



(10) DE 10 2018 105 011 A1 2019.09.05

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: 10 2018 105 011.9

(22) Anmeldetag: 05.03.2018

(43) Offenlegungstag: 05.09.2019

(51) Int Cl.: **G01B 11/06** (2006.01)

G01B 11/14 (2006.01)

G01B 9/02 (2006.01)

(71) Anmelder:
Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, dieses vertreten durch den Präsidenten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, DE

(74) Vertreter:
Gramm, Lins & Partner Patent- und Rechtsanwälte PartGmbB, 38122 Braunschweig, DE

(72) Erfinder:
**Pollinger, Florian, Dr., 38106 Braunschweig, DE;
Prellinger, Günter, 38106 Braunschweig, DE;
Meiners-Hagen, Karl, Dr., 38112 Braunschweig, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE 10 2013 017 289 B4
DE 44 36 922 A1

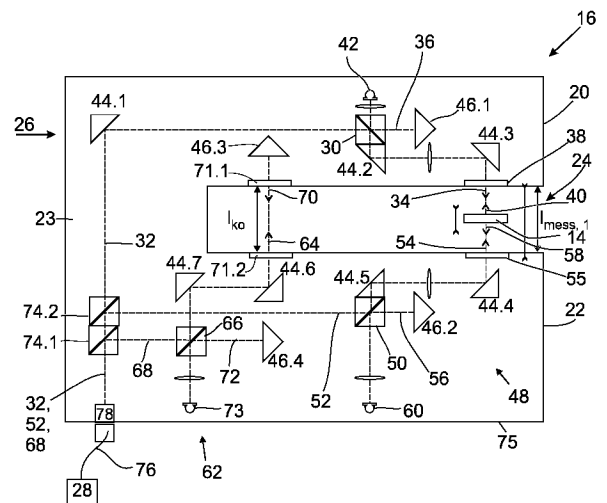
K. Meiners-Hagen, V. Burgarth and A. Abou-Zeid: Profilometry with a multi-wavelength diode laser interferometer. In: Meas. Sci. Technol. 15 (2004) 741-746

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Dickenmessvorrichtung zur Messung einer Dicke flacher Werkstücke und zugehöriges Verfahren**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Dickenmessvorrichtung (16) zur Messung einer Dicke flacher Werkstücke, insbesondere Folien (14), mit (a) einem ersten Arm (20) und einem zweiten Arm (22), die einen Zwischenraum (24) zum Einführen des Werkstücks zwischen einander bilden, (b) einem ersten Interferometer (26) zum Aussenden eines ersten Lichtstrahls (34) auf das Werkstück (14) und Erfassen einer ersten Phase (Φ_o) zwischen dem ersten Lichtstrahl (34) und einem vom Werkstück (14) reflektierten ersten Rücklichtstrahl (40), (c) einem zweiten Interferometer (48) zum Aussenden eines zweiten Lichtstrahls (54) auf das Werkstück (14) und Erfassen einer zweiten Phasen (Φ_u) zwischen dem zweiten Lichtstrahl (54) und einem vom Werkstück (14) reflektierten zweiten Rücklichtstrahl (58), (d) einem dritten Interferometer (62) zum Bilden eines dritten Lichtstrahls (64) von einem Arm (20) zum anderen Arm (22) abseits des Werkstücks (14) und Erfassen einer Kontrollphase (Φ_{ko}) und (e) einer Auswertevorrichtung zum Ermitteln der Dicke des Werkstücks (14) aus Interferometerdaten der Interferometer (26,48,62). Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass die Auswertevorrichtung eingerichtet ist zum automatischen Bestimmen einer effektiven Phase (Φ_{eff}) aus den Phasen (Φ_o , Φ_u , Φ_{ko}) und Bestimmen der Dicke (l_x) aus der effektiven Phase (Φ_{eff}).



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Dickenmessvorrichtung zur Messung einer Dicke flacher Werkstücke, insbesondere Folien, mit (a) einem ersten Arm und einem zweiten Arm, die einen Zwischenraum zum Einführen des Werkstücks zwischen einander bilden, (b) einem ersten Interferometer zum Aussenden eines ersten Lichtstrahls auf das Werkstück und Erfassen einer ersten Phasen (Φ_o) zwischen dem ersten Lichtstrahl und einem vom Werkstück reflektierten ersten Rücklichtstrahl, (c) einem zweiten Interferometer zum Aussenden eines zweiten Lichtstrahls auf das Werkstück und Erfassen einer zweiten Phasen (Φ_u) zwischen dem zweiten Lichtstrahl und einem vom Werkstück reflektierten zweiten Rücklichtstrahl, (d) einem dritten Interferometer zum Bilden eines dritten Lichtstrahls von einem Arm zum anderen Arm abseits des Werkstücks und Erfassen einer Kontroll-Phasen (Φ_{ko}) und (e) einer Auswertevorrichtung zum Ermitteln einer Dicke des Werkstücks aus Interferometerdaten der Interferometer. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Messen einer Dicke flacher Werkstücke.

[0002] Die Bestimmung der Dicke beispielsweise von Metallfolien ist insbesondere bei der Messung von dünnen Folien, die beispielsweise für die Herstellung von Kondensatoren oder Akkumulatoren verwendet werden, mit besonders hoher Messgenauigkeit erforderlich.

[0003] Aus der DE 10 2013 017 289 B4 ist ein Verfahren bekannt, mit dem die interferometrische Dicke von Folien bestimmt werden kann. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass insbesondere bei Einsatz einer derartigen Vorrichtung in einem Walzwerk höchste Genauigkeiten nur schwer zu erreichen sind.

[0004] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Nachteile im Stand der Technik zu vermindern.

[0005] Die Erfindung löst das Problem durch eine gattungsgemäße Dickenvorrichtung, bei der die Auswertevorrichtung eingerichtet ist zum automatischen Bestimmen einer effektiven Phase aus der ersten Phase, der zweiten Phase und der Kontrollphase und zum Bestimmen der Dicke aus der effektiven Phase.

[0006] Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein Verfahren zum Messen einer Dicke flacher Werkstücke, insbesondere Folien, mit den Schritten: (i) Einführen des Werkstücks in einen Zwischenraum einer Dickenmessvorrichtung mit (a) einem ersten Arm und einem zweiten Arm, die den Zwischenraum zwischen einander bilden, (b) einem ersten Interferometer zum Aussenden eines ersten Lichtstrahls auf das Werkstück und Erfassen einer ersten Phasen Φ_o zwischen dem ersten Lichtstrahl und einem vom Werkstück reflektierten ersten Rücklichtstrahl, (c) einem zweiten Interferometer zum Aussenden eines zweiten Lichtstrahls auf das Werkstück und Erfassen einer zweiten Phasen Φ_u zwischen dem zweiten Lichtstrahl und einem vom Werkstück reflektierten zweiten Rücklichtstrahl und (d) einem dritten Interferometer zum Bilden eines dritten Lichtstrahls von einem Arm zum anderen Arm abseits des Werkstücks und Erfassen einer Kontroll-Phasen Φ_{ko} , (ii) Bestimmen einer effektiven Phase Φ_{eff} aus den Phasen Φ_o , Φ_u , Φ_{ko} und (iii) Bestimmen der Dicke l_x , aus der effektiven Phase Φ_{eff} .

[0007] Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass die Dicke als Dickenmesswert erhaltbar ist. Damit werden Kalibriermessungen in der Regel entbehrlich.

[0008] Ein weiterer Vorteil ist es, dass der so erhaltene Messwert für die Dicke vergleichsweise unempfindlich auf Schwankungen des Brechungsindex reagiert. Es hat sich herausgestellt, dass Brechungsindex-Schwankungen eine wichtige Quelle von Messunsicherheit sein können. Das gilt insbesondere dann, wenn - wie gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen - die Dickenmessvorrichtung in einem Walzwerk zwischen zwei Verarbeitungsvorrichtungen zum Bearbeiten, insbesondere Umformen, der Metallfolie angeordnet ist. In diesem Fall kann es zu vergleichsweise starken Schwankungen der Temperatur und/oder der Zusammensetzung der umgebenen Luft kommen. Zwar ist es möglich und gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen, dass Luft mit einer konstanten Temperatur in den Zwischenraum an der Stelle eingedüst wird, an der die Lichtstrahlen auf das Werkstück treffen. Selbst dann kann es aber, beispielsweise durch Verwirbelungen, zu lokalen Schwankungen des Brechungsindex kommen. Das erhöht die Messunsicherheit, was unerwünscht ist. Dadurch, dass die Dicke aus der effektiven Phase bestimmt wird, können solche Schwankungen des Brechwertes zumindest teilweise kompensiert werden.

[0009] Vorteilhaft ist zudem, dass auch kleinere thermische Ausdehnungen und sonstige mechanische Veränderungen der Dickenmessvorrichtung zumindest teilweise kompensierbar sind. Das führt zu einer erhöhten Robustheit der Dickenmessvorrichtung.

[0010] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter einem Werkstück insbesondere ein reflektierendes Werkstück verstanden, sodass die Rücklichtstrahlen entstehen können. Günstig ist es, wenn das flache Werkstück eine Dicke von höchstens 150 µm, vorzugsweise höchstens 60 µm hat. Bei dem Werkstück kann es sich insbesondere um eine Metallfolie handeln. Es ist aber auch möglich, dass es sich bei dem Werkstück um eine Polymerfolie, insbesondere eine beschichtete Polymerfolie, handelt.

[0011] Unter dem Merkmal, dass die erste Phase zwischen dem ersten Lichtstrahl und dem vom Werkstück reflektierten ersten Rücklichtstrahl erfasst wird, wird insbesondere verstanden, dass eine Veränderung des Gangunterschieds zwischen einem ersten Referenz-Lichtstrahl, der aus dem gleichen Quell-Lichtstrahl erhalten wird wie der erste Lichtstrahl, und dem ersten Rücklichtstrahl gemessen wird. Die Veränderung des Gangunterschieds ist die Phasenveränderung relativ zu einer Phase, die ohne Werkstück gemessen wird.

[0012] Das Merkmal des Erfassens der ersten Phase zwischen dem ersten Lichtstrahl und einem vom Werkstück reflektierten ersten Rücklichtstrahl ist daher äquivalent zum Merkmal des Erfassens der ersten Phase zwischen einem ersten Referenz-Lichtstrahl und einem vom Werkstück reflektierten ersten Rücklichtstrahl, wobei der erste Referenz-Lichtstrahl eine konstante Phasendifferenz zu dem ersten Lichtstrahl hat.

[0013] Entsprechend wird unter dem Merkmal, dass die zweite Phase zwischen dem zweiten Lichtstrahl und dem vom Werkstück reflektierten ersten Rücklichtstrahl erfasst wird, insbesondere verstanden, dass eine Veränderung des Gangunterschieds zwischen einem zweiten Referenz-Lichtstrahl, der aus dem gleichen Quell-Lichtstrahl erhalten wird wie der zweite Lichtstrahl, und dem zweiten Rücklichtstrahl gemessen wird.

[0014] Das Merkmal des Erfassens der zweiten Phase zwischen dem zweiten Lichtstrahl und dem vom Werkstück reflektierten zweiten Rücklichtstrahl ist daher äquivalent zum Merkmal des Erfassens der zweiten Phase zwischen einem zweiten Referenz-Lichtstrahl und einem vom Werkstück reflektierten zweiten Rücklichtstrahl, wobei der zweiten Referenz-Lichtstrahl eine konstante Phasendifferenz zu dem zweiten Lichtstrahl hat.

[0015] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform besitzen das erste Interferometer und das zweite Interferometer eine Lichtquelle, die ausgebildet ist zum Abgeben von Licht einer ersten Wellenlänge und von Licht zumindest einer zweiten Wellenlänge, wobei für die Wellenlänge gilt, dass eine erste synthetische Wellenlänge zwischen 1 und 50 µm beträgt. Vorzugsweise beträgt die erste synthetische Wellenlänge höchstens 20 µm.

[0016] Besonders günstig ist es, wenn die Lichtquelle ausgebildet ist zum Abgeben von Licht einer dritten Wellenlänge, die so gewählt ist, dass eine zweite synthetische Wellenlänge, die größer ist als die erste synthetische Wellenlänge, höchstens 200 µm, vorzugsweise höchstens 100 µm, beträgt. Das hat den Vorteil, dass bei hinreichend genauer Kenntnis des Intervalls, in dem das Messergebnis liegen muss, eine absolute Messung möglich ist.

[0017] Es ist vorteilhaft, wenn das erste Interferometer und das zweite Interferometer die gleiche eigene Lichtquelle haben. Besonders günstig ist es, wenn sich die Interferometer gemeinsam genau eine Lichtquelle haben.

[0018] Günstig ist es, wenn die Dickenmessvorrichtung einen Absolut-Dickenmesser zum Bestimmen eines Grob-Dickenmesswerts der absoluten Dicke des Werkstücks aufweist, wobei die Auswerteeinheit eingerichtet ist zum automatischen Bestimmen der Dicke des Werkstücks aus dem Grob-Dickenmesser und der effektiven Phase. Bei dem Grob-Dickenmesser kann es sich beispielsweise um einen Triangulationssensor und/oder einen Absorptionssensor handeln. Interferometrische Messsysteme messen grundsätzlich nur innerhalb eines Wellenzugs genau. Ist der Wellenzug dadurch hinreichend bestimmt, dass Vorinformationen über die Dicke existieren, kann die absolute Dicke berechnet werden. Wie das genau erfolgt, ist weiter unten beschrieben.

[0019] Besonders günstig ist es jedoch, wenn kein Absolut-Dickenmesser vorhanden und/oder verwendet wird. Das ist dann möglich, wenn die größte verwendete synthetische Wellenlänge doppelt so groß ist wie die Dicke des Werkstücks und/oder einer Dickenschwankungen des Werkstücks.

[0020] Vorzugsweise besitzt die Dickenmessvorrichtung eine thermische Isolation der Arme und einen die Arme verbindenden Traverse. Eine Quelle von Messunsicherheit sind Schwankungen der Temperatur der Dickenmessvorrichtung. Insbesondere können thermische Ausdehnungen nach der Nullmessung problematisch sein, da diese zu einer Änderung der Totstrecken führen kann. Durch die thermische Isolation schlagen Schwankungen der Temperatur der Umgebung nur wenig auf die Temperatur der Dickenmessvorrichtung durch, sodass auch bei schwankenden Umgebungstemperaturen eine geringe Messunsicherheit erreichbar ist. Es ist alternativ zusätzlich zudem möglich, dass die Dickenmessvorrichtung ein Thermometer aufweist, mittels

dem die Temperatur zumindest einer der Arme und/oder der Traverse gemessen werden kann. Verlässt die so gemessene Temperatur ein vorgegebenes Soll-Temperaturintervall, so kann ein Alarm ausgegeben werden. Alternativ oder zusätzlich kann das Messergebnis anhand des Temperaturmesswerts korrigiert werden.

[0021] Günstig ist es zudem, wenn die Dickenmessvorrichtung ein Thermometer zum Messen der Lufttemperatur und/oder ein Hygrometer zum Messen der Luftfeuchtigkeit der Luft im Zwischenraum aufweist. Zusätzlich ist es günstig, wenn die Auswerteeinheit in diesem Fall ausgebildet ist zum Berechnen des Brechungsindex aus den gemessenen Daten, wobei die Dicke zumindest auch anhand des so bestimmten Brechungsindex bestimmt wird.

[0022] Vorzugsweise legt der dritte Lichtstrahl eine Messstreckenlänge außerhalb der Dickenmessvorrichtung zurück, die zwischen dem 0,85-fachen und dem 1,15-fachen der Korrekturstreckenlänge beträgt. Alternativ oder zusätzlich beträgt eine zweite freie Wegstrecke, die der zweite Lichtstrahl maximal außerhalb der Dickenmessvorrichtung zurücklegen kann, zwischen dem 0,85-fachen und dem 1,15-fachen der Korrekturstreckenlänge. Der Weg, den der erste bzw. der zweite Lichtstrahl maximal außerhalb der Dickenmessvorrichtung zurücklegen kann, kann der Abstand zwischen zwei Fenstern sein, durch die erste Lichtstrahl bzw. der zweite Lichtstrahl austreten. Existiert kein Werkstück, so tritt der erste Lichtstrahl aus dem ersten Fenster aus und in das zweite Fenster ein. In der Regel ist daher eine lichte Weite des Zwischenraums im Bereich der Fenster gleich der entsprechenden freien Wegstrecke. Wie weiter unten erläutert wird, ist die Messunsicherheit umso kleiner, je weniger die jeweilige freie Wegstrecke von der Korrekturstreckenlänge abweicht. Die oben genannten Merkmale führen daher zu einer besonders geringen Messunsicherheit.

[0023] Vorzugsweise verlaufen der erste Lichtstrahl und der zweite Lichtstrahl coaxial und antiparallel zueinander. Unter dem Merkmal, dass der zweite Lichtstrahl coaxial verlaufen, wird insbesondere verstanden, dass ein Abstand einer ersten Geraden von einer zweiten Geraden höchstens 100 µm beträgt, wobei die erste Gerade eine Ausgleichsgerade durch den ersten Lichtstrahl ist und die zweite Gerade die Ausgleichsgerade durch den zweiten Lichtstrahl. In anderen Worten ist die erste Gerade diejenige Gerade, für die gilt, dass die aufintegrierte über die Erstreckung des Lichtstrahls quadrierte Abweichung zwischen der Geraden einerseits und den Maxima der Lichtintensität des zweiten Lichtstrahls andererseits minimal wird.

[0024] Unter dem Merkmal, dass der erste Lichtstrahl und der zweite Lichtstrahl antiparallel zueinander verlaufen, wird insbesondere verstanden, dass sie aufeinander zu verlaufen. Die erste Gerade bildet mit der zweiten Geraden vorzugsweise einen Winkel von höchstens 0,2 °, besonders bevorzugt höchstens 0,1 °.

[0025] Eine bevorzugte Ausführungsform der Dickenmessvorrichtung besitzt eine Blasvorrichtung zum kontinuierlichen Blasen von sauberer Luft oder auch Stickstoff in den Zwischenraum, wobei die Blasvorrichtung eine Temperatur-Konstanthaltevorrichtung aufweist, mittels der die Temperatur der ausgeblasenen Luft in einem vorgegebenen Temperaturintervall gehalten wird, wobei eine Intervallbreite dieses Temperaturintervalls höchstens 1 Kelvin beträgt.

[0026] Erfindungsgemäß ist zudem ein Walzwerk zum Herstellen einer Metallfolie, das eine Walzvorrichtung zum Walzen der Metallfolie und eine erfindungsgemäße Dickenmessvorrichtung aufweist, wobei das Walzwerk vorzugsweise eine Bearbeitungsvorrichtung aufweist. Die Dickenmessvorrichtung ist in Materialflussrichtung hinter der Walzvorrichtung angeordnet.

[0027] Die Bearbeitungsvorrichtung ist - sofern vorhanden - in Materialflussrichtung hinter der Dickenmessvorrichtung angeordnet. Bei der Bearbeitungsvorrichtung kann es sich beispielsweise um eine zweite Walzvorrichtung, eine Beschichtungsvorrichtung oder eine sonstige Vorrichtung zum Bearbeiten der Metallfolie handeln. In einem derartigen Walzwerk kann es zu häufigen Wechseln der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und/oder der Konzentration an Spurengasen, insbesondere von Kohlenwasserstoffen, kommen. Diese haben einen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis, sodass die erfindungsgemäße Dickenmessvorrichtung in einem derartigen Umfeld besonders vorteilhaft eingesetzt werden kann.

[0028] Günstig ist es, wenn das Walzwerk zwei erfindungsgemäße Dickenmessvorrichtungen aufweist, von denen eine in Materialflussrichtung vor der Walzvorrichtung angeordnet ist und eine in Materialflussrichtung hinter der Walzvorrichtung. Auf diese Weise kann der Walzprozess, den die Walzvorrichtung durchführt, überwacht werden.

[0029] Vorzugsweise besitzt das Walzwerk eine Regelung, die mit der Dickenmessvorrichtung und der Walzvorrichtung verbunden ist und eingerichtet ist zum automatischen Einstellen einer Walzkraft anhand der von

der Dickenmessvorrichtung gemessenen Dicke, sodass sich die Dicke des Werkstücks einer vorgegebene Soll-Dicke annähert.

[0030] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Figuren näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1 eine schematische Ansicht eines erfindungsgemäßen Walzwerks,

Fig. 2 einen Querschnitt durch eine erfindungsgemäße Dickenmessvorrichtung und

Fig. 3 eine schematische Darstellung des Vorgehens beim Berechnen der Dicke aus den Phasenmesswerten.

[0031] **Fig. 1** zeigt schematisch ein erfindungsgemäßes Walzwerk **10** mit einer Walzvorrichtung **12** zum Walzen einer Metallfolie **14**. In einer Materialflussrichtung **M** hinter der Walzvorrichtung **12** ist eine erfindungsgemäße Dickenmessvorrichtung **16** angeordnet. Wiederum in Materialflussrichtung **M** hinter der Dickenmessvorrichtung **16** befindet sich eine Bearbeitungsvorrichtung **18**, beispielsweise eine Beschichtungsvorrichtung oder eine weitere Walzvorrichtung.

[0032] **Fig. 1** zeigt, dass die Dickenmessvorrichtung **16** einen ersten Arm **20** und einen zweiten Arm **22** aufweist, die mittels einer Traverse **23** verbunden sind und zwischen denen ein Zwischenraum **24** ausgebildet ist.

[0033] **Fig. 2** zeigt die Dickenmessvorrichtung **16** in einem Querschnitt. Die Dickenmessvorrichtung **16** umfasst ein erstes Interferometer **26**, das eine Lichtquelle **28** besitzt. Das erste Interferometer **26** umfasst zudem einen ersten Strahlteiler **30** zum Abteilen eines ersten Lichtstrahls **34** aus dem Quell-Lichtstrahl **32**. Hinter dem ersten Strahlteiler verläuft der erste Lichtstrahl **34** als erster Referenz-Lichtstrahl **36**.

[0034] Der erste Lichtstrahl **34** tritt durch ein erstes Fenster **38** aus der Dickenmessvorrichtung aus und fällt auf das Werkstück **14**, wo es reflektiert wird. Auf diese Weise entsteht ein erster Rücklichtstrahl **40**, der im Strahlteiler **30** mit dem ersten Referenz-Lichtstrahl **36** interferiert. Das entstehende Interferenzmuster wird von einem ersten Detektor **42** erfasst. Zum Leiten des Lichts dienen Strahlumlenker **44.1**, **44.2**, **44.3** sowie ein Retroreflektor **46.1**.

[0035] Die Dickenmessvorrichtung **16** umfasst zudem ein zweites Interferometer **48**, das die Lichtquelle **28** und einen zweiten Strahlteiler **50** aufweist. Der zweite Strahlteiler **50** teilt einen zweiten Quell-Lichtstrahl **52**, der im vorliegenden Fall aus dem ersten Quell-Lichtstrahl **32** abgeteilt wurde, in einen zweiten Lichtstrahl **54** und einen zweiten Referenz-Lichtstrahl **56**. Der zweite Lichtstrahl **54** tritt durch ein Fenster **55** in den Zwischenraum **24** ein und wird vom Werkstück **14** reflektiert, sodass ein Rücklichtstrahl **58** entsteht, der mit dem zweiten Referenz-Lichtstrahl **56** interferiert. Das entstehende Interferenzmuster wird von einem zweiten Detektor **60** erfasst. Bei den Detektoren **42**, **60** handelt es sich beispielsweise um Fotodioden oder ein Arrays aus Fotodioden.

[0036] Die Dickenmessvorrichtung **16** besitzt zudem ein drittes Interferometer **62** zum Bilden eines dritten Lichtstrahls **64** vom ersten Arm **20** zum zweiten Arm **22**. Das dritte Interferometer **62** weist einen dritten Strahlteiler **66** auf, der einen dritten Quell-Lichtstrahl **68** in den dritten Lichtstrahl **64** und einen dritten Referenz-Lichtstrahl **72** teilt. Der dritte Lichtstrahl **64** tritt durch ein Fenster **71.1** in den Zwischenraum **24** ein und durch ein Fenster **71.2** aus. Das auf dem Strahlteiler **66** entstehende Interferenzmuster aus dem dritten Referenz-Lichtstrahl **72** und einem dritten Rücklichtstrahl **70**, der nach Reflexion des dritten Lichtstrahls **64** an einem Retroreflektor **46.3** entsteht, wird mittels eines dritten Detektors **73** erfasst.

[0037] Im vorliegenden Fall teilen sich alle Interferometer **26**, **48**, **62** die gleiche Lichtquelle **28**, aus deren Strahl mittels zweier Strahlteiler **74.1**, **74.2** die jeweiligen Quell-Lichtstrahlen **32**, **52**, **68** erzeugt werden.

[0038] Die in **Fig. 2** gezeigten optischen Komponenten können auf einer Basis **75** montiert sein, beispielsweise einer Granitplatte. Es ist aber auch möglich, dass die Lichtquelle **28** - wie in **Fig. 1** gezeigt - nicht auf der Basis **75** montiert ist. Die Lichtquelle **28** ist kann - im vorliegenden Fall - mittels einer Glasfaserleitung **76** mit einem Anschluss **78** verbunden sein, mittels dem das Licht aus der Glasfaserleitung **76** in die Strahlengänge eingekoppelt wird.

[0039] Die Lichtquelle **28** gibt kohärentes Licht mit einer ersten Wellenlänge λ_1 , λ_2 und einer dritten Wellenlänge λ_3 ab. Das erste Interferometer **26** misst eine erste Phase Φ_o , das zweite Interferometer **48** eine zweite Phase Φ_u . Das dritte Interferometer **62** misst eine dritte Phase Φ_{ko} .

[0040] Nicht eingezeichnet ist, dass die Dickenmessvorrichtung **16** ein Gehäuse aufweist, das die Basis **75** umgibt und thermisch isoliert ist, beispielsweise mittels Isolationsmaterial, wie Glaswolle, Steinwolle oder Vakuumdämmplatten.

[0041] Der dritte Lichtstrahl **64** legt eine Strecke l_{ko} im Zwischenraum **24** zurück. Der erste Lichtstrahl **34** kann maximal eine erste freie Wegstrecke $l_{mess,1}$ außerhalb der Dickenmessvorrichtung **16** zurücklegen, nämlich durch den Zwischenraum **24**. Der zweite Lichtstrahl **54** kann maximal eine zweite freie Wegstrecke $l_{mess,2}$ außerhalb der Dickenmessvorrichtung **16** zurücklegen, wobei im vorliegenden Fall die zweite freie Wegstrecke $l_{mess,2}$ der ersten freien Wegstrecke $l_{mess,1}$ entspricht.

[0042] Zur Auswertung der Messergebnisse wird die 2f/3f Detektion verwendet. Das 2f/3f Detektionsverfahren ermöglicht eine parallele Detektion mehrerer Interferometersignale mit jeweils einem einzigen Detektor **42, 60** bei verschiedenen Trägerfrequenzen $2\omega_{mi}$ und $3\omega_{mi}$. Das Verfahren ist wohl bekannt und beispielsweise in Meiners-Hagen et al., Meas. Sci. Techn. 15,741 (2004) beschrieben.

[0043] Die Lichtquelle **28** umfasst in der vorliegenden Ausführungsform für jede verwendete Wellenlänge eine Laserdiode. Am Arbeitspunkt jeder dieser Laserdioden wird der Betriebsstrom mit der Frequenz ω_m moduliert. Dies modifiziert sowohl die Intensität als auch die Frequenz ν des emittierten Laserstrahls: $\nu = \nu_0 + \Delta\nu \times \sin(\omega_m t)$, wobei t der Zeit und $\Delta\nu$ dem induzierten Frequenzhub entspricht. Vernachlässigt man die Intensitätsmodulation, so misst man an einem Detektor das Signal

$$I = I_0 \left[1 + \cos \left(4\pi \frac{1}{c} (\nu_0 + \Delta\nu \sin(\omega_m t)) \right) \right] \equiv I_0 \left[1 + \cos(\Phi_0 + \Delta\Phi \sin(\omega_m t)) \right] \quad (1)$$

wobei l dem Gangunterschied der beiden Interferometerarme, c der Lichtgeschwindigkeit, Φ_0 der zu messenden Interferometerphase und $\Delta\Phi = 4\pi \frac{\Delta\nu}{c} l$ der Amplitude c der Phasenmodulation entspricht. Das Intensitätssignal (1) kann in Besselfunktionen $J_i(x)$ entwickelt werden:

$$I = I_0 \left[1 + J_0(\Delta\Phi) \cos(\Phi_0) - 2J_1(\Delta\Phi) \sin(\omega_m t) \sin(\Phi_0) + 2J_2(\Delta\Phi) \cos(2\omega_m t) \cos(\Phi_0) - 2J_3(\Delta\Phi) \sin(3\omega_m t) \sin(\Phi_0) + \dots \right] \quad (2)$$

[0044] Physikalisch bedeutet das, dass die Intensität mit Harmonischen der Modulationsfrequenz ω_m oszilliert. Die Amplitude der i -ten Harmonischen $i\omega_m$ ist proportional zum Wert der i -ten Besselfunktion $J_i(\Delta\Phi)$ sowie dem Sinus beziehungsweise Kosinuswert der Interferometerphase Φ_0 .

[0045] Die Armlängendifferenz l und die Frequenzmodulationsamplitude sind so gewählt, dass die Amplitude zweier geeignet gewählter konsekutiver Besselfunktionen gleich groß ist, es also gilt $J_i(\Delta\Phi) = J_{i+1}(\Delta\Phi)$. Nun kann die Amplitudenmodulation durch die Diodenstrommodulation in 0-ter Näherung die Intensität bei der Fundamentalfrequenz ω_m stören. Bevorzugt wird daher bei $2\omega_m$ und $3\omega_m$ mit phasensensitiver Detektion gemessen, also einer Lock-In Technik, die Amplituden $I(2\omega_m)$ und $I(3\omega_m)$.

[0046] Es gilt dann

$$\Phi_0 = \arctan \left[\frac{I(3\omega_m)}{I(2\omega_m)} \right] = \arctan \left[\frac{\sin(\Phi_0)}{\cos(\Phi_0)} \right] = \arctan[\tan(\Phi_0)] \quad (3)$$

[0047] Die experimentell detektierten Amplituden $I_{roh}(2\omega_m)$ und $I_{roh}(3\omega_m)$ werden um etwaige Anteile höherer Harmonischer korrigiert. Dies ist mit einer sogenannten Heydemannkorrektur möglich.

[0048] Bei der erfindungsgemäßen Dickenmessvorrichtung **16** emittiert die Lichtquelle **28** Laserstrahlung auf mindestens zwei Wellenlängen, die mit verschiedenen Modulationsfrequenzen ω_{mi} moduliert werden, sodass deren zweite und dritte Harmonische nicht zusammenfallen. Es ist dann möglich, die Interferenzphasen aller Wellenlängen eines jeden Einzelinterferometers **26, 48, 62** mit einem einzigen Detektor zu bestimmen. Die Phasen der einzelnen Wellenlängen werden beispielsweise per Lock-In Empfänger dann von den einzelnen

Trägerfrequenzen demoduliert. Es sei darauf hingewiesen, dass es zudem noch andere Möglichkeiten gibt, die optischen Interferometerphasen zu messen.

[0049] Ein wichtiger Aspekt des erfindungsgemäßen Verfahrens ist, wie aus den drei Interferometern **62** (hier auch mit k_0 bezeichnet), **26** (hier auch mit o bezeichnet) und **48** (hier auch mit u bezeichnet) mit den jeweils drei Wellenlängen $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ die Dicke I_x des Werkstücks eines Blechs im Endeffekt direkt gemessen wird. Das minimiert den Einfluss von Störfaktoren.

[0050] Die folgende Herleitung gilt für jede Wellenlänge gesondert, auf einen entsprechenden Index wird daher verzichtet. Aus den drei Phasen einer Messung mit einer Wellenlänge λ_i wird der folgenden die effektive Phase Φ_{eff} berechnet:

$$\Phi_{\text{eff}}(\lambda_i, t) = [\Phi_{k_0}(\lambda_i, t) - (\Phi_o(\lambda_i, t) + \Phi_u(\lambda_i, t))] \bmod(2\pi) \quad (4)$$

[0051] Jede Interferometerphase α (mit $\alpha = o, u$ und k_0) misst die Differenz aus Mess- und Referenzpfad $I_{\text{Ref},\alpha}$, wobei Teile des Messpfades $I_{\text{Mess},\alpha}$ sich in Luft ($I_{\text{MessL},\alpha}$) und andere sich im C-Rahmen, also innerhalb der Arme **20, 22** und der Traverse **23**, befinden ($I_{\text{MessC},\alpha}$). Der Phasen-bestimmende Weglängenunterschied I_α eines Interferometers beträgt also

$$I_\alpha = 2(I_{\text{MessL},\alpha} + I_{\text{MessC},\alpha}) - 2I_{\text{Ref},\alpha} \quad (5)$$

für alle Interferometer. Wenn man nun die der effektiven Phase entsprechende effektive Länge I_{eff} bildet, so erhält man

$$I_{\text{eff}} = 2(I_{\text{MessL},k_0} - (I_{\text{MessL},o} + I_{\text{MessL},u})) + 2(I_{\text{MessC},k_0} - (I_{\text{MessC},o} + I_{\text{MessC},u})) - 2(I_{\text{Ref},k_0} - (I_{\text{Ref},o} + I_{\text{Ref},u})) = 2I_x + 2I_{\text{spreiz}} + 2I_{T,k_0} - 2(I_{T,o} + I_{T,u}) \quad (6)$$

mit den Totstrecken $I_{T,\alpha} \equiv I_{\text{MessC},\alpha} - I_{\text{Ref},\alpha}$, der Störgröße I_{spreiz} , die mangelnde Parallelität des C-Rahmens, also innerhalb der Arme **20, 22** und der Traverse **23**, widerspiegelt, und der Messgröße I_x .

[0052] Um I_x aus der effektiven Länge zu extrahieren, müssen die anderen Weglängenunterschiede bestimmt werden. Eine nahe liegende Möglichkeit scheint die Verwendung von Normalen mit bekannten kalibrierten Längen $I_{x,\text{kal}}$ und der Messung der dazu gehörigen effektiven Länge $I_{\text{eff},\text{kal}}$. Dann ließe sich Gleichung (6) auswerten und umstellen zu

$$2I_{\text{spreiz}} + 2I_{T,k_0} - 2(I_{T,o} + I_{T,u}) = I_{\text{eff},\text{kal}} - 2I_{x,\text{kal}} \quad (7)$$

[0053] Dies hat jedoch zwei Anforderungen: Erstens muss die Referenzdicke $I_{x,\text{kal}}$ mit interferometrischer Genauigkeit bekannt sein, da ein interferometrischer Gangunterschied bekannt sein muss. Jede Unsicherheit in dieser Messung findet sich in der Interpretation der danach gemessenen Phase Φ_{eff} wieder. Eine grundlegende unfreundliche Eigenschaft der Mehrwellenlängeninterferometrie ist, dass sich Unsicherheiten in der Beobachtung mit dem Verhältnis synthetischer zu optischer Wellenlänge hochskalieren. Im Fall einer ersten synthetischen Wellenlänge $\Lambda_1 = 20 \mu\text{m}$ und einer ersten Wellenlänge von $\lambda_1 = 760 \text{ nm}$ ergibt sich ungefähr ein Faktor **25**.

[0054] Zweitens darf das Werkstück selbst eine Rayleigh-Länge des abbildenden Systems des Interferometers nicht überschreiten. Die interferometrische Auswertung geht davon aus, dass beide Oberflächen der Probe (also normalerweise der Folie von einigen Mikrometern Dicke) auf beiden Seiten von parallelen, ungekrümmten Wellenfronten angetastet werden kann. Bereits ab wenigen $100 \mu\text{m}$ Dicke kann davon nicht mehr ausgegangen werden.

[0055] Derartige Einstellnormale sind aber in der Praxis wenig geeignet / nicht vorhanden. Zwar kann man Endmaße kann mit sehr hohem Aufwand mit Unsicherheiten von wenigen Nanometern kalibrieren. Standardmäßig erhält man die besten Unsicherheiten aber in der Größenordnung von 100 Nanometern für die kleins-

ten Endmaße. Parallele Endmaße mit einer Dicke $l_x \leq 0,1$ mm und entsprechend kleiner Messunsicherheit sind nur mit hohem Aufwand und Kosten in der notwendigen Oberflächengüte herstellbar. Zudem ist bei einer Verwendung im Walzwerk auch mit Kondensation von Ölen oder Walzemulsionen zu rechnen, welche die Dicke durchaus im Bereich von einigen Nanometern verändern kann, womit die notwendige Maßhaltigkeit als Einstellnormal nicht mehr gegeben wäre..

[0056] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird daher ausgenutzt, dass der erste Lichtstrahl **34** (auch Lichtstrahl o genannt) und der zweite Lichtstrahl **54** (auch Lichtstrahl u genannt) antiparallel und kollinear verlaufen. Dabei interferiert der zweite Lichtstrahl **54** des zweiten Interferometers **48** (auch Interferometer u genannt) mit dem ersten Referenz-Lichtstrahl **36** des ersten Interferometers **26** (auch Interferometer o genannt) und vice versa im jeweiligen Strahlteilern **30, 50**, vor dem jeweiligen Detektor **42, 60**.

[0057] Die Interferometer **26, 48** beginnen jedoch schon früher, mit der Strahlaufteilung in unteren und oberen Zweig, nämlich im Strahlteiler **74.2** (siehe **Fig. 2**). Dies führt zu zusätzlichen Wegen I_{To+} und I_{Tu+} . Damit ergeben sich für die Signale in den o und u Detektoren:

$$I_o = I_{To+} + I_{MessC,o} + I_{MessL,ko} + I_{spreiz} + I_{MessC,u} - (I_{Tu+} + 2I_{Ref,u}) \quad (8)$$

$$I_u = I_{Tu+} + I_{MessC,u} + I_{MessL,ko} + I_{spreiz} + I_{MessC,o} - (I_{To+} + 2I_{Ref,o}) \quad (9)$$

[0058] Der Kompensationsweglängenunterschied I_{ko} bleibt formal unverändert zu (5). Bildet man nun die effektive Länge nach Gleichung (4) fallen die zusätzlichen Terme heraus und man erhält:

$$I_{eff} = 2I_{spreiz} + 2I_{T,ko} - 2(I_{T,o} + I_{T,u}) \quad (10)$$

[0059] Die dazugehörige Phase entspricht der in Gleichung (4) definierten effektiven Phase für $t = 0$ (die auch Offsetphase genannt werden könnte):

$$\Phi_{eff} = (\lambda_j, 0) = [\Phi_{ko}(\lambda_j, 0) - \Phi_o(\lambda_j, 0) + \Phi_u(\lambda_j, 0)] \bmod(2\pi) \quad (11)$$

[0060] Die Messphase Φ_{mess} gemäß der Gleichung

$$\Phi_{eff}(\lambda_j, t) = \left[\frac{4\pi}{\lambda_j} (n_{Luft}(t) l_x(t) + \delta l(n_{Luft}(t), n_C(t), t)) \right] \bmod(2\pi) \quad (11a)$$

ist nun aus der Differenz der effektiven Phase mit Probe und der Offsetphase $\Phi_{eff}(\lambda_j, 0)$ definiert. Dies entspricht mit den Gleichungen (10) und (6) der folgenden Länge I_{mess} :

$$I_{mess} = \frac{2l_x(t)}{+2(I_{T,ko}(t) - (I_{T,o}(t) + I_{T,u}(t)))} \equiv (I_x(t) + \delta l(t)) - 2(I_{T,ko}(0) - (I_{T,o}(0) + I_{T,u}(0))) \quad (12)$$

[0061] Dies führt auf die Form der Gleichung (11a), wenn man die in dieser Diskussion verwendeten optischen Wege als Produkt von Brechzahl und geometrischer Länge betrachtet. Für konstante stabile Verhältnisse heben sich die Störterme auf. Da davon nicht perfekt ausgegangen werden kann, ist es vorteilhaft, den Einfluss von Störungen konstruktiv zu minimieren.

[0062] Die Berechnung oben ist ohne Modulo-Operation durchgeführt. Die Modulo-Operation ist nicht echt assoziativ. Eine ausführliche Simulation unter Berücksichtigung der Modulo-Operation hat jedoch gezeigt, dass die obige Betrachtung korrekt ist.

[0063] Trotzdem werden natürlich nur Phasen modulo 2π detektiert. Auf die Entfaltung mit makroskopischer Länge wird im Folgenden genauer eingegangen.

Zur Entfaltung/Dickenbestimmung und Wahl der synthetischen Wellenlängen

[0064] Bei jeder Messung werden für die drei optischen Wellenlängen λ_i ($i=1,2,3$) drei Messphasen $\Phi_{\text{mess},i}$ nach Gleichung (12) dieser Betrachtung bzw. nach der Gleichung

$$\Phi_{\text{mess}}(\lambda_i, t) = [\Phi_{\text{mess}}(\lambda_i, t) - \Phi_{\text{eff}}(\lambda_i, 0)] \bmod(2\pi) \quad (12a)$$

gebildet. Aus diesen lassen sich sogenannte „synthetische Phasen“ $\Phi_{\text{synth},j}$ bilden über

$$\phi_{\text{synth},j} = \Phi_{\text{mess},i} - \Phi_{\text{mess},k} \quad (13)$$

mit $i \neq k$. Diese sind formal äquivalent zu Phasen einer synthetischen Messwellenlänge

$$\Lambda^j = \frac{\lambda_i \lambda_k}{|\lambda_i - \lambda_k|} \quad (14)$$

[0065] Die halbe synthetische Wellenlänge entspricht dem Eindeutigkeitsbereich, den man mit der Kenntnis dieser beiden optischen Phasen erreichen kann. Da Unsicherheiten jedoch mit dem Verhältnis λ^j / λ skalieren, kann man diese nicht „unendlich“ groß wählen, sondern wählt eine Folge aus kleiner werdenden synthetischen Wellenlängen (vgl. **Fig. 3**).

[0066] Für die Wahl können folgende Kriterien einfließen:

1. Eine Maßhaltigkeit von 0,1 μm wird für Metallfolien der Dicke von typischerweise 5 - 30 μm benötigt.
2. Eine Phasenauflösung der optischen Phasen von $\pi/50$ ist erreichbar.
3. Es müssen geeignete Laserdioden verfügbar sein.
4. Integriert man in das Banddickenmessgerät zusätzlich einen anderen Dickensensor wie zum Beispiel einen Triangulationsensor, so kann man auf einen Startwert l_{vor} zurückgreifen.

[0067] Gut geeignet sind z. B. die drei optischen Wellenlängen von $\lambda_1 = 761$ nm, $\lambda_2 = 767$ nm und $\lambda_3 = 785$ nm. Damit ergibt sich eine erste synthetische Wellenlänge von $\Lambda_1 \approx 100$ μm und $\Lambda_2 \approx 25$ μm , was Eindeutigkeitsbereichen von 50 μm und 12,5 μm entspricht. Die erfindungsgemäße Dickenmessvorrichtung kann damit die Dicke l_x von Folien zwischen 5-30 μm ohne Grob-Dickenmesser **80** messen.

[0068] Damit ein Walzwerk nicht für dickere Bleche den Sensor umbauen muss, ist gemäß einer bevorzugten Ausführungsform jedoch ein Grob-Dickenmesser **80** vorhanden, insbesondere ein Triangulationssensor, mittels dem die Dicke l_x so genau bestimmbar ist, dass der Wellenzug der größten synthetischen Wellenlänge bestimmt werden kann. Mit dem in **Fig. 2** gezeigten Vorgehen wird dann die Dicke l_x präzise bestimmt. Wird ein Triangulationssensor mit einer Unsicherheit von maximal 4 μm verwendet, kann schon die erste synthetische Wellenlänge vorzugsweise 25 ± 5 μm genügen, um Sub-Mikrometer Genauigkeiten zu erreichen.

[0069] Vorzugsweise werden zwei synthetischen Wellenlängen verwendet. Dadurch wird das Verfahren robuster gegen Rauschen.

Mathematisch funktioniert die Entfaltung folgendermaßen

[0070] **Fig. 3** zeigt die Bestimmung der Dicke l_x mit hoher Genauigkeit. Es gibt liegt ein Startwert $l_{\text{vor}} = l_1$ für die absolute Dicke vor. Dieser kann beispielsweise aus der synthetischen Wellenlänge, dem Grob-Dickenmesser **80** oder durch Kenntnis des Walzprozesses bekannt sein und hat eine Unsicherheit die besser ist als $\Lambda_2 / 4$, wobei Λ_2 der zweiten synthetischen Wellenlänge entspricht. Dann kann die Dicke des Blechs mit der dazu gehörigen synthetischen Phase $\Phi_{\text{synth},2}$ mit höherer Genauigkeit bestimmt werden über

$$l_2 = \text{Floor} \left[\frac{2l_1}{\Lambda_2} - \frac{\phi_{\text{synth},2}}{2\pi} + 0,5 \right] \frac{\Lambda_2}{2} + \frac{\phi_{\text{synth},2}}{2\pi} \frac{\Lambda_2}{2} \quad (15)$$

[0071] Die Funktion Floor(x) gibt dabei den kleinsten ganzzahligen Wert z zurück, für den gilt $z \leq x$. Hat man eine weitere kürzere synthetische Wellenlänge zur Verfügung kann man diesen Schritt wiederholen. Final wird die optische Wellenlänge entfaltet.

Beispiel

[0072] Das Blech habe eine Dicke von $l_x = 25,516 \mu\text{m}$. Der Grob-Dickenmesser **80** liefert einen Vorwert von $d = 27,1 \mu\text{m}$. Die Wellenlänge $\lambda_1 = 761 \text{ nm}$ liefert einen Phasenwert mit begrenzter Genauigkeit von 0,401542, die Wellenlänge $\lambda_2 = 785 \text{ nm}$ einen (ebenfalls imperfekten) Phasenwert von 0,0360284. Die synthetische Phase $\Phi_{\text{synth},2}$ beträgt dann 0,365513 zur synthetischen Wellenlänge $\Lambda_2 = 24.981 \mu\text{m}$. Dann liefert die Auswertung mit Gleichung (15) eine verbesserte Längenabschätzung l_2 von $25,615 \mu\text{m}$.

Bezugszeichenliste

10	Walzwerk
12	Walzvorrichtung
14	Metallfolie
16	Dickenmessvorrichtung
18	Bearbeitungsvorrichtung
20	erster Arm
22	zweiter Arm
23	Traverse
24	Zwischenraum
26	erstes Interferometer
28	Lichtquelle
30	erster Strahlteiler
32	erster Quell-Lichtstrahl
34	erster Lichtstrahl
36	erster Referenz-Lichtstrahl
38	erstes Fenster
40	erster Rücklichtstrahl
42	erster Detektor
44	Strahlumlenker
46	Retroreflektor
48	zweites Interferometer
50	zweiter Strahlteiler
52	zweiter Quell-Lichtstrahl
54	zweiter Lichtstrahl
55	Fenster
56	zweiter Referenz-Lichtstrahl
58	zweiter Rücklichtstrahl
60	zweiter Detektor
62	drittes Interferometer
64	dritter Lichtstrahl
66	dritter Strahlteiler

68	dritter Quell-Lichtstrahl
70	dritter Lichtstrahl
71	Fenster
72	dritter Referenz-Lichtstrahl
73	dritter Detektor
74	Strahlteiler
75	Basis
76	Glasfaserleitung
78	Anschluss
80	Grob-Dickenmesser
Φ_o	erste Phase
Φ_u	zweite Phase
Φ_{ko}	dritte Phase
Φ_{eff}	effektive Phase
l_x	Dicke
M	Materialflussrichtung

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 Patentliteratur

- DE 102013017289 B4 [0003]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Meiners-Hagen et al., Meas. Sci. Techn. 15, 741 (2004) [0042]

Patentansprüche

1. Dickenmessvorrichtung (16) zur Messung einer Dicke flacher Werkstücke, insbesondere Folien (14), mit

- (a) einem ersten Arm (20) und einem zweiten Arm (22), die einen Zwischenraum (24) zum Einführen des Werkstücks zwischen einander bilden,
- (b) einem ersten Interferometer (26) zum
 - Aussenden eines ersten Lichtstrahls (34) auf das Werkstück (14) und
 - Erfassen einer ersten Phase (Φ_o) zwischen dem ersten Lichtstrahl (34) und einem vom Werkstück (14) reflektierten ersten Rücklichtstrahl (40),
- (c) einem zweiten Interferometer (48) zum
 - Aussenden eines zweiten Lichtstrahls (54) auf das Werkstück (14) und
 - Erfassen einer zweiten Phasen (Φ_u) zwischen dem zweiten Lichtstrahl (54) und einem vom Werkstück (14) reflektierten zweiten Rücklichtstrahl (58),
- (d) einem dritten Interferometer (62) zum
 - Bilden eines dritten Lichtstrahls (64) von einem Arm (20) zum anderen Arm (22) abseits des Werkstücks (14) und
 - Erfassen einer Kontroll-Phase (Φ_{ko}) und
- (e) einer Auswertevorrichtung zum Ermitteln der Dicke des Werkstücks (14) aus Interferometerdaten der Interferometer (26,48,62),

dadurch gekennzeichnet, dass

- (f) die Auswertevorrichtung eingerichtet ist zum automatischen
 - Bestimmen einer effektiven Phase (Φ_{eff}) aus den Phasen (Φ_o , Φ_u , Φ_{ko}) und
 - Bestimmen der Dicke (l_x) aus der effektiven Phase (Φ_{eff}).

2. Dickenmessvorrichtung (16) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- (a) das erste Interferometer (26) und das zweite Interferometer (48) eine Lichtquelle (28) aufweisen, die ausgebildet ist zum Abgeben von Licht einer ersten Wellenlänge (λ_1) und von Licht zumindest einer zweiten Wellenlänge (λ_2) und dass
- (b) für die Wellenlängen (λ_1 , λ_2) gilt, dass eine erste synthetische Wellenlänge ($\Lambda_1 = (\lambda_1 \cdot \lambda_2) / (\lambda_2 - \lambda_1)$) zwischen 1 und 50 Mikrometer beträgt.

3. Dickenmessvorrichtung (16) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Lichtquelle (28) ausgebildet ist zum Abgeben von Licht einer dritten Wellenlänge (λ_3), die so gewählt ist, dass eine zweite synthetische Wellenlänge ($\Lambda_2 = (\lambda_1 \cdot \lambda_3) / (\lambda_3 - \lambda_1)$) größer ist als die erste synthetischen Wellenlänge (Λ_1) und höchstens 200 Mikrometer beträgt.

4. Dickenmessvorrichtung (16) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch**

- (a) einen Absolut-Dickenmesser zum Bestimmen eines Grob-Dickenmesswerts der absoluten Dicke des Werkstücks (14),
- (b) wobei die Auswertevorrichtung eingerichtet ist zum automatischen Bestimmen der Dicke des Werkstücks (14) aus dem Grob-Dickenmesswert und der effektiven Phase (Φ_{eff}).

5. Dickenmessvorrichtung (16) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine thermische Isolation der Arme (20,22) und einer die Arme verbindenden Traverse (23).

6. Dickenmessvorrichtung (16) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- (a) der dritte Lichtstrahl (64) eine Korrekturstreckenlänge (l_{ko}) außerhalb der Dickenmessvorrichtung (16) zurücklegt und
- (b) eine freie erste Wegstrecke ($l_{mess,1}$), die der erste Lichtstrahl (34) maximal außerhalb der Dickenmessvorrichtung (16) zurücklegen kann, zwischen dem 0,85-fachen und dem 1,15-fachen der Korrekturstreckenlänge (l_{ko}) beträgt, und/oder
- (c) eine freie zweite Wegstrecke ($l_{mess,2}$), die der zweite Lichtstrahl (54) maximal außerhalb der Dickenmessvorrichtung (16) zurücklegen kann, zwischen dem 0,85-fachen und dem 1,15-fachen der Korrekturstreckenlänge (l_{ko}) beträgt.

7. Dickenmessvorrichtung (16) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Lichtstrahl (34) und der zweite Lichtstrahl (54) koaxial und antiparallel (aufeinander zu) verlaufen.

8. Walzwerk (10) zum Herstellen einer Metallfolie (14), mit

- (a) einer Walzvorrichtung (12) zum Walzen der Metallfolie (14) und

- (b) einer Dickenmessvorrichtung (16) nach einem der vorstehenden Ansprüche, die in einer Materialflussrichtung (M) hinter der Walzvorrichtung (12) angeordnet ist, und
- (c) vorzugsweise einer Bearbeitungsvorrichtung (18), insbesondere einer zweiten Walzvorrichtung (12), die in Materialflussrichtung (M) hinter der Dickenmessvorrichtung (16) angeordnet ist.

9. Verfahren zum Messen einer Dicke flacher Werkstücke, insbesondere Folien, mit den Schritten:

- (i) Einführen des Werkstücks (14) in einen Zwischenraum (24) einer Dickenmessvorrichtung (16) mit
 - (a) einem ersten Arm (20) und einem zweiten Arm (22), die den Zwischenraum (24) zwischen einander bilden,
 - (b) einem ersten Interferometer (26) zum
 - Aussenden eines ersten Lichtstrahls (34) auf das Werkstück (14) und
 - Erfassen einer ersten Phase (Φ_o) zwischen dem ersten Lichtstrahl (34) und einem vom Werkstück (14) reflektierten ersten Rücklichtstrahl (40),
 - (c) einem zweiten Interferometer (48) zum
 - Aussenden eines zweiten Lichtstrahls (54) auf das Werkstück (14) und
 - Erfassen einer zweiten Phase (Φ_u) zwischen dem zweiten Lichtstrahl (56) und einem vom Werkstück (14) reflektierten zweiten Rücklichtstrahl (58) und
 - (d) einem dritten Interferometer (62) zum
 - Bilden eines dritten Lichtstrahls (64) von einem Arm (20) zum anderen Arm (22) abseits des Werkstücks (14) und
 - Erfassen einer Kontroll-Phase (Φ_{ko}),
- (ii) Bestimmen einer effektiven Phase (Φ_{eff}) aus den Phasen (Φ_o , Φ_u , Φ_{ko}) und
- (iii) Bestimmen der Dicke (l_x) aus der effektiven Phase (Φ_{eff}).

10. Verfahren nach Anspruch 9, **gekennzeichnet durch** die Schritte:

- (i) Interferieren-Lassen des ersten Lichtstrahls (34) und des zweiten Lichtstrahls (54), ohne dass ein Werkstück (14) einen der Lichtstrahlen (34,54) reflektiert, sodass eine effektive Null-Phase ($\Phi_{eff,0}$) erhalten wird,
- (ii) Einbringen des Werkstücks (14) in den Zwischenraum (24), sodass die Lichtstrahlen (34,54) vom Werkstück (14) reflektiert werden,
- (iii) Messen der effektiven Phase (Φ_{eff}),
- (iv) Ermitteln einer Mess-Phase (Φ_{eff}) aus der effektiven Phase (Φ_{eff}) und der Null-Phase ($\Phi_{eff,0}$) und
- (v) Berechnen der Dicke (l_x) aus der Mess-Phase (Φ_{eff}).

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

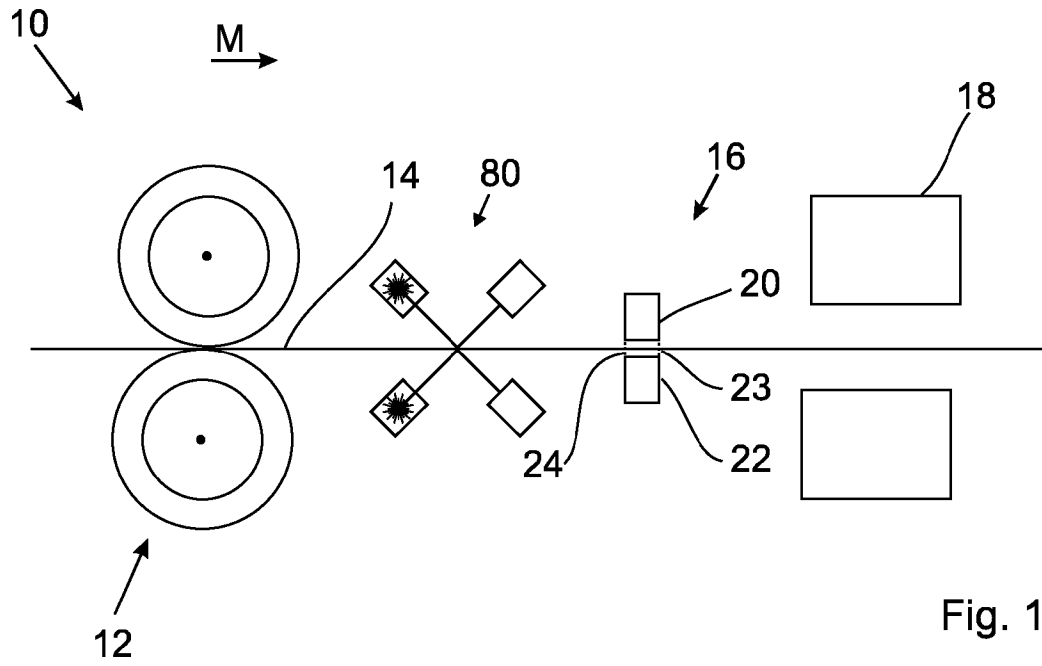


Fig. 1

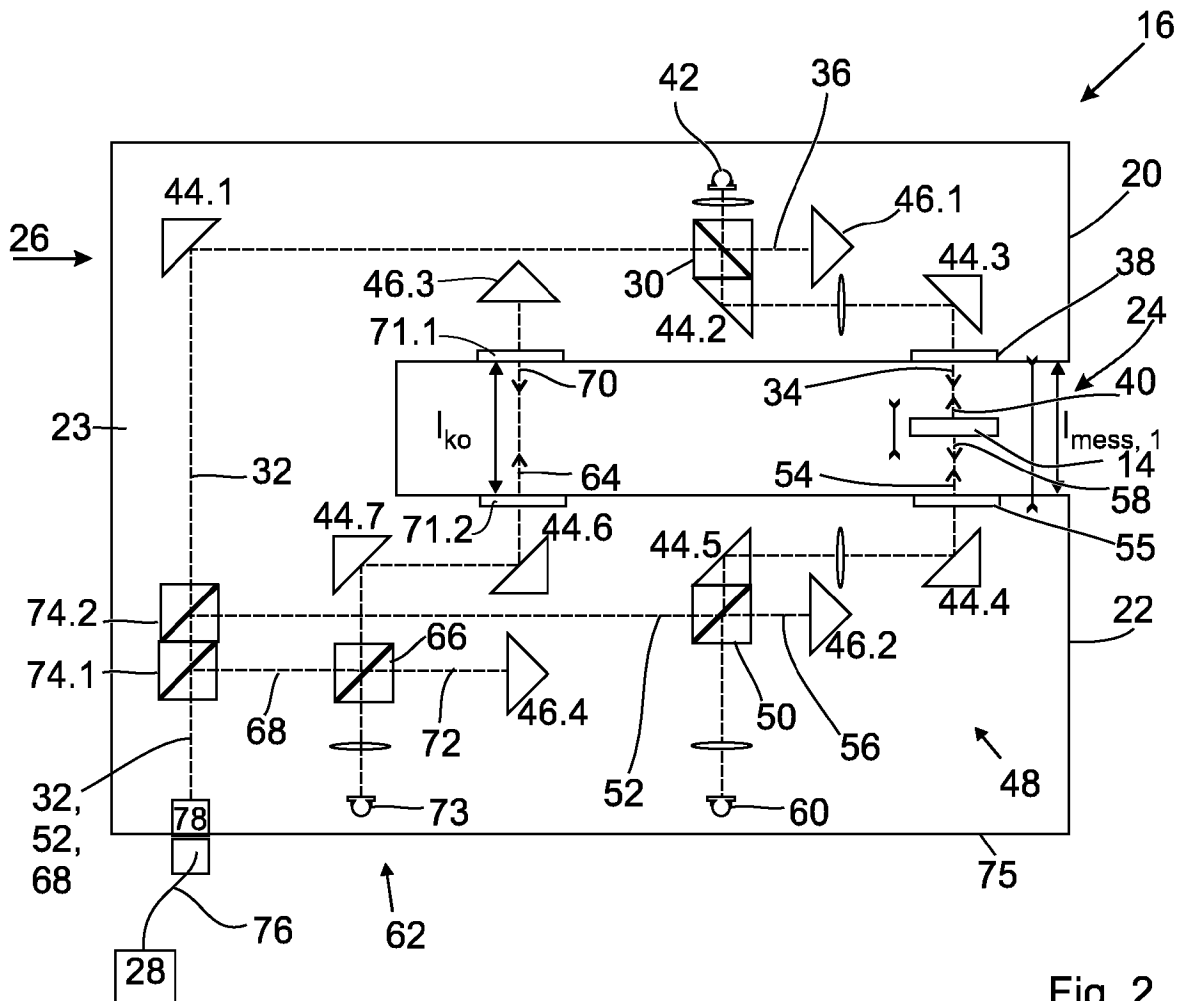


Fig. 2

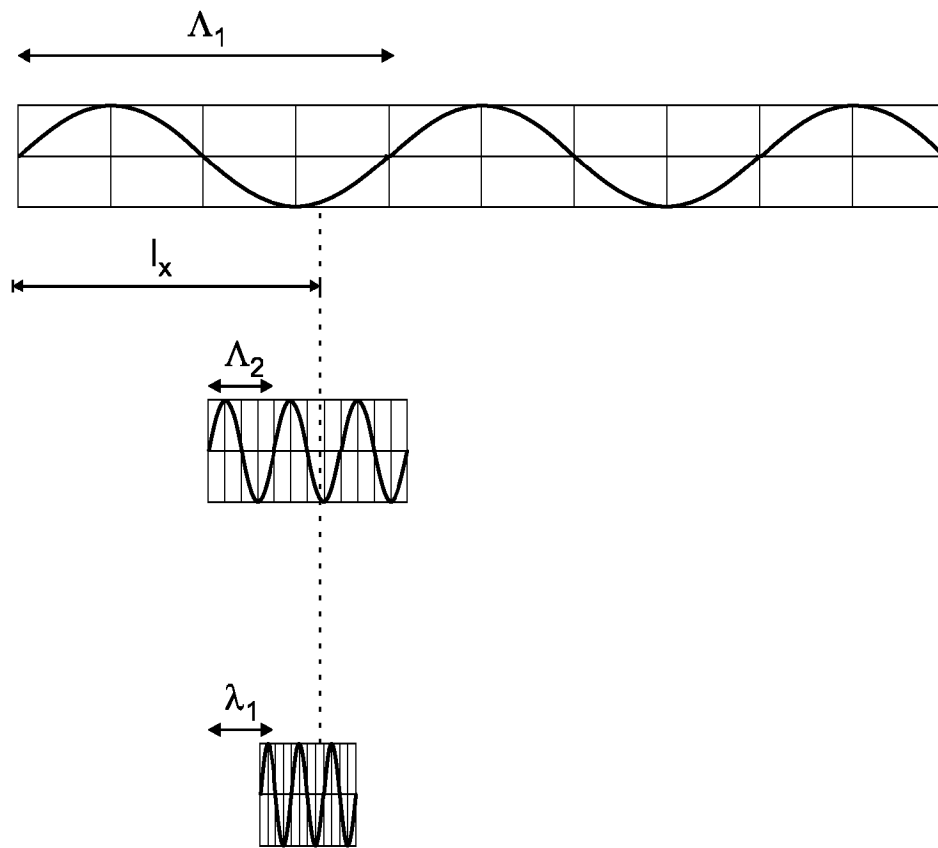


Fig. 3