

3D-Verformungsmessungen auf 10nm genau Grundlagen und Anwendungsbeispiele der Speckle-Interferometrie

Käferstein, B.

Die Speckleinterferometrie ist eine Methode zur hochgenauen Verformungsmessung bei statischer und dynamischer Last. Sie ist aus der Holographie abgeleitet und kann durch deren Gesetzmäßigkeiten erfaßt werden. Im Gegensatz zur relativ komplexen Anwendungstechnik der klassischen Holographie bietet die Speckleinterferometrie den Vorteil, daß sie aufgrund der rein elektronischen Auswertung der Interferenzbilder auf Bildverarbeitungsrechnern online Verformungsfelder im Bereich von 0,01-2µm erfaßt.

Speckle interferometry is a highly sensitive method to detect small scale static and dynamic deformations. The setup is derived from holography and the theoretical equations are indeed quite identical. Speckle interferometry has in contrast to the complex application procedures of traditional holography the advantages of full automated image processing. This makes it possible to evaluate deformation fields in a range from 0.01µm up to 2µm in real time on common computer systems.

1 Einleitung

Die Speckleinterferometrie ist ein Ganzfeldmeßverfahren zur Ermittlung von Bauteildeformationen unter Verwendung von kohärentem und monochromatischem Licht, das zur Interferenz gebracht wird. Die verwendete Lichtquelle darf nur eine Wellenlänge abstrahlen (Monochromasie), und es muß gewährleistet sein, daß die interferierenden Wellen einen gemeinsamen zeitlichen und räumlichen Bezug haben, also die konstante Anfangsphasendifferenz wie beim Austritt aus der Lichtquelle beibehalten. Als Lichtquelle eignet sich deshalb nur ein Laser, dessen Mindestkohärenzlänge durch die Anforderungen des Meßaufbaus festgelegt wird.

2 Grundlagen

2.1 Speckleeffekt

Die Erscheinung der „Speckles“ – „Fleckchen“ oder auch „Lichtgranulation“ genannt, **Bild 1**, beruht auf der Tatsache, daß bei der Beleuchtung von diffus reflektierenden, rauhen Oberflächen die Rauigkeitsspitzen nach dem Huygenschen Prinzip als

Ausgangspunkte für neue Elementarwellen dienen, die sich rein zufällig im Raum ausbreiten und überlagern. Diesen Effekt kann man z.B. bei Laserpointern beobachten, wenn man eine matte Oberfläche anstrahlt. Dabei ist es für eine gute Messung wichtig, eine „gleichmäßig rauhe“ Struktur im Lichtwellenlängenbereich¹ ohne Texturen zu erhalten.

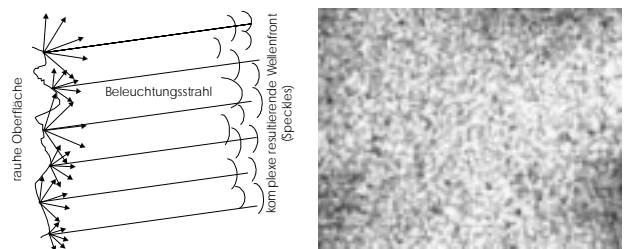


Bild 1: Speckles durch Lichtgranulation auf rauhen Oberflächen

Die Verwendung von matter Aluminiumsprühfarbe oder Sandstrahlen erzeugen zwar sehr grobe und kontrastreiche Speckles, hat aber den Nachteil, daß dort die Rückreflexion sehr zielgerichtet erfolgt, so daß man nur Out-Of-Plane Messungen durchführen kann. Zusätzlich muß die Farbe in mehreren Schichten sehr dünn aufgetragen werden, so daß beide Verfahren relativ aufwendig sind. Besser ist das Aufsprühen von schnell trocknendem Farbeindring-Entwickler, der sich sehr leicht wieder abwischen läßt und für alle Beleuchtungsrichtungen nahezu gleich helle homogene Speckles erzeugt. Weitere Möglichkeiten sind z.B. das Aufrauen mit Sandpapier und Stahlwolle, matter weißer Sprühlack oder Dispersionsfarbe mit Latexanteil, die jedoch nur Notlösungen darstellen. Oberflächen mit Walz- oder Gußhaut können zwar unbehandelt verwendet werden, jedoch ist dann der Lichtverlust sehr groß.

Man unterscheidet zwei Arten von Speckles: Objektive Speckles entstehen, wenn die Bauteiloberfläche mit der Wellenlänge λ und dem Strahldurchmesser L angestrahlt wird und die entstehende komplexe Wellenfront auf einen im Abstand z

¹ z.B. HeNe-Laser mit 0,632 µm Wellenlänge

stehenden Schirm trifft. Die dort entstehende mittlere Specklegröße Δx berechnet sich zu:

$$\Delta x = \frac{\lambda z}{L} \quad \text{Gl. 1}$$

Subjektive Speckles entstehen, wenn eine „granulierte“ oder „speckelnde“ Oberfläche mit einem Abbildungssystem der Brennweite f auf einen Schirm fokussiert wird. Die mittlere Specklegröße ist dann etwa:

$$d_{sp} \approx \frac{2,4\lambda f}{d} = 2,4\lambda F \quad \text{Gl. 2}$$

wobei d der Blendendurchmesser der Abbildungslinse des Objektivs ist, und F ist die sogenannte „Blendenzahl“, die auf dem Blendeneinstellung des Kameraobjektivs aufgedruckt ist und so eingestellt werden muß, daß die Speckles etwa so groß wie die CCD-Pixel sind.

2.2 Interferometrie

2.2.1 Wellenüberlagerung und Bestimmung der Anfangsphasendifferenz

Das grundlegende Meßprinzip ist die Interferometrie, bei der zwei kohärente Lichtwellenzüge zur Überlagerung gebracht werden.

Der Laserstrahl wird in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Einer passiert als Referenzstrahl vor oder nach der Aufweitung meist einen Phasenschieber und wird dann auf das CCD-Array der Kamera gelenkt. Mit dem anderen Teil wird das Bauteil beleuchtet, und das reflektierte Specklemuster das man als sogenannten Objektstrahl bezeichnet, über das Kameraobjektiv ebenfalls auf den CCD-Sensor abgebildet, wo sich beide elektrische Lichtfeldvektoren additiv überlagern. In **Bild 2** ist beispielhaft ein interferometrischer Aufbau nach dem klassischen Michelson-Typ dargestellt, mit dem man Verformungen des Objekts senkrecht zur Oberfläche messen kann.

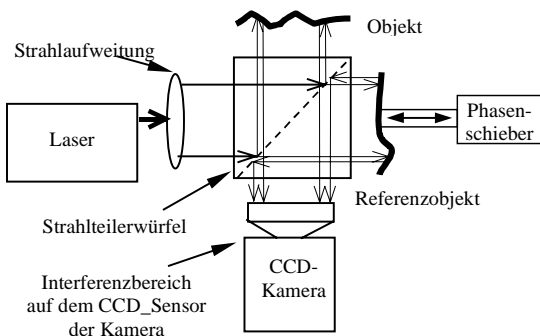


Bild 2: Aufbau eines Michelson-Interferometers zur Messung von Out-Of-Plane Verformungen

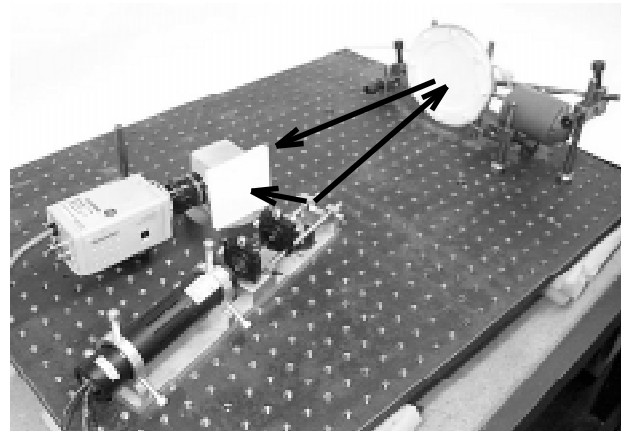


Bild 3: Realisierung eines OOP-Michelson-interferometers nach **Bild 2** ohne Phasenschieber

Betrachtet man einen CCD-Pixel so gilt für die auftreffenden Einzelwellen E mit den Amplituden A und der Lichtfrequenz $f = \frac{\omega}{2\pi}$ bei einer anfänglichen Phasenverschiebung von φ für Objekt- und Referenzstrahl (Index „o“ und „r“):

$$E_o(t) = A_o \sin(\omega t + \varphi_o) \quad \text{Gl. 3}$$

$$E_r(t) = A_r \sin(\omega t + \varphi_r)$$

Durch Addition erhält man:

$$E_{res}(t) = A_o(\sin(\omega t) \cos \varphi_o - \cos(\omega t) \sin \varphi_o) + A_r(\sin(\omega t) \cos \varphi_r - \cos(\omega t) \sin \varphi_r) \quad \text{Gl. 4}$$

Der CCD-Pixel erfaßt die Intensität des Lichtes, die proportional zum Quadrat des E-Feldes ist, und mittelt diese über viele Schwingungsperioden ($T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$):

$$\begin{aligned} \overline{I_{res}} &= \frac{1}{T} \int_0^T I_{res}(t) dt \propto \frac{1}{T} \int_0^T E_{res}^2(t) dt \\ &= \frac{1}{2} A_r^2 + \frac{1}{2} A_o^2 + A_o A_r \cos(\varphi_o - \varphi_r) = \quad \text{Gl. 5} \\ &= I_r + I_o + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\varphi_o - \varphi_r) \end{aligned}$$

Dabei sind I_r und I_o jeweils die Einzelintensitäten von Referenz- und Objektstrahl. Im Cosinus-Term ist die Phasendifferenz zwischen beiden enthalten, so daß man durch Interferenz von zwei Lichtwellen den Gangunterschied zwischen beiden durch Helligkeitsmessung ermitteln kann. Das ist Basis der interferometrischen Messverfahren Holographie und Speckleinterferometrie. Man kann zur Bestimmung der Helligkeiten von I_r und I_o je einen Strahl abdunkeln und die Helligkeit des anderen messen, und danach eine Messung mit beiden, sich überlagernden Strahlen vornehmen. Dann erhält man durch Auflösen von **Gl. 5** sehr einfach die Anfangsphasenverschiebung $\theta = \varphi_o - \varphi_r$. Das ist

aber nicht praktikabel, so daß man die sogenannte Phasenschiebetechnik verwendet.

Problematisch bei dieser Vorgehensweise ist, daß $\arccos(x)$ nur Winkel im Bereich von $[0 \dots \pi]$ liefert, also größere Phasenwinkel in diesen Bereich gefaltet werden, **Bild 4**. Der Term $I_r + I_o$ ist die sogenannte Hintergrundintensität, die unabhängig von der Phasendifferenz ist und $2\sqrt{I_o I_r}$ ist der Kreuzkorrelationsterm der angibt, wieviel Phaseninformation im Helligkeitsmuster gespeichert wird. Man muß diesen Anteil maximieren, um sicherzustellen, daß im Helligkeitsmuster möglichst viel Phaseninformation vorhanden ist, indem man zunächst die mittleren Helligkeiten von Objekt- und Referenzstrahl abgleicht.

Für ein ganzes CCD-Array ist nicht nur die Größe der Speckles zufällig verteilt, sondern auch Phasenlage und Helligkeit, also $\overline{I_{res}}, \theta, I_o, I_r = f(x, y)$. Für eine computergestützte Auswertung ist es vorteilhaft, Speckles mit ihrer Kreuzkorrelation bzw. Modulation in der Verformungsberechnung zu gewichten, um zu verhindern, daß „kontrastarme“ Speckles zu starken Einfluß nehmen.

Bringt man nun eine Phasenverschiebung ein, indem man die optische Länge des Objektstrahls durch eine Bauteilverschiebung vergrößert, oder die Glasfaser in der der Referenzstrahl läuft bewegt, dann ist auf die Anfangsphasendifferenz zwischen beiden Strahlen die Phasenverschiebung vorzeichenrichtig aufzuaddieren. Allgemein gilt vor der Veränderung für die Intensität aus **Gl. 5**:

$$\overline{I_{res,y}} = I_r + I_o + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\theta_v) \quad \text{Gl. 6}$$

Und nach der Veränderung

$$\overline{I_{res,n}} = I_r + I_o + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\theta_n) \quad \text{Gl. 7}$$

Wenn man **Gl. 5** und **Gl. 6** jeweils nach ihren Phasen auflöst, erhält man die aus der Veränderung resultierende Phasendifferenz, unter der Voraussetzung, daß alle anderen Größen bekannt sind:

$$\Delta\phi = \theta_n - \theta_v, \quad \text{Gl. 8}$$

2.2.2 Phasenschiebetechnik

Um jeweils für einen Zustand vor oder nach der Verformung bei einem quasistatischen Belastungsfall die Phase zu berechnen, verwendet man heute die sogenannte Phasenschiebetechnik. Dabei gibt man eine bekannte Phasendifferenz für den Referenzstrahl vor und nimmt jeweils ein Intensitätsmuster ohne Veränderung des Objekts auf, **Gl. 9** bis **Gl.11**. Für eine eindeutige Lösung mit einfachen Gleichungen, die entsprechend hohe

Geschwindigkeiten bei der Bildverarbeitung erreichen, kann man sich drei äquidistante Phasenlagen ($-120^\circ, 0^\circ$ und 120°) vorgeben und erhält bei unverformtem Objekt ein lineares Gleichungssystem dritter Ordnung mit den drei Unbekannten I_r, I_o und der gesuchten Anfangsphasendifferenz θ :

$$I_1 = I_r + I_o + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\theta) \quad \text{Gl. 9}$$

$$I_2 = I_r + I_o + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \quad \text{Gl. 10}$$

$$I_3 = I_r + I_o + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \quad \text{Gl. 11}$$

Daraus errechnet sich die Phasendifferenz zwischen beiden Strahlen zu

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{3}(I_3 - I_1)}{2I_1 - I_2 - I_3} \quad \text{Gl. 12}$$

Neben der zeitlichen Phasenschiebetechnik, bei der drei Bilder aufgenommen werden müssen, gibt es noch räumliche Phasenschiebetechniken, die aus einer einzigen Aufnahme die Phaseninformation erhalten, indem der eingekoppelte Referenzstrahl zum CCD verkippt wird, so daß je drei benachbarte Pixel 120° zum mittleren phasenverschoben sind, **Bild 5**.

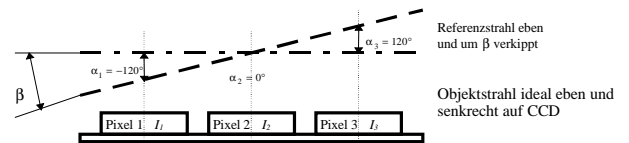


Bild 5: Räumlicher Phasenschieber

Eine Phasenberechnung nach dieser Methode führt ebenfalls zu einer Faltung der tatsächlich aufge-

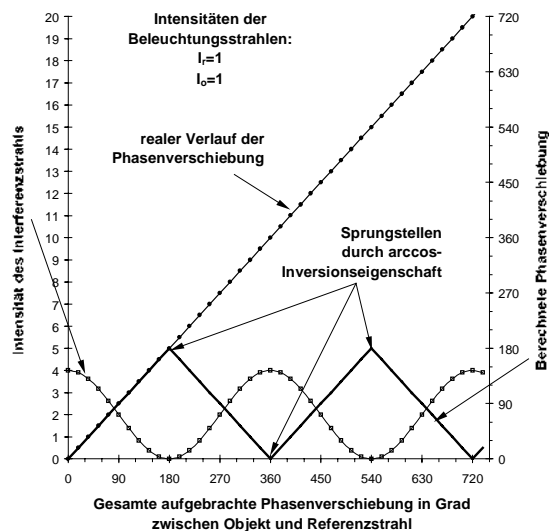


Bild 4: Resultierende Intensität bei unterschiedlicher Phase zwischen Objekt- und Referenzstrahl, Mehrdeutigkeit bei der Phasenberechnung

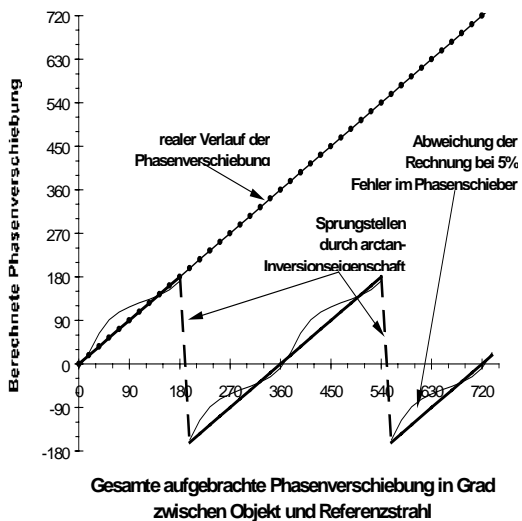


Bild 6: Phasenschiebetechnik mit drei Bildern und Doppeldeutigkeit bei der Phasenrückfaltung; Fehlereinfluß

brachten Phasendifferenz in den Bereich zwischen -180° und 180° ; an den Übergangsstellen treten hier aber Sprünge, **Bild 6** anstatt Knicke, **Bild 4** auf, die man leichter detektieren kann.

Um die Phasendifferenz aufgrund einer Bauteilverformung zu ermitteln, nimmt man drei Intensitätsbilder auf vor der Verformung und drei mit Phasenschiebetechnik nach der Verformung. Für jeden Zustand berechnet man die Phase und kann dann nach **Gl. 8** die verformungsbedingte Phasendifferenz $\Delta\phi$ durch einfache Subtraktion ermitteln.

3 Konstruktion eines Meßaufbaus

3.1 Vorgehensweise

Die Verformungsmessung an Bauteilen mit Speckleinterferometrie setzt sich grundsätzlich aus zwei voneinander relativ unabhängigen Teilproblemen zusammen:

a. *Wie ist der Zusammenhang zwischen der gemessenen Helligkeitsveränderung und der Phasendifferenz. Die Phasenverschiebung entsteht bei der Verformungsmessung durch eine Veränderung der optischen Weglänge von Referenz- und/oder Objektstrahl.*²

² Es ist auch denkbar, den optischen Weg durch eine Brechzahlveränderung einzubringen, ohne dabei eine örtliche Verschiebung der Komponenten im Lichtweg zu haben. Das wird z. B. verwendet, um den temperaturabhängigen oder konzentrationsabhängigen Brechungsindex von Lösungen und Flüssigkeiten zu ermitteln.

b. *Wie ist der Zusammenhang zwischen der aus der Intensitätsmessung nach a. berechneten Phasendifferenz und der tatsächlichen Bauteilverformung? Dabei können je nach Versuchsaufbau Dehnungen, Neigungen, Rotationen und Verschiebungen getrennt oder in Kombination zu Phasenverschiebungen führen und gemessen werden.*

Punkt a wurde bereits in 2.1 Speckleeffekt erläutert und stellt ein allgemeines Problem der Wellenmechanik dar und tritt bei Akustik, Optik und Elektrotechnik gleichermaßen auf. Dabei kann man unterscheiden in statische und dynamische Anwendungen, die immer zeitlich veränderliche Phasenbeziehungen von interferierenden Wellenzügen betrachten. Daraus leitet man entsprechende Methoden zur Erfassung der Grauwerte ab. Als Beispiele seien hier das Subtraktionsverfahren, Additionsverfahren und die Phasenschiebetechnik für statische Anwendungen, das Zeitmittelverfahren mit und ohne Phasenschiebetechnik und das Echtzeitsubtraktionsverfahren für harmonische Schwingungsanalysen bzw. das Doppelpulsverfahren mit räumlichen Phasenschieber als Verfahren für hochdynamische Stoßvorgänge erwähnt.

Punkt b ist ein Problem der Mechanik und Vektoralanalyse. Hierbei ist zu klären, welche Bauteilverformungen sich in Form einer Phasenänderung bemerkbar machen. Dadurch wird festgelegt, wie der Meßaufbau geometrisch definiert ist, also von wo beleuchtet, und von wo aufgenommen wird, ob man Verschiebungen senkrecht zum Bauteil oder in Bauteilebene messen will oder 3D-Verformungen.

Als letzter Schritt ist der eigentliche Meßaufbau festzulegen, je nachdem ob man Gradienten oder absolute Verformungen ermitteln will.

Bei der Shearographie wird z. B. durch die Optik ein Doppelbild des Bauteils erzeugt, **Bild 17**, so daß der Referenzstrahl keine ebene Welle, sondern ein verschobenes Bild des Objekts ist, und man die Verformungen jeweils zwischen zwei Objektpunkten mißt. Je nach Verscherungs- und Beleuchtungsrichtung kann man Neigungsänderungen der Oberfläche oder Dehnungen in der Ebene in verschiedene Richtungen, bei Bedarf sogar in radialer oder tangentialer Richtung aufnehmen, aber auch 3D-Gradienten.

3.2 Allgemeiner Ansatz zur Berechnung der Weglängenänderung

Um den Zusammenhang zwischen der Phasendifferenz, die mit Hilfe der Intensitätsmuster ermittelt wurde, und der tatsächlichen Verformung des

Bauteils herzustellen, sind die Meßaufbauten zu betrachten. Geht man näherungsweise davon aus, daß die Beleuchtungsquelle L eine Kugelwelle abstrahlt, der Beobachter B sich in einem diskreten Punkt befindet und vernachlässigt die Abbildungseigenschaften des Kameraobjektivs, dann kann man die Weglänge eines Strahls, jeweils vor und nach einer Verformung des Bauteils berechnen, **Bild 7**. Der gesuchte Zusammenhang zwischen der Verformung d und der Differenz des Wegunterschiedes Δs , der linear mit der gesuchten Phasenänderung $\Delta\phi$ zusammenhängt:

$$\frac{\Delta s}{\lambda} = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \quad \text{Gl. 13}$$

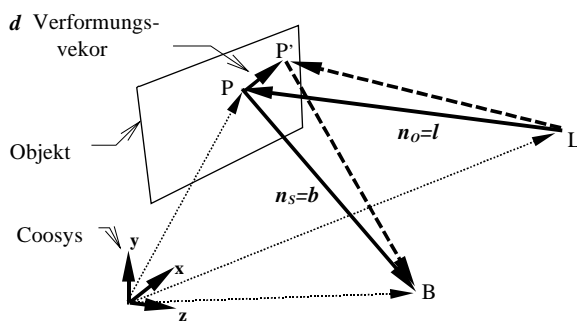


Bild 7: Weglängenänderung eines Lichtstrahls vom Laser zum Sensor

Für einen Lichtstrahl von L über den unverschobenen Objektpunkt P nach B erhält man dann für die Anfangsweglänge aus den Ortsvektoren:

$$s = |\vec{P} - \vec{L}| + |\vec{B} - \vec{P}| \quad \text{Gl. 14}$$

und nachdem P um den Verformungsvektor \vec{d} verschoben wurde:

$$s' = |\vec{P}' - \vec{L}| + |\vec{B} - \vec{P}'| = |\vec{P} + \vec{d} - \vec{L}| + |\vec{B} - (\vec{P} + \vec{d})| \quad \text{Gl. 15}$$

Wenn man zur Vereinfachung $\vec{l} = \vec{P} - \vec{L}$ als Beleuchtungsvektor und $\vec{b} = \vec{P} - \vec{B}$ als Beobachtungsvektor zur Rechnung einsetzt, erhält man für die Wegänderung:

$$\begin{aligned} \Delta s &= s' - s \\ &= \sqrt{(l_x + d_x)^2 + (l_y + d_y)^2 + (l_z + d_z)^2} \\ &\quad + \sqrt{(b_x + d_x)^2 + (b_y + d_y)^2 + (b_z + d_z)^2} \\ &\quad - \sqrt{l_x^2 + l_y^2 + l_z^2} - \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2} \end{aligned} \quad \text{Gl. 16}$$

für kleine $|\vec{d}|$ läßt sich Δs als eine mehrdimensionale Taylor-Reihe um den Entwicklungspunkt $\vec{d}_0 = (d_{x_0} \ d_{y_0} \ d_{z_0})^T = \vec{0}$ schreiben, und es ergibt sich nach einigen Umformungen:

$$\Delta s = 0 + \left(\frac{l_x}{|\vec{l}|} + \frac{b_x}{|\vec{b}|} \right) dx + \left(\frac{l_y}{|\vec{l}|} + \frac{b_y}{|\vec{b}|} \right) dy + \left(\frac{l_z}{|\vec{l}|} + \frac{b_z}{|\vec{b}|} \right) dz \quad \text{Gl. 17}$$

oder wieder in Vektorschreibweise transformiert:

$$\Delta s = (\vec{l}_0 + \vec{b}_0) \cdot \vec{d} \quad \text{Gl. 18}$$

In obiger Gleichung ist \vec{l}_0 der normierte Beleuchtungsvektor und \vec{b}_0 der normierte Beobachtungsvektor, der Term $\vec{s} = (\vec{l}_0 + \vec{b}_0)$ wird Sensitivitätsvektor genannt, da die Wegänderung \vec{d} durch das Skalarprodukt auf ihn projiziert und in seine Richtung gemessen wird. \vec{l}_0 und \vec{b}_0 sind zwar für einen Punkt konstant, wenn er sich nur gering verformt (Forderung für die Taylor-Reihe), aber immer noch für jeden Objektpunkt von der Bauteiloberfläche abhängig. Erst bei der Annahme, daß man von der Ferne aus beleuchtet und beobachtet, darf man ebene Wellenfronten voraussetzen und aus dem Meßaufbau *einen* Sensitivitätsvektor für alle Bauteilpunkte annehmen. Ansonsten muß man diese Abweichung rechnerisch korrigieren.

Für eine Deformationsmessung im Statischen bestimmt man z.B. nach der Phasenschiebemethode die verformungsbedingte Phasendifferenz $\Delta\phi$ durch einfache Subtraktion nach **Gl. 8** und rechnet diese dann entsprechend **Gl. 13** in eine optische Weglängenänderung Δs um. Aus dieser kann man dann nach **Gl. 18** bei einem ESPI-System die Bauteilverformung \vec{d} ermitteln.

4 Systemkomponenten

Grundsätzlich ist der Gesamtaufbau steif zu gestalten, und Temperaturdehnungen oder Luftströmungen zu vermeiden, durch die Drift oder ein instabiles Speckleinterferenzmuster erzeugt wird. Eine Schwingungsisolation ist bei ESPI-Systemen notwendig, während Shearographiesysteme weniger sensibel gegenüber Starrkörperbewegungen sind, da sie Verformungsgradienten messen.

4.1 Kameras

Ein Speckle-Meßsystem muß in der Lage sein, die entstehenden Speckles aufzulösen, weshalb immer eine variable Blende im Kameraobjektiv eingebaut sein muß, um die Specklegröße entsprechend anpassen zu können. Wenn man eine handelsübliche Schwarzweißkamera (1/3" CCD mit 4,8x3,6mm² Fläche und einer Auflösung von 753x582 Pixel einschließlich 25mm Objektiv 1:2) verwendet, und auf ein Pixel etwa ein Speckle abgebildet werden soll, ergibt sich eine Blendenzahl von 4, damit die Speckles noch groß genug sind um von der Kame-

ra aufgelöst zu werden. Damit gehen ca. 75% Licht zu voll geöffneter Blende verloren, was ein großer-Nachteil des Verfahrens ist. Entscheidend für eine exakte Messung ist der lineare Zusammenhang zwischen Grauwert und Ausgangsspannung, so daß immer eingebaute AGC-Filter³ abgeschaltet werden müssen.

4.2 Framegrabberkarten

Mit einer schnellen Bilderfassungskarte werden die Specklemuster in Echtzeit digitalisiert und entweder direkt auf dem Board oder im Rechner online verrechnet. Je nach Komplexität des Aufbaus und des eingesetzten Rechenalgorithmus muß man derzeit von Bildwiederholraten von 2/s bis 0,1/s ausgehen. Durch eine höhere Graustufenzahl, (Standard: 256), wird die Meßempfindlichkeit verbessert, jedoch darf man dabei nicht die Genauigkeit des Phasenschiebers und die Linearität der Kamera außer acht lassen, **Bild 6**. Einige Boards haben einen Overlaypuffer, mit dem ein bei normaler Raumbelichtung aufgenommenes Bauteil dem Streifenmuster zur Anschaulichkeit überlagert wird.

4.3 Optik

Die verwendeten optischen Bauteile müssen im allgemeinen keine allzu hohen Anforderungen erfüllen, es ist aber auf eine sehr gute Entspiegelung zu achten, weil sonst Mehrfachinterferenzen im System auftreten, die zu einer räumlichen Modulation der Wellenfronten führen und den Kontrast der Speckles auf dem CCD-Sensor so stark senken können, daß der Meßaufbau unbrauchbar wird. Bei ESPI-Systemen mit Referenzstrahleinkoppelung zwischen Abbildungsoptik und CCD-Sensor hat man meist das Problem, daß dort der Abstand bei Verwendung eines Standardobjektivs zu klein ist, um dort einen Strahlteiler zu positionieren. Man kann aber auf kurzbrennweitige Kleinbildkameraobjektive ausweichen oder eine Retrofokuskonstruktion vornehmen. Als Spiegel kommen ausschließlich Oberflächenspiegel in Betracht, da herkömmliche zu Doppelreflexionen und starken Interferenzstreifen führen, Strahlteiler sollten auf der Rückseite entspiegelt, oder leicht keilförmig geschliffen sein. Zur Strahlenkung haben sich in ESPI-Systemen Monomode-Glasfasern als günstig erwiesen, die auf die Laserwellenlänge abgestimmt gleichzeitig auch einen hervorragenden Filtereffekt zur Verbesserung der Strahlqualität bieten.

³ AGC- „automatic gain control“, Kontrast und Helligkeitsverbesserung dunkler Bildbereiche

Zum Aufweiten des Lasers verwendet man je nach Durchmesser von Strahl und Objekt kostengünstige Mikroskopobjektive oder spezielle Optiken.

4.3.1 Laser

Als Laser kommen nur Monomodesysteme (TEM_{00} ⁴) unterschiedlicher Type mit oder ohne Polarisierung in Betracht. Entscheidend sind dabei einerseits die auszuleuchtende Fläche, die Frage nach dynamischer oder statischer Last und der eigentliche Meßaufbau. Dadurch werden Leistung, Betriebsart, Wellenlänge und Kohärenzlänge festgelegt. Man kann dabei Diodenlasersysteme, gepulst oder un gepulst, Festkörperlaser oder Gaslaser verwenden. Die Preisspanne liegt dabei zwischen 2500 DM für einen handlichen 25 mW Diodenlaser mit ca. 2 m Kohärenzlänge, der für eine Ausleuchtung von ca. 15x20 cm im Statischen geeignet ist, bis zu 1 W Festkörperlasern (NdYag) mit Kohärenzlängen im Bereich einiger Zentimeter für stroboskopische Anregung bis mehrere Tausend Hertz für ca. 80000DM. Es können auch Rubin-Riesenimpuls laser für die Holographie eingesetzt werden, die den Schwingungszustand durch einen Kurzzeitblitz von wenigen Nanosekunden einfrieren.

4.3.2 Phasenschieber und Steuerelektronik

Durch Verwendung eines Phasenschiebers ist es möglich, nicht nur Streifenbilder, sondern für jeden Bildpunkt den exakten Verformungswert zu erhalten. Je nach Phasenschiebetechnik sind verschiedene Ausführungen möglich, man verwendet aber meist den mechanischen Phasenschieber, bei dem unterschiedliche Wegdifferenzen in den Referenzstrahl eingebracht werden. Dazu wird an einen Piezokristall vom BV-Rechner über eine DA-Wandlerkarte und eine Regeleinheit ein definierter Spannungswert ausgegeben, der dann eine bestimmte Verschiebung hervorruft. Diese wird dazu verwendet, die optische Weglänge zu variieren, indem man z. B. einen Spiegel im Strahlengang des Referenzstrahls, die Glasfaserhalterung, eine Plan- oder Keilplatte verschiebt. Als weiterer Phasenschieber ist auch LCD-System denkbar, das den Kerr-Effekt ausnutzt.

Die Steuerelektronik wird bei dynamischen Vorgängen gebraucht, um aus dem Schwingungsmuster ein Triggersignal abzuleiten, mit dem der Laser, ein

⁴ TEM_{00} „transversal emission mode“, charakterisiert die Helligkeitsverteilung im Strahlprofil als radial-symmetrisch und Gaussförmig

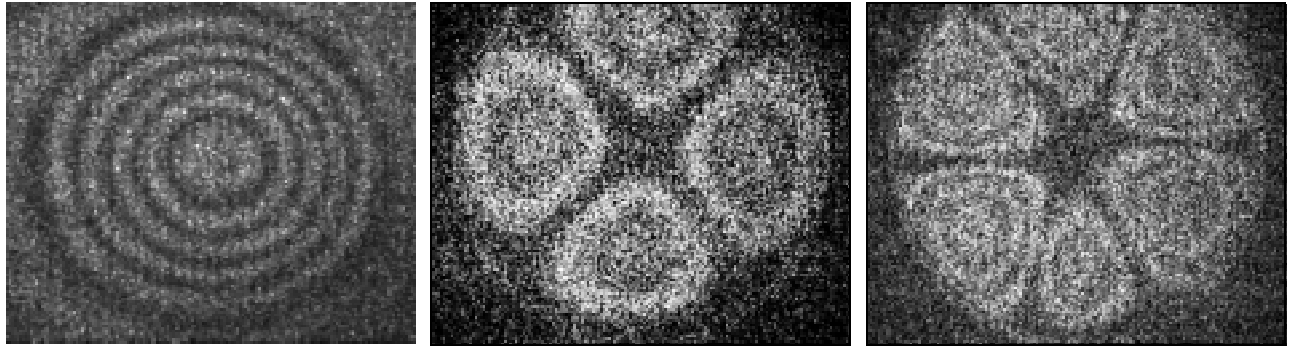


Bild 8: Statische OOP-Verformung Kreisscheibe

Bild 9: OOP-Schwingung der Scheibe bei 2400Hz

Bild 10: OOP-Schwingung der Kreisscheibe bei 3320Hz

akusto-optischer Modulator und die Bilderfassung kontrolliert werden.

5 Durchgeführte Messungen

Am IMW wurden eine Studie zum Aufbau eines Speckleinterferometers mit möglichst geringen Kosten erstellt und die Praxistauglichkeit durch dynamische Out-Of-Plane-Messungen (OOP) bewiesen. Dazu wurde an Scheibenstrukturen mit harmonischer Anregung in Bauteilebene mit dem Echtzeitsubtraktionsverfahren und 180° Phasenschiebung Schwingungsmessungen vorgenommen und ausgewertet, **Bild 11** bis **Bild 14**. Für die Studie wurden Objekte mit unterschiedlichen Verfahren vermessen:

Eine Kreisscheibe (Dicke 1 mm, \varnothing 1000 mm) wurde radial fest eingespannt und in ihrem Mittelpunkt zentrisch durch eine Einzelkraft belastet, **Bild 8**. Es wurde das Subtraktionsverfahren angewendet, bei dem die Specklemuster ohne Berechnung der Phasenbeziehung als Intensitätsmuster vor und nach der Verformung subtrahiert werden. Es leuchtet ein, daß an Stellen, an denen die Verformung 0 oder ganze Vielfache der halben Wellenlänge ist, schwarze Streifen entstehen müssen, denn der Meßaufbau ist entsprechend **Bild 2** und **Bild 3** für die OOP-Verformung empfindlich. Der Abstand zwischen zwei dunklen Streifen entspricht einer Phasenänderung von 2π und der Zusammenhang

zwischen Phasenänderung und Bauteilverschiebung ist $\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} d_z$. Die Bauteilverschiebung ist dann $d_z = \lambda/2$ und bei einem 690 nm-Laser ca. $0,35 \mu\text{m}$.

Bild 9 und **Bild 10** zeigen die gleiche Scheibe bei hamonischer Anregung mit dem Echtzeit-Subtraktionsverfahren aufgenommen. Es ist zu erkennen, daß durch eine Erhöhung der Frequenz ein weiterer Schwingungsbauch entsteht, und die Schwingungsknoten, die als schwarze Linien auftreten, symmetrisch ausgebildet sind. Bei der Streifenberechnung wurde ein Bild der Platte in Ruhe von einem zeitlich über mehrere Plattenschwingungen gemittelten Grauwertbild subtrahiert, so daß der Kontrast mit steigender Streifenordnung nach einer Besselfunktion relativ stark sinkt, während er im statischen Fall, **Bild 8** für alle Ordnungen konstant ist.

Die gleiche Scheibe wurde zusätzlich mit einem shearographischen Aufbau vermessen, **Bild 16** bis **Bild 18**, der nicht Linien gleicher OOP-Deformation, sondern Linien gleicher Oberflächenneigungsänderung anzeigt.

Beim Shearographieaufbau wird das Bauteil direkt beleuchtet, und erst danach ein Doppelbild erzeugt (z.B. mit Strahlteiler und zwei Spiegeln, Glaskeilen, gegeneinander verschobenen Halblinsen, geneigte

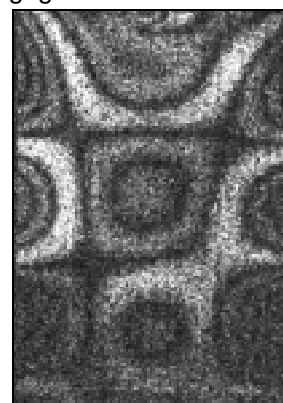
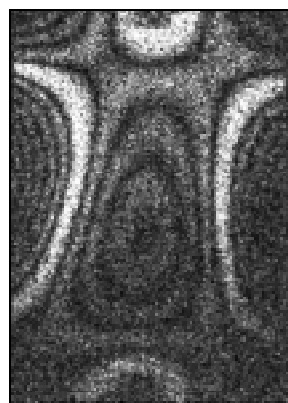


Bild 11: OOP 900 Hz

Bild 12: OOP-1000Hz

Bild 13: OOP-2100Hz

Bild 14: OOP-3000Hz

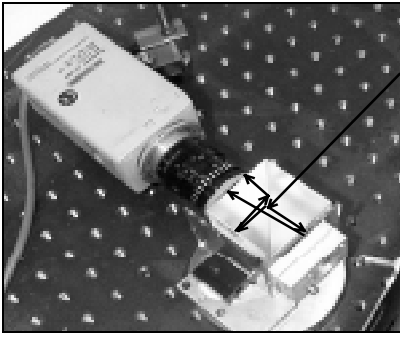


Bild 16: Shearographischer Aufbau mit Strahlführung über Strahlteilerwürfel

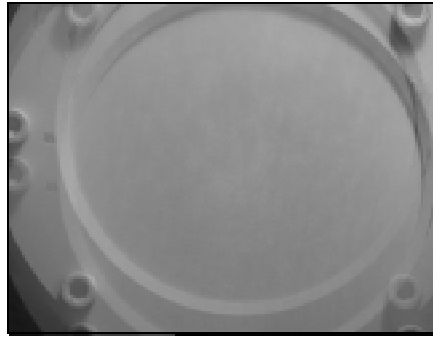


Bild 17: Durch Strahlteilerwürfel „verschertes“ Doppelbild der Kreisscheibe

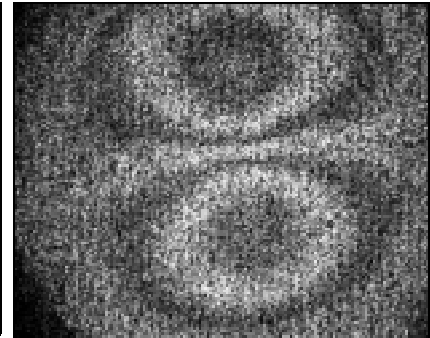


Bild 18: Shearographieaufnahme der zentrisch belasteten Kreisscheibe

Glasplatten), so daß als Referenz das verschobene Objekt dient und die Verformungen als Gradienten ausgegeben werden. Je nach Verscherungsdistanz erhält man unterschiedliche Empfindlichkeiten. Dieses Verfahren ist relativ unabhängig von Starrkörperverschiebungen und deshalb hervorragend für den Feldeinsatz geeignet. Es wird im wesentlichen zur Fehlerdetektion z.B. bei Reifen oder Laminaten verwendet, wo es weniger auf exakte Ergebnisse sondern auf Robustheit und Zuverlässigkeit ankommt.

6 Konzept eines Interferometers

Anhand der Erfahrungen aus den Messungen wurde ein mögliches Konzept eines ESPI-Systems für die zu erwartenden Anforderungen anhand der bereits vorhandenen Komponenten erstellt, **Bild 15**. Damit sollen 3D und OOP-Verformungen sowie In-Plane Verschiebungen mit Phasenschiebetechnik durch relativ einfachen Geräteumbau gemessen werden.

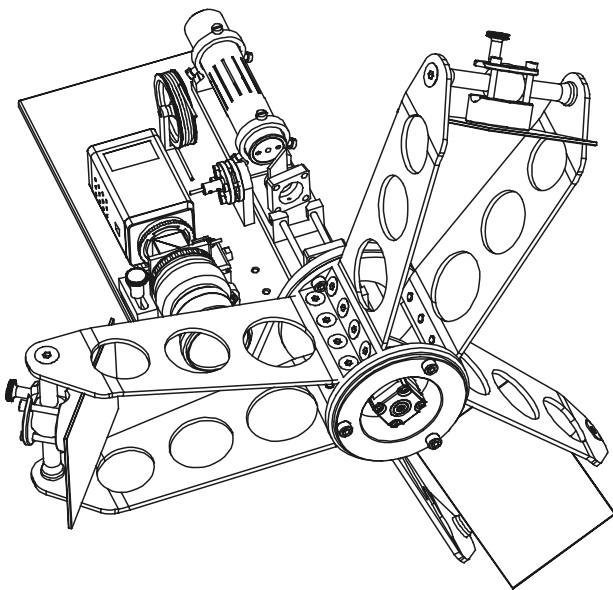


Bild 15: Konzept des Speckle-Interferometers

7 Zusammenfassung

Die Speckleinterferometrie ist ein hochempfindliches Werkzeug zur Messung von Bauteilverformungen oder Gradienten bei statischen und dynamischen Belastungsfällen. Durch die Phasenschiebetechnik wird die Auswertung vollständig automatisiert. Von Vorteil ist die hohe Empfindlichkeit und Variabilität, nachteilig die teilweise hohen Kosten für Laser und die Forderung nach rauen Oberflächen ohne Textur. Bei ESPI-Systemen ist oft auch ein schwingungsisolierter Tisch notwendig, während Shearographiesysteme aufgrund der Messung von Verformungsgradienten für den Praxiseinsatz besser geeignet sind. Bei fallendem Preis für ausreichende Laserleistung wird die relativ junge Speckleinterferometrie weiter in den Bereich der zerstörungsfreien Bauteilprüfung und Qualitätssicherung vordringen.

8 Literatur

- /1/ Jones, R.; Wykes, C.: Holographic and Speckle Interferometry, Cambridge University Press, Cambridge 1983'
- /2/ Steinchen, W.; Yang, L.X.; Schuth, M.; Kupfer, G.: Dehnungsmessung mit digitaler Shearographie, tm-Technisches Messen 62, S. 337-341, Oldenbourg-Verlag 1995
- /3/ Creath, K.: Phase-shifting speckle interferometry, Applied Optics 24, S. 3053-3058, 1985
- /4/ Hung, Y.Y.: Shearography: A new optical Method for strain measurement and Non-destructive Testing, Optical Engineering 21, S. 391-395, 1982
- /5/ Käferstein, B.: Studienarbeit, Aufbau und Entwicklung eines optischen Ganzfeldmeßverfahrens auf der Grundlage der Electronic-Speckle-Pattern Interferometry, Clausthal 1998