigkeit zur Demodulation des während der folgenden Messzyklen aufgezeichneten OCT-Messsignals.

**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Signalauswertung bei der optischen Kohärenztomographie (OCT).

## Stand der Technik

**[0002]** Die optische Kohärenztomographie erlaubt die nichtinvasive Darstellung und Messung von Strukturen innerhalb eines Gewebes. Ein ausführliches Beispiel für eine Umsetzung wird in der US 5 321 501 dargelegt. Das Prinzip besteht darin, Strahlung mit kurzer Kohärenzlänge zunächst aufzuteilen, die Teilstrahlen jeweils dem Referenz- und Probenarm eines Interferometers zuzuführen, in denen das Licht reflektiert bzw. zurückgestreut wird, und schließlich die zurückkehrenden Teilstrahlen zu überlagern, um das Interferenzmuster auszuwerten. Im Probenarm wird das Licht in unterschiedlichen Tiefen einer – z.B. biologischen – Probe gestreut, wobei das tiefenaufgelöste Streuvermögen der Probe die mit der OCT zu messende Größe ist. Im Referenzarm wird die optische Weglänge typischerweise kontinuierlich verändert. Zum Interferenzsignal trägt eine bestimmte Probentiefe nur dann bei, wenn die optischen Weglängen von Proben- und Referenzlicht innerhalb der Kohärenzlänge des Lichts übereinstimmen. Damit kann bei exakter Kenntnis der Referenzarmlänge die Streuung in einer bestimmten Probentiefe ermittelt werden.

**[0003]** Wenn die Referenzarmlänge mit konstanter Geschwindigkeit  $v$  zwischen einer vorderen und hinteren Endstellung geändert wird (dies definiert die Zeitspanne der Zykluslänge eines einzelnen sogenannten A-Scans), so entsteht bei einer Zentralwellenlänge  $\lambda_0$  der verwendeten Strahlung am Lichtdetektor eine mit der Frequenz

$$\omega_0 = 2\lambda_0 v \quad (1)$$

oszillierende Intensität  $I(t)$ , die mit der Tiefeninformation moduliert ist.

$$I(t) = A(t) \cdot \cos[\omega_0 \cdot t + \varphi] \quad (2)$$

**[0004]** Aus der Amplitude des Signals  $A(t)$  kann so auf die Reflektivität in der zur Referenzarmlänge korrespondierenden Probentiefe geschlossen werden.

**[0005]** Die Aufbereitung des gemessenen Signals erfolgt in der Regel, indem es zunächst einen Bandpassfilter durchläuft, dessen Passband so schmal wie möglich gewählt wird. Optimal ist hier die Bandbreite der Einhüllenden  $A(t)$ , um das breitbandige Rauschen möglichst weitgehend zu beseitigen. Die Amplitude des Signals wird anschließend durch eine Gleichrichtung und nachfolgende Tiefpassfilterung demoduliert. Die Erfassung der Amplituden  $A(t)$  kann sodann mit einer Bandbreite erfolgen, die in der Regel ca. zwei Größenordnung kleiner als  $\omega_0$  ist.

**[0006]** In der OCT Technik sind etliche Vorrichtungen bekannt, die die Länge des Referenzarmes kontinuierlich verändern. Diese auch als Phasenmodulatoren bezeichneten Geräte werden im einfachsten Fall durch einen verschiebbaren Referenzspiegel realisiert (z.B. US 6,341,870 B1 oder US 5,220,463). In der US 6 111 645 wird eine Anordnung verschwenkbarer Spiegel oder Gitter, zwischen denen reflektiertes Licht verschieden lange Wege zurücklegt, vorgestellt. Die DE 198 14 068 A1 beschreibt Phasenmodulatoren, welche auf rotierenden Spiegelanordnungen oder Prismen basieren. Eine weitere effektive Möglichkeit, einen Phasenmodulator zu schaffen, besteht darin, eine Lichtleitfaser zu dehnen (DE 100 35 833 A1).

**[0007]** Bei den genannten Phasenmodulatoren kann die Änderung der Referenzarmlänge nicht über den ganzen Bereich linear in der Zeit, d. h. mit konstanter Geschwindigkeit  $v$ , erfolgen.

**[0008]** Bei den rotatorisch arbeitenden Phasenmodulatoren ist dies eine Folge der inhärent nichtlinearen Beziehung zwischen der konstanten Winkelgeschwindigkeit und der Verlängerung der optischen Weglänge. Bei Phasenmodulatoren, die repetierend eine lineare Bewegung ausführen, sind beschleunigte Bewegungen notwendig, und es entstehen variable Geschwindigkeiten aus dem in der Regel nichtlinearen Verhalten der Antriebe. Das Ausdehnungsverhalten der häufig verwendeten Piezoaktoren zeigt beispielsweise eine ausgeprägte Hysterese. Mechanische Systeme weisen außerdem starke Resonanzen bei bestimmten Anregungsfrequenzen auf. Daher neigen repetierend arbeitende Phasenmodulatoren zu starken Abweichungen der Bewegung vom gewünschten Sollverhalten.

**[0009]** Eine Variation der Geschwindigkeit  $v$ , mit der die optische Weglänge und damit die Phase  $\varphi$  der Referenzstrahlung geändert wird, prägt sich daher der Trägerfrequenz  $\omega_0$  der gemessenen Intensität  $I(t)$  auf, die zu einer amplituden- und frequenzmodulierten Oszillation wird. Um die Frequenzvariation in der Auswertung zu berücksichtigen, ist man gezwungen, Filter mit wesentlich größerer Bandbreite als eigentlich wünschenswert zu verwenden, wodurch sich der Rauschanteil des Signals stark erhöht.

**[0010]** Zudem entstehen Fehler bei der Zuordnung der momentanen Referenzarmlänge, d.h. der Tiefe der Streustruktur in der Probe, zum Messsignal, wenn die optische Weglänge nicht noch mit einem unabhängigen Verfahren gemessen wird. Dies macht sich besonders bei der Anwendung der OCT in der Profilometrie oder Pachymetrie negativ bemerkbar.

**[0011]** Eine Lösung zur Demodulation von Signalen mit schwankenden Trägerfrequenzen ist die Frequenzverfolgung durch so genannte „Phase-Locked-Loops“ (PLLs). Hierfür ist ein Trägersignal mit ausreichender Amplitude erforderlich, das zudem keine Sprünge in der Phasenlage  $\varphi$  aufweist. Beide Voraussetzungen sind bei der OCT von streuenden Objekten wegen der statistischen Verteilung der Streuer in der Probe nicht erfüllt. Selbst bei homogener Verteilung der Streuer bricht das Signal immer wieder auf Null zusammen, und es treten Phasensprünge auf. Dieses Phänomen ist Folge der Interferenz von Strahlung mit statistisch verteilten Phasen und ist analog zu den aus der kohärenten Optik bekannten Specklen. Deshalb können bei der OCT die üblichen elektrotechnischen Verfahren zur Frequenzverfolgung nicht verwendet werden.

**[0012]** Um eine größtmögliche Konstanz der Trägerfrequenz  $\omega_0$  zu erreichen, werden Phasenmodulatoren daher entweder mittels Signalen angesteuert, die die Abweichungen von der konstanten Geschwindigkeit in einem möglichst breiten Bereich des Tiefenscans kompensieren. Dazu wird eine einmalig Kalibrierung durchgeführt, um eine entsprechende Korrekturfunktion zu berechnen. Es zeigt sich aber, dass eine einmalige Kalibrierung oft nicht ausreicht, sondern es sind je nach Betriebsbedingungen und Alterungseffekten von Zeit zu Zeit vom Benutzer neue Kalibrierkurven aufzunehmen.

**[0013]** Alternativ wird die Ansteuerung innerhalb eines geschlossenen Regelkreises (Regelung) realisiert. Hierfür wird mittels eines geeigneten Verfahrens der optische Weg oder die Phasengeschwindigkeit im Phasenmodulator genau erfasst. Die Messwerte werden dann auf den Antrieb des Phasenmodulators so zurück gekoppelt, dass sich die Referenzarmlänge in guter Näherung mit konstanter Geschwindigkeit ändert. Diese Regelung überkommt ggf. zugleich die Drift des Antriebs, und äußere Einflüsse auf sein Verhalten werden kompensiert.

**[0014]** In beiden Fällen ist eine Erfassung der im Phasenmodulator zurückgelegten optischen Weglänge erforderlich. Dies erfolgte, z.B. indem der Drehwinkel oder der Abstand zwischen zwei Baugruppen mittels geeigneter Sensoren erfasst wird. In der Vorrichtung nach der DE 100 35 833 A1, werden z. B. zusätzliche kapazitive Abstandssensoren verwendet.

**[0015]** Aus dem Stand der Technik sind auch Methoden bekannt, die mit optischen Mitteln direkt die Länge eines optischen Weges bzw. einer Phasengeschwindigkeit ermitteln können. Zu nennen sind hier insbesondere Interferometer oder Velocimeter, die mittels einer langkohärenten Laserlichtquelle optische Weglängenänderungen pro Zeiteinheit zwischen zwei reflektierenden Flächen bestimmen.

**[0016]** An die Vorrichtungen zur Bestimmung der optischen Weglängen werden erhebliche technische Anforderungen gestellt. Für eine Regelung entsprechend der DE 100 35 833 A1 ist es z.B. notwendig, die Position mit einer Genauigkeit von weniger als 0,1 nm bei einer Bandbreite von ca. 10 kHz zu bestimmen. Unabhängig davon, ob ein geregelter oder gesteuerter Betrieb gewählt wird, bedarf es Antrieben mit hohen Resonanzfrequenzen, die erhebliche elektrische Leistungen zur Ansteuerung erfordern.

**[0017]** Aus all diesen Gründen trägt die Erzeugung einer konstanten Phasengeschwindigkeit erheblich zu den Gesamtkosten der Phasenmodulatoren bei. Es ist aufwändig mit diesen Verfahren Repetitionsraten besser als ca. 100 Hz zu erreichen. Für Phasenmodulatoren, die entweder auf rotatorischen Bewegungen basieren oder in mechanischer Resonanz betrieben werden, sind Verfahren zur Steuerung oder Regelung gar nicht anwendbar.

#### Aufgabenstellung

**[0018]** Es ist Aufgabe der Erfindung, mit einem vereinfachten OCT Aufbau, insbesondere unter Verzicht auf Komponenten zur Steuerung oder Regelung des Phasenmodulators, Messsignale zu gewinnen, die dennoch

eine Filterung mit enger Bandbreite und somit eine Auswertung mit gutem Signal-Rausch-Verhältnis erlauben.

**[0019]** Die Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Hauptanspruchs. Die Unteransprüche geben vorteilhafte Fortbildungen an.

**[0020]** Die Erfindung macht sich zunutze, dass alle herkömmlichen Phasenmodulatoren eine repetierende (oder auch zyklische) Bewegung durchführen. Die Referenzarmlänge und ihre Änderungsgeschwindigkeit sind damit als Funktionen der Zeit periodisch. Die Kenntnis der Geschwindigkeit des Referenzarms im Laufe eines einzelnen Scans ist somit für relativ kurze Zeiträume auf spätere Scans übertragbar.

**[0021]** Die erfindungsgemäße Vorrichtung verzichtet auf Mittel, die die Konstanz der Phasengeschwindigkeit streckenweise erzwingen. Vielmehr ist sie so ausgebildet, dass die Änderungsgeschwindigkeit der Referenzarmlänge während der laufenden Messung wiederholt erfasst und einem Prozessrechner zur Verfügung gestellt wird. Dies erfordert keine zusätzlichen Messkomponenten, sondern ist unmittelbar aus den ohnehin zu erhebenden Messdaten möglich, die vordergründig der Strukturuntersuchung der Probe dienen.

**[0022]** Es ist dem Fachmann nicht sofort ersichtlich, dass die Messung der Phasengeschwindigkeit nach dem Velocimeter-Prinzip erfolgen kann. Denn ein Velocimeter nach dem Stand der Technik benötigt eine langkohärente Lichtquelle (Laser), die in der OCT-Vorrichtung nicht vorhanden ist. Im Unterschied zu einem Velocimeter, bei dem ein Referenzspiegel ruht und ein zweiter Spiegel mit der zu messenden Probe bewegt wird, werden bei der OCT die integralen Rückstreuungen aus allen Schichten der Probe zeitlich nacheinander mit den Reflexen von verschiedenen Referenzarmstellungen überlagert. Mit einer kurzkohärenten Lichtquelle sind Geschwindigkeitsmessungen nur innerhalb eines Messbereiches möglich, der der Kohärenzlänge der Lichtquelle entspricht (ca. 10  $\mu\text{m}$ ). Für die „lokale“ bzw. momentane Messung der Geschwindigkeit des Referenzspiegels reicht dies jedoch aus.

**[0023]** Das Interferenzsignal  $I(t)$  wird direkt mit einer Abtastrate von wenigstens  $2\omega_0$  abgetastet. Zur Ermittlung von  $\omega_0$  – auf äquidistanten Zeitstützstellen  $t_i$  – erfolgt dann vorzugsweise eine Fenster-Analyse des OCT-Signals. Beispielsweise können die Messwerte von  $I(t)$  jeweils in einem entlang der Zeitachse beweglichen Fenster definierter Breite (wenige Fringes/Oszillationen des Trägers) „lokal“ einer Fourier-Transformation unterzogen werden, um die dominante Frequenz in diesem Zeitfenster zu ermitteln. Hieraus kann die Trägerfrequenz an den Stellen, an denen das Signal ausreichend ist und keine Phasensprünge aufweist, bestimmt und abgespeichert werden. Man erhält eine Tabelle

$$\omega_0(t_i) = 2\lambda_0 \cdot v(t_i) \quad (3)$$

auf den Stützstellen

$$t_i = t_0 + i\Delta t \text{ mit } i = 0, \dots, N \quad (4)$$

**[0024]** Die Referenzarmlängen  $z_i$ , die zu den Zeitpunkten  $t_i$  vorliegen, lassen sich durch einfache Integration bestimmen, beispielsweise über

$$(5) \quad z_i = z(t_i) = z_0 + \sum_{n=0}^{i-1} v(t_n) \Delta t$$

mit irgendeinem Offset  $z_0$ . Es kann auch vorteilhaft sein, einen äquidistanten Satz  $z'_j$  von Stützstellen zu definieren, etwa durch

$$(6) \quad z'_j = z_0 + j\Delta z \quad \text{mit} \quad j = 0, \dots, N \quad \text{und} \quad \Delta z = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v(t_n) \Delta t \quad .$$

**[0025]** Interpoliert man das gemessene OCT-Signal von den unregelmäßig beabstandeten Koordinaten  $z_i$  auf die  $z'_j$ , so ist es von Verzerrungen durch die ungleichmäßige Phasengeschwindigkeit befreit. Es tritt im Idealfall nur noch eine einzige Trägerfrequenz auf.

**[0026]** Um einen vollständigen Verlauf von  $\omega_0$  über den gesamten Messbereich erstellen zu können, muss von der Probe allerdings erwartet werden, dass sie Reflexionen in allen Tiefen aufweist. Ist dies nicht der Fall, kann ein möglichst vollständiger Verlauf von  $\omega_0$  durch Variation des Abstandes des Applikators vom Messobjekt erreicht werden. Vorteilhafterweise ergibt sich bei der typischen OCT-Untersuchung lebender Proben, insbesondere auch an oder in einem Patienten, schon durch die unvermeidliche Eigenbewegung der Probe die

Gelegenheit, Geschwindigkeitsinformationen für alle Referenzarmlängen aus einer Mehrzahl aufeinander folgender Scans zu erhalten. An den Stellen, an denen aufgrund von fehlendem Signal oder von Phasensprüngen die Trägerfrequenz nicht bestimmt werden kann, wird dann auf vorherige Messungen zurückgegriffen. Wegen der statistischen Struktur dieses Phänomens bei streuenden Objekten ist zu erwarten, dass über eine gewisse Zeit für alle optischen Verzögerungen die Phasengeschwindigkeit auf diese Weise bestimmt und abgespeichert werden kann. Die Information über die Trägerfrequenz  $\omega_0$  sollte im Fortgang der OCT-Messung immer wieder im Prozessrechner aktualisiert werden.

**[0027]** Der aus dem aktuellen und vielen vorherigen Scans bestimmte Verlauf von  $\omega_0$  über den Messbereich wird dann zur Demodulation benutzt, die entweder mathematisch auf der digitalisierten Form des Interferenzsignals  $I(t)$  oder analog (z.B. Variation der Filterfrequenz, Mischen mit  $\omega_0$ ) erfolgen kann. Beispielsweise beim Mischen in ein Zwischenband – vorzugsweise auf Differenzfrequenz Null (Lock-In) – kann die gesuchte Amplitudenmodulation entweder direkt erfasst oder zumindest auf eine weitgehend konstante Trägerfrequenz aufgebracht werden, die sich mit enger Bandbreite filtern lässt.

**[0028]** Die hier beschriebene direkte Bestimmung der Trägerfrequenz aus dem Interferenzsignal ist auch deshalb vorteilhaft, weil dann eine unvollständige Kopplungen zwischen der Mechanik und dem optischen Weg nicht zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen.

**[0029]** Hinsichtlich der konkreten Umsetzung der rechnerischen Ermittlung und erst recht der Demodulation lassen sich gewiss viele verschiedene Wege beschreiten. Die Erfindung will sich hier nicht auf bestimmte Algorithmen eingeschränkt verstanden wissen. Wesentlich ist in allen Fällen, dass der Verlauf von  $\omega_0$  im gewöhnlichen Messbetrieb an praktisch beliebigen Proben aufgenommen werden kann, ohne dass die vom Endnutzer beabsichtigte Messung irgendwie beeinträchtigt wird.

**[0030]** Die vorgenannten Wege zur Ausnutzung der Geschwindigkeitsinformation über den Referenzarm zielen auf eine nachträgliche Verbesserung der OCT-Messung im Zuge eines Post-Processing der elektronisch aufgezeichneten Daten ab. Ebenso kann aber bereits die Aufzeichnung selbst so beeinflusst werden, dass von vornherein ein besser zu analysierender Satz von Messdaten gewonnen wird.

**[0031]** Hierfür wird vorgeschlagen, die Messdaten auf den äquidistanten Stützstellen  $z'_j$  gemäß (6) zu erheben. Dazu müssen korrespondierende, unregelmäßig beabstandete Zeitpunkte  $t'_j$  berechnet und an den AD-Wandler übermittelt werden, damit dieser zu den vorgegebenen Zeiten das Signal erfasst.

**[0032]** Eine Möglichkeit zur Berechnung der  $t'_j$  ist folgende:

Jeder nach (5) berechnete Wert  $z_i$  wird irgendeinem Intervall der Breite  $\Delta z$  zugewiesen, d.h. man erstellt eine Liste von Paaren  $(z_i, z'_j)$  mit der Eigenschaft

$$z'_j \leq z_i < z'_{j+1} \quad (7)$$

und berechnet

$$(8) \quad t'_{j+1} = t_i + \frac{z'_{j+1} - z_i}{v(t_i)} \quad \text{für } i = 0, \dots, N \text{ und } j = 0, \dots, N - 1$$

aus den zuerst benutzten, äquidistanten Messzeitpunkten  $t_i$  und den dazu ermittelten Werten  $z_i$  und  $v(t_i)$ . Die zu den  $t'_j$  erhobenen Messwerte ergeben eine OCT-Signalkurve, die frei von Bewegungsartefakten des Phasenmodulators ist. Die weitere Auswertung kann bei gutem Signal-Rausch-Verhältnis nach dem Stand der Technik erfolgen.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Signalauswertung bei der OCT mit zeitlich veränderlicher optischer Weglänge im Referenzarm, die durch einen repetierend arbeitenden Phasenmodulator während eines Messzyklus von einem ersten zu einem zweiten Endwert geändert wird, gekennzeichnet durch
  - Ermitteln der Änderungsgeschwindigkeit der optischen Weglänge als Funktion der Zeit aus dem OCT-Messsignal während wenigstens eines Messzyklus und
  - Nutzen der ermittelten Änderungsgeschwindigkeit zur Demodulation des während der folgenden Messzyklen aufgezeichneten OCT-Messsignals.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Änderungsgeschwindigkeit der optischen Weglänge durch eine Fenster-Analyse der Trägerfrequenz des amplitudenmodulierten OCT-Messsignals ermittelt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass in Fenstern von wenigen Periodenlängen Breite das OCT-Signal einer Fouriertransformation unterzogen wird.
4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Ermittlung der Änderungsgeschwindigkeit der optischen Weglänge für wenigstens zwei Teilstrecken zwischen dem ersten und dem zweiten Endwert aus verschiedenen Messzyklen gewonnen werden.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Änderungsgeschwindigkeit der optischen Weglänge für den gesamten Bereich zwischen dem ersten und dem zweiten Endwert aus den Messwerten für die Teilstrecken kombiniert wird.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Demodulation des OCT-Messsignals durch nachträgliches Berechnen eines demodulierten Signals erfolgt.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das OCT-Messsignal mit der ermittelten zeitabhängigen Trägerfrequenz gemischt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Demodulation des OCT-Messsignals in den der Bestimmung der Änderungsgeschwindigkeit des optischen Weges folgenden Messzyklen während der Datenaufzeichnung der OCT-Messung erfolgt.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass mittels der Änderungsgeschwindigkeit des optischen Weges Zeitpunkte berechnet und an die Messeinheit übermittelt werden, zu denen das OCT-Messsignal erfasst wird.

Es folgt kein Blatt Zeichnungen