



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2004 029 552 A1** 2006.01.05

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2004 029 552.2**

(22) Anmeldetag: **18.06.2004**

(43) Offenlegungstag: **05.01.2006**

(51) Int Cl.⁸: **G01B 11/16** (2006.01)
G01H 9/00 (2006.01)

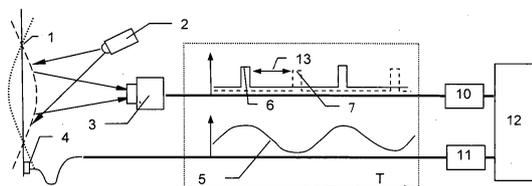
(71) Anmelder:
Mäckel, Peter, 34125 Kassel, DE

(72) Erfinder:
**Mäckel, Peter, 34117 Kassel, DE; Heyen, Helmut,
34270 Schauenburg, DE**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten mittels einer Kombination einer synchronisierten, stroboskopischen Bildaufzeichnung mit Bildkorrelationsverfahren**

(57) Zusammenfassung: Das hier beschriebene Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen schwingender Objekte basiert im Wesentlichen auf der Kombination von stroboskopischer Bildaufzeichnung und Bildkorrelationsverfahren. Das Verfahren kann zur Messung der Verformungen (Schwingungsamplituden und Phasen) von periodischen und insbesondere harmonischen Vorgängen sowie zur Ermittlung der damit verbundenen Dehnungen eingesetzt werden.



Beschreibung

[0001] Die Anmeldung betrifft ein Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten mit einer synchronisierten, stroboskopischen Bildaufzeichnung.

Stand der Technik

[0002] Schwingungen von Objekten werden bekanntlich mittels Sensoren wie Beschleunigungs-, Kraft- oder Wegaufnehmer gemessen. Diese arbeiten lokal und Punktweise sowie in der Regel nicht berührungslos. Durch die Masse der Sensoren ist die Messung jedoch nicht rückwirkungsfrei, wie bei optischen Verfahren.

[0003] Die Messung erfolgt dabei in der Regel nur in einer Empfindlichkeitsrichtung. Durch Kombination von mehreren Empfindlichkeitsrichtungen mit verschiedener Ausrichtung in einem Messsensor die Beschleunigungen, Kräfte und Bewegungen des Messpunktes in allen Raumrichtungen aufgezeichnet werden. Eine Messung der durch die Schwingung verursachten Dehnungen der Objektoberfläche können jedoch daraus nicht ermittelt werden, da hierzu die Gradienten der Verformung zu bestimmen sind und die Sensoren aufgrund ihrer Größe und Gewicht nicht ausreichend nah auf der Objektberfläche platziert werden können. Alternative müssen hierzu zusätzlich Dehnmessstreifen aufgebracht werden, die lokal die Dehnungskomponenten aufgrund ihrer relativen Längenänderung ermitteln.

[0004] Optische Verfahren wie Laser-Vibrometer arbeiten berührungslos jedoch ebenso nur Punktweise. Lediglich bei scannenden Laser-Vibrometer kann durch kontinuierliches oder Punktweise verfahren des Messpunktes über die Bauteiloberfläche an mehreren Stellen gemessen werden. Nachteil dabei ist jedoch, dass hierbei die Messzeit entsprechend der Dichte der Messpunkte zunimmt.

[0005] Ein weiterer Nachteil des Laser-Vibrometer ist der eingeschränkte Bezug des Verfahrens zu Relativverformung zwischen Punkten der Objektoberfläche zur Ermittlung von Dehnungen. Die direkte Messgröße von Laser-Vibrometer ist die relative Phasenänderung bzw. die Geschwindigkeit der Änderung des Lichtes aufgrund der Lichtweglängenänderung durch die Bewegung der Objektoberfläche. Entsprechend der Ausrichtung des Beleuchtungs- und Beobachtungsstrahlenganges wird die Sensitivitätsrichtung festgelegt. Es werden somit nur die Niveauänderungen an der Oberfläche ohne Verfolgung eines festen Bezugspunkt der Objektoberfläche erfasst. Somit ist keine Messung der Relativbewegung zwischen zwei Punkten der Oberfläche möglich, so dass keine Dehnungen der Objektoberfläche aus diesen Messungen abgeleitet werden können. Ein wei-

terer Nachteil sind die hohen Kosten aufgrund der Verwendung der optischen Komponenten insbesondere von kohärenter Strahlquellen, den damit verbundenen Schutzmaßnahmen und die Anforderungen an die Reflektionseigenschaften des Messobjekts.

[0006] Lediglich speckle-interferometrische Verfahren wie die Speckle-Holografie oder Shearografie sind in der Lage ganzflächige und berührungslose Messungen von dynamischen Vorgängen wie Schwingungen durchzuführen, bei denen ein Bezug zur Objektoberfläche besteht, aus denen die Dehnungen der Objektoberfläche ermittelt werden können. Nachteil dieser Verfahren ist der eingeschränkte Mess- und Anwendungsbereich aufgrund der hohen Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsstörungen und Ganzkörperbewegungen zwischen Objekt und Sensor. Ein weiterer Nachteil sind die hohen Kosten aufgrund der Verwendung von kohärenter Strahlquellen den damit verbundenen Schutzmaßnahmen und die Anforderungen an die Reflektionseigenschaften des Messobjekts.

Aufgabenstellung

[0007] Aufgabe der Erfindung ist die einfache, ganzflächige, berührungslose Messung und Sichtbarmachung von periodischen Vorgängen insbesondere von Verformungen schwingender Objekte und den daraus resultierender Größen wie Dehnungen der Objektoberfläche. Das hier beschriebene Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen schwingender Objekte basiert im Wesentlichen auf der Kombination von stroboskopischer Bildaufzeichnung und Bildkorrelationsverfahren. Diese sind insbesondere nur für den Bereich der statischen Messungen von Verformungen und den daraus resultierenden Dehnungen entwickelt, die aus den Aufnahme von zwei verschiedenen Belastungszuständen des Objekts anhand der charakteristischen oder zufälligen künstlich aufgebracht oder natürlich vorhandene Muster in einer Ebene oder im Raum verfolgt werden. Lediglich Anwendungen mit Hochgeschwindigkeitskameras sind bekannt. Dies ist mit extrem hohen Kosten und hohen Lichtleistungen verbunden.

[0008] Durch die stroboskopischer Bildaufzeichnung können jedoch die Zustände von periodischen Vorgängen insbesondere von Schwingungen eines beobachteten Objektes in verschiedenen Schwingungszuständen eingefroren werden, so dass scharfe Bilder aufgezeichnet werden können, woraus durch Bildkorrelationsverfahren, Muster- und Objektverfolgungsverfahren die Bewegungen und Verformungen des Objekts ermittelt werden können. Aus diesen können dann weitere Größen wie Schwingungsamplituden und Phasenlagen sowie Frequenzgänge und die Dehnungen der Objektober-

fläche errechnet werden können. Verfahren und die Vorrichtungen werden daher im Folgenden als Vibro-Korrelations-System bezeichnet. Es kann insbesondere zur Schwingungsanalyse nach dem Phasenresonanzverfahren eingesetzt werden.

Ausführungsbeispiel

[0009] [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) zeigen den Aufbau des Verfahrens. Ein Schwingungsvorgang (1) einer Objektoberfläche oder eines anderen beliebigen periodischen Vorgangs wird an einer beliebigen Stelle bzw. Schwingungsphasenlage optisch eingefroren, so dass ein stehendes, scharfes Bild des Objekts aufgezeichnet werden kann. Dies kann nach [Fig. 1](#) bei kontinuierlicher Beleuchtung (2) durch Synchronisation der Belichtungszeitpunkte einer Kamera (3) bzw. durch ein Stereokamerasystem mittels einer Synchronisationseinheit (12) oder nach [Fig. 3](#) durch eine stroboskopische Steuerung einer Beleuchtung (2) mittels einer Synchronisationseinheit (12) oder einer Kombination aus beiden nach bekannten Verfahren realisiert werden.

[0010] Die Bildaufzeichnung kann elektronisch erfolgen vorzugsweise mittels CCD-Kameras oder CMOS-Kameras, in digitale Form gewandelt und mittels numerisch elektronischer Datenverarbeitung ausgewertet und angezeigt wird.

[0011] Dabei können auch mehrere Bildaufzeichnungssysteme insbesondere Stereokamerasysteme mit Bildebenen, die aus verschiedenen Richtungen auf das Objekt gerichtet sind, verwendet werden. Aufgrund der verschiedenen Betrachtungswinkel können Triangulationsverfahren zur Auswertung der Verschiebungen im Raum sowie zur Berechnung der Kontur und der Konturkrümmungen herangezogen werden.

[0012] Der Zeitpunkt der Bildaufzeichnung erfolgt mittels einer Synchronisationseinheit (12) durch ein elektrisches Signal am Triggerausgang (10) bzw. (9), die die Bildaufzeichnung mit beliebiger Phasenlage relativ zur jeweiligen Periode des beobachteten Vorgangs synchronisieren kann, wobei die Triggersignale der Synchronisationseinheit nicht zu jeder Periode ausgegeben werden müssen, sondern die Ausgaberate ein vielfaches der Frequenz des schwingenden Objekts ist, so dass relativ geringe Bildraten der Bildaufzeichnungssysteme ausreichen, um den Schwingungsvorgang aufgrund seiner Periodizität einzufrieren oder um eine Zeitlupenaufnahme der Schwingung aufzuzeichnen.

[0013] Die Bildaufzeichnung kann durch Synchronisation der Belichtungszeitpunkte (6) und einstellbaren Belichtungszeitspanne mindestens einer Bildebene so erfolgt, dass scharfe, stehende Bilder aufgezeichnet werden können.

[0014] Bei elektronischen Kameras kann dies durch die Synchronisation vorzugsweise von Beginn und Ende der Belichtung der Bildebene durch elektronische, mechanische oder optische Shutter erreicht werden. Dies bestimmt die Länge der Integrations- bzw. Belichtungszeit der Kamera. Alternativ kann die synchronisierte Bildaufzeichnung auch durch eine synchronisierte, stroboskopische Beleuchtung (Lichtblitze) nach [Fig. 2](#) mit einer einstellbaren Beleuchtungszeitspanne erfolgen, wobei zusätzlich auch die Synchronisation der Kamera bzw. der Shutterzeitpunkte der Bildebene eingesetzt werden kann, so dass die gleiche Zahl von Lichtblitzen eine einheitliche Belichtungsintensität der Bildebene sicherstellt werden kann.

[0015] Im Fall der stroboskopischen Beleuchtung können auch mehrere Lichtblitze während der Belichtungszeit (Integrationszeit) der Kamera nach [Fig. 3](#) aufgezeichnet werden, so dass durch die Aufsummierung der einzelnen Lichtblitze über die Belichtungszeit der Kamera eine ausreichende Intensität erreicht wird. Zur Unterdrückung von Hintergrundstrahlung, kann mit entsprechend auf die Beleuchtungsfrequenz abgestimmten Filtern insbesondere Bandpassfilter (Interferenzfilter) gearbeitet werden.

[0016] Durch ein an das Objekt aufgebrachten Sensors (4) kann der periodischen Vorgang in Form eines Messsignal (5) an über einen Analog- oder Digitaleingang (11) das Synchronisationssystem (12) zur Triggerung übertragen werden. Somit kann eine automatische Anpassung der Synchronisation in Echtzeit auf Veränderungen der Objektschwingungsfrequenz und -Phasenlage erfolgen. Alternativ kann ein vorhandenes Synchronsignal des Erregers oder des erregenden Systems des periodischen Vorgangs zur Triggerung durch das Synchronisationssystem über den Eingang (11) herangezogen werden. Wenn dies Signal vorhanden bzw. zugänglich ist, kann so der zusätzliche Sensor eingespart werden.

[0017] Das empfangene Signal am Eingang (11) kann durch die Synchronisationseinheit (12) hinsichtlich der Frequenz des periodischen Hauptanteils analysiert werden. Mit dieser Information ist es möglich, eine definierte relative Phasenlage der Ausgangstriggerimpulse vorzugeben.

[0018] Alternativ zur Messung der Frequenz der Objektschwingung kann ein periodisches Signal beliebiger Form und Frequenz durch das Synchronisationssystem selbst für eine aktiv betriebenen und gesteuerte Anregung des Objekts durch ein oder mehrere Erregerelemente erzeugt und zugleich für die Triggerung vorgegeben und verwendet werden, so dass die Erregerfrequenz und Phasenlage ebenso bekannt ist und zur Triggerung der Ausgangssignale direkt herangezogen werden kann. Alternativ kann das Synchronisationssystem ohne ein Signal am Eingang (11)

auch lediglich durch manuelle Vorgabe einer Frequenz gesteuert werden.

[0019] Die Frequenz des ausgehenden Triggersignals der Synchronisationssystems am Ausgang (9 bzw. 10) zur Synchronisierung der Bildaufzeichnung wird so gewählt, dass diese auch der Quotient aus der Frequenz des schwingenden Objekts und einem Teiler einschließlich des Teilers 1 sein kann, so dass die Triggerung zur Synchronisation der Bildaufzeichnung nicht bei jeder Periode Vorgangs erfolgen muss und somit relativ geringe Bildraten bzw. geringe Lichtblitzfrequenzen ausreichen, um den periodischen Vorgang insbesondere den Schwingungsvorgang durch einen ganzzahligen Teiler einzufrieren oder bei einem nicht ganzzahligen Teiler – alternativ zur fortlaufenden Verschiebung der relativen Phasenlage – um eine Zeitlupensequenz des Vorgangs insbesondere der Schwingung aufzuzeichnen durch die langsame relative Verschiebung der Triggerzeitpunkte.

[0020] Die Frequenz des ausgehenden Triggersignals der Synchronisationssystems am Ausgang (9 bzw. 10) zur Synchronisierung der Bildaufzeichnung kann zur relativen Positionierung der Phasenlage zur Phasenlage des Objektes mit einer beliebigen relativen Phasenverschiebung verwendet bzw. ausgegeben werden. Durch die Bildaufzeichnung bei unterschiedlichen Phasenlagen können weitere Verfahren angewendet werden, die im Folgenden noch erläutert werden. Eine Zeitlupensequenz des Vorgangs, insbesondere der Schwingung, kann somit sowohl durch eine Frequenzverstimmung als auch durch eine kontinuierliche Phasenverschiebung des ausgehenden Triggersignals des Synchronisationssystem aufgezeichnet werden.

[0021] Die Objektoberfläche (1) ist mit einem sogenannten „Specklemuster“ – einem zufälligen Muster aus Flecken wie beispielsweise in [Fig. 4](#) dargestellt – versehen, so dass die Bildaufnahmen zur weiteren Korrelation der Verschiebungen der Objektoberfläche nach bekannten Verfahren herangezogen werden können. Eine künstliche Objektpräparation kann beispielsweise durch das bekannte zufällige „bespeckeln“ oder besprühen mittels Farbspritzer auf einem homogenen Untergrund erzeugt werden.

[0022] Anstelle der künstlich aufgebracht Specklemuster können auch natürliche, lokal individuellen Mustern oder Strukturen der Objektoberfläche wie beispielsweise bei der menschlichen Haut für die Korrelation herangezogen werden. Für die Muster- und Objektverfolgungsverfahren können natürlichen individuellen Mustern oder Strukturen können auch bereits vorhandene Muster, Kannten oder Umrisse von Bauteilen wie Komponenten auf einer Elektronikplatine im Gesamtbild verfolgt werden. Durch die Verwendung von Stereokamerasystemen oder mehr als zwei Kameras und der Triangulationsmethoden ist

dabei eine Verfolgung der Muster, Kannten und charakteristische Umrisse oder Merkmale von Objekten usw. im Raum möglich. Hierdurch können Amplituden und Phasen des Schwingungsvorgangs wie im Folgenden beschrieben berechnet werden.

[0023] Zur absoluten Berechnung dieser Größen ist es aber ebenso notwendig, dass durch Kalibrierung des Bildmaßstabes unter Berücksichtigung der optischen Verzerrungen für den Fall der Verwendung einer Bildebene eine maßstäblich Verfolgung der Speckle, Muster, Kannten und Umrisse in der abgebildeten Ebene möglich ist. Die Kalibrierung kann nach bekannten Verfahren beispielsweise durch Platten mit Punktmuster bekannter Abständen erfolgen. Durch die Verwendung von mehreren Bildebenen und der Kalibrierung der Maßstäbe eines Messvolumens und den relativen optischen Achsen der Bildebenen zueinander, insbesondere bei Stereokamerasystemen, kann eine maßstäblich Verfolgung der Specklemuster, Kannten und Umrissen von Objekte und Bauteilen im Raum durch Bildkorrelationsverfahren oder Muster- und Objektverfolgungsverfahren auch in Kombination mit Triangulationsverfahren erfolgen. Aus der Verfolgung der Speckle, Specklemuster, Muster, Kannten und Umrissen von Objekte und Bauteilen kann die gesuchte Bewegung, Verschiebungen oder Verformungen des Objekts bzw. der Objektoberfläche ermittelt werden. Die ermittelte Bewegung, Verschiebungen oder Verformungen des Objekts bzw. der Objektoberfläche können wiederum in die Anteile von beliebigen Raumrichtungen zerlegt werden. Sinnvollerweise sind hierbei die Koordinaten der Raumrichtungen auch mit der lokalen Objektkontur bzw. der Oberflächennormalen des Objekts zu verbinden. Die Information über die Objektkontur kann dabei auch aus einer Messung der Kontur des Objekts oder Konturkrümmung der Objektoberfläche nach bekannten Stereobildkorrelationsverfahren, Streifenprojektionsverfahren oder durch ein andere Verfahren gewonnen werden. Wenn die Ausrichtung der aktuellen Oberflächennormalen bekannt ist, kann diese für die weitere Auswertung zur Berechnung der relativen Lagen der Verformungsanteile zur den Oberflächennormalen sowie der Dehnungen der Objektoberfläche verwendet werden.

[0024] Die Triggerung der Bildaufzeichnung wird wie bereits oben beschrieben entsprechend der Frequenz des periodischen Vorgangs vorgenommen. Dabei kann entweder ein Sensor (4) den periodischen Vorgang in Form eines Messsignal (5) an das Steuersystem übertragen werden oder das Objekt wird aktive durch ein Erregerelement (4) vom System durch ein vorgegebenes Signal (5) angeregt.

[0025] Die Triggerung der Bildaufzeichnung (6 bzw. 7) durch das System muss dabei nicht bei jeder Periode der Schwingung erfolgen, sondern kann insbesondere bei Schwingungen mit höheren Frequenzen

als die Bildaufnahmezeit auch ein vielfacher Teiler der Schwingungsfrequenz sein. Alternativ kann auch eine Bildaufnahme im Ruhezustand (ohne Triggermaßnahmen) hinzugenommen werden, die insbesondere als Referenzzustand bei der Auswertung genutzt werden kann.

[0026] Zur Analyse von harmonischen Vorgängen werden die relativen Phasenlagen (**13**) der Triggerzeitpunkte relativ zum beobachteten Schwingungsvorgang so gewählt, dass aus den Messergebnissen und der Kenntnis über die Triggerabstände entsprechende Gleichungssysteme aufgestellt und nach der Amplitude und Phase der gemessenen Größe des Vorgangs aufgelöst werden können. Bekanntlich ist im Fall von harmonischen Schwingungsvorgängen bei der Abtastung mindestens das Nyquist-Kriterium (ggf. einschließlich der Messung im Ruhezustand) notwendig, um Phase und Amplitude der gemessenen Größe aus den Einzelmessungen errechnen zu können, ohne dass die relative Phasenlage der Schwingung bekannt ist. Voraussetzung für die Berechnung ist dabei, dass wahlweise die relativen Phasenlagen zwischen den Triggerzeitpunkten als bekannt ist oder vom Messsystem vorgegeben wird. Alternativ können auch lediglich gleiche Abstände zwischen den Triggerzeitpunkten (**13**) vorausgesetzt werden und entsprechende Gleichungssysteme aufgestellt und gelöst werden. Eine höhere Anzahl von Zuständen des Objekts bei bekannten relativen Phasenlagen der Triggerung ist sinnvoll, um durch eine Überbestimmtheit der daraus aufstellbaren Gleichungssysteme zur Berechnung von Phase- und Amplitude der ermittelten Größen insbesondere der Verformungen und der Dehnungen des Schwingungsvorgangs die Genauigkeit der Messung zu erhöhen.

[0027] Alternativ zu der Verwendung der Triggerung mit bekannten relativen Phasenlagen können im Fall von harmonischen Schwingungsvorgängen die Zustände des Objekts bei unbekanntem relativen Phasenlagen der Triggerung jedoch unter der Voraussetzung von gleichen relativen Abständen zwischen den Triggerzeitpunkten aufgezeichnet werden, um daraus auf dieser Basis die entsprechenden Gleichungssysteme zur Berechnung von Amplitude und Phase der ermittelten Größen insbesondere der Verformungen und der Dehnungen des Schwingungsvorgangs aufzustellen und lösen zu können.

[0028] Im Fall von nicht-harmonischen Vorgängen insbesondere von Schwingungsvorgängen wie aufgrund von nichtlinearen Materialeffekten oder konstruktiv bedingten nichtlinearen Steifigkeiten, können entsprechend der gewünschten Auflösung des Vorgangs über eine Periode beliebig vielen relativen Phasenlagen der Triggerzeitpunkte für die Bildaufnahmen vorgenommen werden. Die Auswertung der Amplituden und Phasen der ermittelten Größe über eine Periode des Vorgangs wird jeweils direkt gegen-

über der Ruhelage vorgenommen oder erfolgt gegenüber einem anderen Referenzzustand vorzugsweise dem Nulldurchgang. So kann eine Funktion der Amplituden über einer Periode des Vorgangs dargestellt werden.

[0029] Es können weiter kleinere, lokale Bildbereiche für den Berechnungsvorgang ausgewählt werden können, wobei die Größe dieser Bereiche der Rechenleistung der Auswerteeinheit derart angepasst werden, dass die Berechnung der Schwingungsamplitude und ggf. der Phase in relativ kurzer Zeit erfolgt. Somit wird es möglich die Messung bzw. deren berechneten Ergebnisse wie Amplituden und Phasen in Kombination mit einer automatischen, aktiven Steuerung der Anregungsfrequenz die Resonanzfrequenzen des Objektes durch das Steuer- und Synchronisationssystem zu steuern oder dem Nutzer für eine manuelle Steuerung der Frequenzen und Anregungsamplituden bzw. Anregungsleistung oder Anregungskräfte zur Verfügung zu stellen. Weiter können mit der Steuerung die Resonanzfrequenzen des Objektes bei lokalen Maxima der Amplitude und der Phasenlage von 90° (ggf. der Kontrolle Frequenz der Anregung gleich Frequenz des schwingenden Objekts) entsprechend des Phasenresonanzverfahrens aufgesucht werden. Nach den entsprechenden Kriterien kann die Suche nach den Resonanzfrequenzen auch automatisch durch eine Rückkopplung bzw. Intervallschachtelung zwischen den Messungen und der Frequenzsteuerung durch das Synchronisationssystem erfolgen. Als Kriterium für die automatische oder manuelle Suche der Resonanzfrequenz können neben den gemessenen Amplituden A und/oder die Phasenlage P der Schwingung ggf. auch deren Gradienten dA/df bzw. dP/df herangezogen werden. Ebenso wird die Aufzeichnung eines Frequenzspektrums von Amplituden und Phasen des jeweiligen Messausschnittes möglich. Entsprechend können bei den ausgesuchten Frequenzen von besonderem Interesse z. B. den Resonanzstellen mit voller Auflösung gemessen werden oder aus dem Frequenzspektrum weitere Sekundärgrößen abgeleitet werden.

[0030] Bei bekannter Phasenlage des periodischen Vorgangs bzw. des Objekts an der Messstelle, die beispielsweise durch den aufgebrachten Sensor und dessen Messsignal über das Synchronisationssystem bekannt ist, kann die Bildaufzeichnung vorzugsweise in den Umkehrpunkten, d. h. bei Maximalen Amplituden und geringen Geschwindigkeiten der Objektberfläche, vorgenommen werden, um so die Schärfe der gewonnenen Bilder bei gleichen Beleuchtungsintensitäten und gleicher Belichtungszeiten verbessert werden kann.

[0031] Die Bildaufnahmen können auch ohne weitere Auswertung direkt auf einer Auswerteeinheit zur visuellen Beobachtung der Verschiebungen der

Objektoberfläche des Schwingungsvorganges für den Benutzer direkt dargestellt werden. So kann das System auch für die visuelle stroboskopische Beobachtung eingesetzt werden.

[0032] Weiter kann das Verfahren mit Messverfahren zu Messung Kontur oder der Neigungen der Objektoberfläche kombiniert werden kann. Die Kenntnis der relativen Koordinaten der Objektoberfläche oder deren Neigungen ist zur Ermittlung der in-plane Anteile der Verformungen und zur Ermittlung ihrer Gradienten bzw. Dehnungen notwendig oder kann zur Ausgabe der Verformungskomponenten in definierter Lage zur Normalenrichtung der Objektoberfläche herangezogen werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten mittels einer Kombination einer synchronisierten, stroboskopischen Bildaufzeichnung mit Bildkorrelationsverfahren und/oder Muster- und Objektverfolgungsverfahren.

2. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, dass die Bildaufzeichnung elektronisch vorzugsweise mittels CCD-Kameras oder CMOS-Kameras erfolgt, in digitale Form gewandelt und mittels numerisch elektronischer Datenverarbeitung ausgewertet und angezeigt wird.

3. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Bildaufzeichnungssysteme insbesondere Stereokamerasysteme mit Bildebenen, die aus verschiedenen Richtungen auf das Objekt gerichtet sind, verwendet werden.

4. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Bildaufzeichnung bzw. deren Zeitpunkt mittels einer Synchronisierungseinheit erfolgt.

5. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Bildaufzeichnung durch Synchronisation der Belichtungszeitpunkte und einstellbaren Belichtungszeitspanne mindestens einer Bildebene erfolgt.

6. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch ge-

kennzeichnet, dass beim Einsatz von elektronischen Kameras eine Synchronisation von Beginn und Ende der Belichtung der Bildebene vorzugsweise durch elektronische oder durch mechanische oder optische Shutter erreicht wird.

7. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die synchronisierte Bildaufzeichnung durch eine synchronisierte, stroboskopische Beleuchtung (Lichtblitze) mit einer einstellbaren Belichtungszeitspanne erfolgt.

8. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass bei einem Einsatzes synchronisierten, stroboskopischen Beleuchtung auch mehrere Lichtblitze während der Integrationszeit der Kamera aufgezeichnet werden.

9. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass insbesondere bei der Verwendung einer synchronisierten Beleuchtung zur Unterdrückung des Fremdlichts mit entsprechend auf die Beleuchtungsfrequenz abgestimmten Filtern vor der Bildebene platziert werden.

10. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 9 dadurch gekennzeichnet, dass durch ein an das Objekt aufgebrachten Sensors der periodischen Vorgang in Form eines Messsignal an das Synchronisationssystem zur Triggerung übertragen wird.

11. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 9 dadurch gekennzeichnet, dass ein vorhandenes Synchronsignal des Erregers oder des erregenden Systems des periodischen Vorgangs zur Triggerung durch das Synchronisationssystem herangezogen wird.

12. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der Ansprüche 10 und 11 dadurch gekennzeichnet, dass das empfangene Signal hinsichtlich der Frequenz des periodischen Hauptanteils analysiert wird.

13. Verfahren zur Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass ein periodisches Signal beliebiger Form und Frequenz durch das Synchronisati-

onssystem selbst für eine aktiv betriebenen und gesteuerte Anregung des Objekts durch ein oder mehrere Erreger-elemente erzeugt und zugleich für die Triggerung verwendet wird.

14. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 13 dadurch gekennzeichnet, dass das Synchronisationssystem lediglich durch manuelle Vorgabe einer Frequenz gesteuert wird.

15. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenz des ausgehenden Triggersignals des Synchronisationssystems zur Synchronisierung der Bildaufzeichnung so gewählt wird, dass diese der Quotient aus der Frequenz des schwingenden Objekts und einem Teiler ist.

16. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenz des ausgehenden Triggersignals des Synchronisationssystems zur Synchronisierung der Bildaufzeichnung mit einer relativen Phasenverschiebung verwendet wird.

17. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass eine Zeitlupensequenz des Vorgangs, insbesondere der Schwingung, durch eine Frequenzverstimmung oder eine kontinuierlichen Phasenverschiebung des ausgehenden Triggersignals des Synchronisationssystem aufgezeichnet wird.

18. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche 1-17 dadurch gekennzeichnet, dass die Oberfläche des Objekts mit einem künstlich aufgebracht zufälligen, korrelierbarem Muster versehen ist.

19. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach Anspruch 18 dadurch gekennzeichnet, dass die künstliche Objektpräparation beispielsweise durch das zufällige Besprühen mittels Farbspritzer oder Farbtropfen oder dem Aufbringen von Flecken auf einem andersfarbigen Untergrund ein Specklemuster erzeugt werden kann.

20. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der Ansprüche 1 bis 17 dadurch gekennzeichnet, dass das aus natürlichen, lokal individuellen Strukturen der Objektoberfläche resultieren Muster

genutzt werden kann oder bereits vorhandene Muster, Kannten sowie charakteristische Merkmale oder Umrissse von Bauteilen oder Teilbereichen von Bauteilen und Komponenten des gesamten Bild verfolgt werden.

21. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass eine Kalibrierung des Bildmaßstabes unter Berücksichtigung der optischen erfolgt

22. Verfahren und Vorrichtung zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach den vorangegangenen Ansprüchen dadurch gekennzeichnet, dass durch die Verwendung von mehreren Bildebenen und der Kalibrierung der Maßstäbe eines Messvolumens und den relativen optischen Achsen der Bildebenen zueinander, insbesondere bei Stereokamerasystemen, eine maßstäblich Verfolgung der Speckle, Specklemuster, Muster, Kannten und Umrissen von Objekte und Bauteilen im Raum durch Bildkorrelationsverfahren oder Muster- und Objektverfolgungsverfahren auch in Kombination mit Triangulationsverfahren möglich ist.

23. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach Anspruch 21 und 22 dadurch gekennzeichnet, dass aus der Verfolgung der Speckle, Specklemuster, Muster, Kannten und Umrissen von Objekte und Bauteilen die Bewegung, Verschiebungen oder Verformungen des Objekts bzw. der Objektoberfläche ermittelt wird.

24. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach Anspruch 23 dadurch gekennzeichnet, dass ermittelte Bewegung, Verschiebungen oder Verformungen des Objekts bzw. der Objektoberfläche in die Anteile von beliebigen Raumrichtungen zerlegt werden.

25. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass eine Messung der Kontur des Objekts oder der Konturkrümmung der Objektoberfläche nach bekannten Stereobildkorrelationsverfahren, Streifenprojektionsverfahren und/oder durch ein anderes Verfahren durchgeführt wird.

26. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, durch die Ausrichtung der aktuellen Oberflächennormalen bekannt ist und für die weitere Auswertung zur Berechnung der relativen Lagen der Verformungsanteile zur den Oberflächennormalen sowie der Dehnungen der Objektoberfläche verwendet wird.

27. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der Ansprüche 1 bis 26 dadurch gekennzeichnet, dass bei harmonischen Schwingungsvorgängen mindestens zwei Zustände des Objekts bei bekannten relativen Phasenlagen der Triggerung sowie mindestens ein Zustand in der Ruhelage erfasst werden oder mindestens drei Zustände mit bekannten relative Phasenlagen der Triggerung während der Schwingung erfasst werden, um die notwendigen Gleichungen zur Berechnung von Phase- und Amplitude der ermittelten Größen insbesondere der Verformungen und der Dehnungen des Schwingungsvorgangs zu ermitteln.

28. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach Anspruch 27 dadurch gekennzeichnet, dass eine höhere Anzahl von Zustände des Objekts bei bekannten relativen Phasenlagen der Triggerung erfasst werden.

29. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach Anspruch 27 dadurch gekennzeichnet, dass im Fall von harmonischen Schwingungsvorgängen die Triggerung bei unbekanntem relativen Phasenlagen gegenüber der Triggerung jedoch unter der Voraussetzung gleicher relativer Abständen zwischen den Triggerzeitpunkten aufgezeichnet werden.

30. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 26 dadurch gekennzeichnet, dass im Fall von nicht-harmonischen Vorgängen insbesondere von nichtharmonischen Schwingungsvorgängen beliebig viele relative Phasenlagen der Triggerzeitpunkte für die Bildaufnahmen über eine Periode des Vorgangs entsprechend der gewünschten Auflösung vorgenommen wird und eine Auswertung der Amplituden und Phasen der ermittelten Größe jeweils gegenüber der Ruhelage oder einem anderen Referenzzustand vorzugsweise dem Nulldurchgang der Schwingung erfolgt.

31. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass kleinere, lokale Bildbereiche für den Berechnungsvorgang ausgewählt werden können, wobei die Größe dieser Bereiche der Rechenleistung der Auswerteeinheit derart angepasst werden, dass die Berechnung der Schwingungsamplitude und ggf. der Phase in relativ kurzer Zeit erfolgt bzw. die Berechnungszeit entsprechend der weiteren Verwendung der Ergebnisse angepasst wird.

32. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach

Anspruch 32 und der Ansprüche 11-14 dadurch gekennzeichnet, dass anhand der Berechnungen der Schwingungsamplituden und der Phasenlagen des Objektes in Kombination mit einer aktiven Steuerung der Anregungsfrequenz die Resonanzfrequenzen des Objektes durch Rückkopplung, Intervallschachtelung oder anderen Verfahren automatisch gefunden werden.

33. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass als Kriterium für die automatische oder manuelle Suche der Resonanzfrequenz die der Schwingungsamplituden A (insbesondere lokale Maxima) oder die relative Phasenlage P der Schwingung gegenüber der Phasenlage der Anregung (insbesondere bei 90° relativer Phasendifferenz) oder deren Gradienten dA/df bzw. dP/df oder eine Kombination aus den vorangegangenen Größen herangezogen werden kann.

34. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass bei bekannter Phasenlage des periodischen Vorgangs bzw. des Objekts, insbesondere bei harmonischen Schwingungen mit gleicher Phasenlage z. B. im Resonanzfall die Bildaufzeichnung vorzugsweise in den Umkehrpunkten, d. h. bei Maximalen Amplituden und geringen Geschwindigkeiten der Objektoberfläche, vorgenommen wird.

35. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Bildaufnahmen ohne weitere Auswertung zur visuellen Beobachtung der Verschiebungen der Objektoberfläche des Schwingungsvorganges herangezogen werden können.

36. Verfahren zu Sichtbarmachung und Messung von Verformungen von schwingenden Objekten nach einem der vorangegangenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren mit Messverfahren zu Messung Kontur oder der Neigungen der Objektoberfläche kombiniert werden kann.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

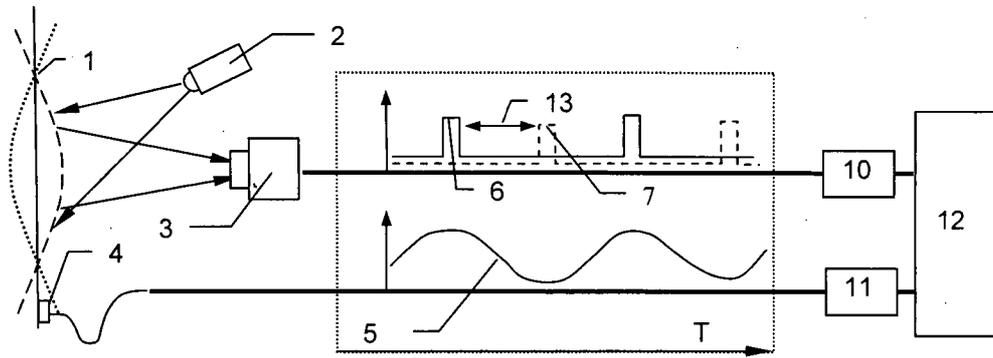


Fig. 1

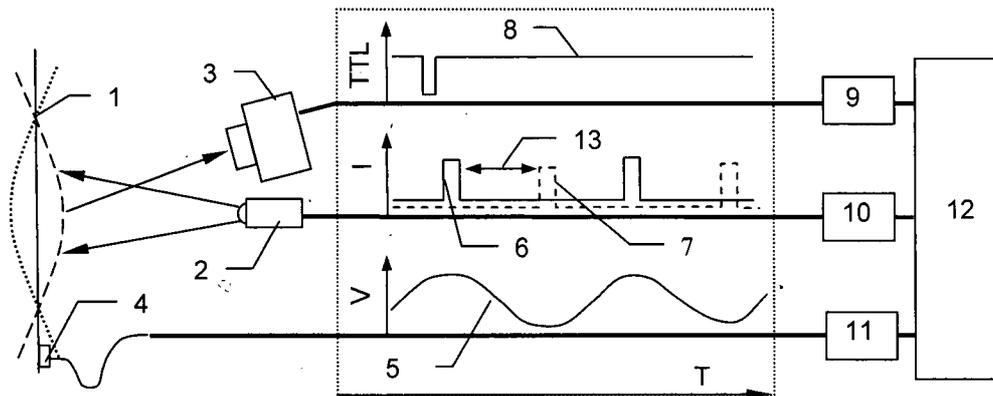


Fig. 2

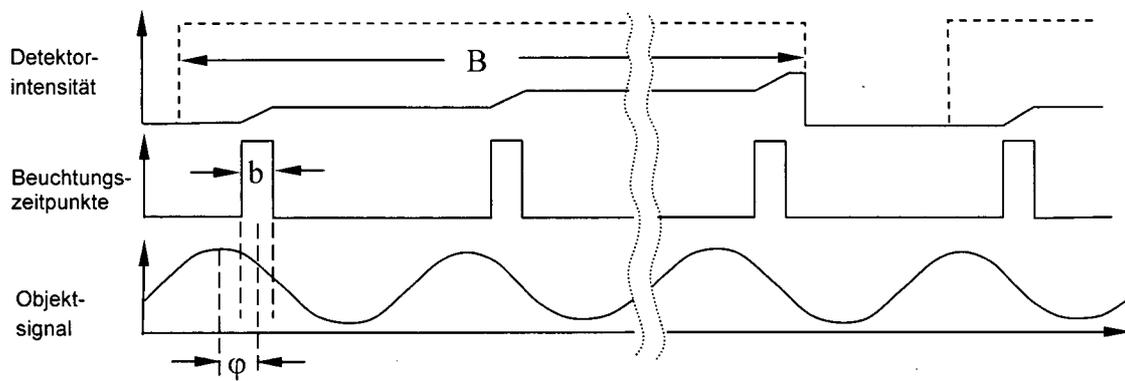


Fig. 3

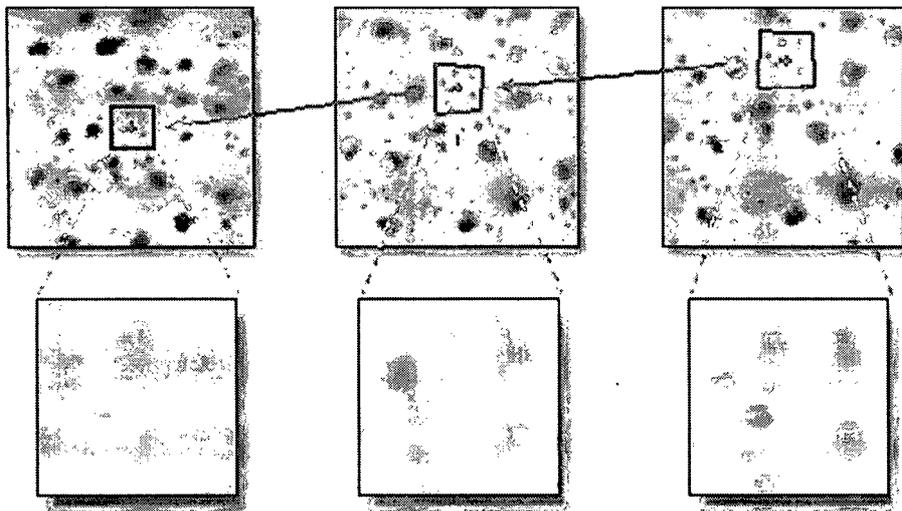


Fig. 4