

Mehrwellenlängen-Verfahren zur strukturierten Beleuchtung

Multi-wavelength approach to structured illumination

Marcus Petz¹, Paul-Felix Hagen² und Rainer Tutsch¹

¹ Technische Universität Braunschweig, Institut für Produktionsmesstechnik,
Schleinitzstraße 20, 38102 Braunschweig

² Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover,
An der Universität 1, 30823 Garbsen

Zusammenfassung Auf dem Prinzip der strukturierten Beleuchtung basierende optische Messverfahren wenden häufig Phasenschiebverfahren zur optischen Ortskodierung an. Während diese Ansätze in vielen Anwendungen eine effiziente und hochpräzise Kodierung ermöglichen, stoßen sie insbesondere bei der Überlagerung verschiedener Signalanteile an ihre Grenzen. Derartige Signalüberlagerungen entstehen bei der Streifenprojektion etwa durch Mehrfachreflexionen an der Werkstückoberfläche oder bei deflektometrischen Verfahren durch die Überlagerung von Vorder- und Rückseitenreflexen an transparenten Prüflingen. Vor dem Hintergrund dieser Problematik wird im vorliegenden Beitrag ein neuartiger Ansatz auf dem Gebiet der strukturierten Beleuchtung vorgestellt, welcher – basierend auf vergleichbaren Ansätzen aus dem Bereich der absolutmessenden Interferometrie – eine räumliche Kodierung durch eine Musterfolge mit ansteigender Ortsfrequenz umsetzt. Neben den Grundlagen des Verfahrens werden erste experimentelle Ergebnisse vorgestellt, welche aufzeigen, dass das Verfahren eine hohe Genauigkeit ermöglicht und zudem die Trennung überlagerter Signale mit hoher Qualität gelingt.

Schlüsselwörter Strukturierte Beleuchtung, optische Ortskodierung, Mehrwellenlängen-Kodierung, Streifenprojektion, Deflektometrie

Abstract Optical measuring methods based on the principle of structured illumination frequently apply phase shift evaluation for optical spatial coding. While these approaches allow for efficient and high-precision coding in many applications, they reach their limits in particular when different signal components are superimposed. This kind of signal superimpositions occur in stripe projection, for example due to multiple reflections on the workpiece surface, or in deflectometric methods due to the superimposition of front and rear side reflections on transparent samples. Against the background of this problem, a new approach in the field of structured illumination is presented in this article, which – based on comparable approaches from the field of absolute measuring interferometry – implements a spatial coding by a pattern sequence with increasing spatial frequency. In addition to the basics of the method, first experimental results are presented, which show that the method enables a high level of accuracy and that the separation of superimposed signals succeeds with high quality.

Keywords Structured illumination, optical spatial coding, multi-wavelength coding, fringe projection, deflectometry

1 Einleitung

Bei optischen Messverfahren wie der auf photogrammetrischen Prinzipien basierenden Streifenprojektion oder der phasenmessenden Deflektometrie wird eine optische Ortskodierung benötigt. Im Fall der Streifenprojektion erfolgt diese durch Projektion geeigneter Muster auf die Werkstückoberfläche, im Fall der Deflektometrie wird hingegen meist ein als Referenzmusterebene dienender Monitor mit entsprechenden Mustern beaufschlagt.

Die überwiegende Zahl der dabei zur optischen Kodierung genutzten Verfahren basiert auf dem Phasenschiebeprinzip, bei welchem eine definierte Anzahl sinusförmiger Streifenmuster mit einheitlicher Ortsfrequenz aber mit um definierte Winkel verschobener Phasenlage als Mustersequenz aufgezeichnet wird [1]. Hieraus lässt sich zunächst eine 2π -periodische relative Phase als im Messbereich mehrdeutige Ortsinformation berechnen.

Zur Entfaltung der relativen Phase sind unterschiedliche Ansätze gebräuchlich, wobei die Wiederholung der Phasenschiebemessung mit in der Regel drei geringfügig unterschiedlichen Ortsfrequenzen und die Auswertung der daraus resultierenden Schwebungssignale als ein vorteilhafter Ansatz erscheint [2]. In Kombination mit dem auf diesem Anwendungsgebiet gebräuchlichsten Phasenschiebeansatz, dem symmetrischen 4-Schritt-Algorithmus, besteht eine vollständige Mustersequenz zur Kodierung entlang einer Koordinatenachse demnach aus 12 Bildern – drei unterschiedliche Ortsfrequenzen jeweils mit den Phasenlagen 0° , 90° , 180° und 270° . Dieser Kodierungsansatz wird im Folgenden als Referenz herangezogen.

Die umrissenen Phasenschiebeverfahren zeichnen sich durch eine vergleichsweise kurze Messdauer aufgrund der überschaubaren Musteranzahl, durch eine wenig rechenintensive und somit schnelle algorithmische Messdatenauswertung und nicht zuletzt durch eine hohe Auflösung und Genauigkeit der Ortskodierung aus. Eine in der praktischen Anwendung nicht unproblematische Eigenschaft dieser Verfahrensklasse besteht jedoch darin, dass sie nicht robust gegenüber der Überlagerung unterschiedlicher Signalanteile ist [3]. Werden also unterschiedliche Ortsbereiche der Muster auf dieselbe Stelle der Oberfläche beziehungsweise des Detektors abgebildet, resultiert daraus eine nicht behebbare Verfälschung der Ortsinformation.

Eine entsprechende Signalüberlagerung tritt etwa bei der Streifenprojektion auf, wenn das projizierte Licht an der Werkstückoberfläche teilweise gerichtet reflektiert wird und in der Folge auf einen anderen Bereich der Werkstückoberfläche trifft [4]. Im Fall der Deflektometrie tritt eine Signalüberlagerung insbesondere dann auf, wenn transparente Objekte wie etwa optische Linsen in Reflexion gemessen werden sollen [3]. In der Regel wird im Bild der Kamera dann eine Überlagerung von Vorder- und Rückseitenreflex beobachtet. Um dieses Problem abzumildern sind sowohl für die Streifenprojektion als auch für die Deflektometrie Ansätze beschrieben, bei welchen das Muster derart lokal maskiert wird, dass eine Signalüberlagerung soweit wie möglich vermieden wird [3, 4]. Dieses Vorgehen erhöht jedoch in jedem Fall die Messdauer signifikant, da die Messung mit einer mehr oder weniger hohen Anzahl unterschiedlich maskierter Muster wiederholt werden muss. Zudem ist die Bestimmung einer optimalen, an den jeweiligen Prüfling angepassten Maskierungssequenz zeitaufwendig und nicht

trivial.

Im vorliegenden Beitrag wird aus den genannten Gründen erstmals ein anderer, neuartiger Ansatz zur optischen Ortskodierung mittels sinusförmiger Streifenmuster vorgestellt. Dieser ist inspiriert von Mehrwellenlängen-Verfahren wie sie auf dem Gebiet der absolutmessenden Interferometrie zur Anwendung kommen, bei welchen etwa mittels einer durchstimmbaren Laserquelle eine Abstandskodierung entlang der Strahlachse durchgeführt werden kann [5]. Das Grundprinzip besteht darin, dass beim Durchstimmen mit geeigneten Wellenlängen eine linear vom Abstand zur Strahlungsquelle abhängige Oszillationsfrequenz des Interferenzsignals detektierbar ist. Dieses Grundprinzip wird im Folgenden auf die einachsige Ortskodierung mittels einer in ihrer Ortsfrequenz variierten Mustersequenz übertragen. Es werden die Grundlagen des Kodierungsverfahrens sowie der algorithmischen Auswertung vorgestellt und es werden erste experimentelle Ergebnisse präsentiert, welche aufzeigen, dass das neuartige Kodierungsverfahren eine mit dem oben beschriebenen Heterodyn-Phasenschiebverfahren vergleichbare Auflösung und Genauigkeit ermöglicht und dass ferner die Trennung überlagerter Signale mit hoher Güte gelingt.

2 Grundlagen des Mehrwellenlängen-Ansatzes

In der Interferometrie ist die Phase eines periodischen Signals in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ , der Weglänge L und dem Brechungsindex n entsprechend Gleichung 1 bestimmt [6].

$$\phi(L) = \frac{2\pi}{\lambda/2} \cdot n \cdot L \quad (1)$$

Bei einer konstanten Wellenlänge λ und konstantem Brechungsindex n ergibt sich somit nach einer Weglänge L jeweils eine charakteristische Phase ϕ . Abhängig von der Phase kann mit Gleichung 2 die Signalintensität I berechnet werden, die zudem vom Interferenzkontrast γ abhängt [6].

$$I = I_0 \cdot \left[1 + \gamma \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda/2} \cdot n \cdot L \right] \quad (2)$$

Wird nun die Wellenlänge λ variiert und dabei die Weglänge L konstant gehalten, so ergibt sich über den betrachteten Zeitraum eine Phasenänderung. Wird die Wellenlänge λ derart durchgestimmt, dass $1/\lambda$ eine lineare Änderung erfährt, so ist die resultierende Phasenänderung gemäß Gleichung 1 linear. Eine lineare Phasenänderung ist gleichbedeutend mit einer harmonischen Schwingung mit einer weglängenabhängigen Frequenz. Die Frequenz und Phasenlage der resultierenden harmonischen Schwingung können gemessen werden und sind bei geeigneter Wahl der Wellenlängen λ_i ein lineares Maß für die Weglänge L .

Wird dieses aus der Interferometrie stammende Verfahren auf räumliche Signale übertragen, so entfällt zunächst der Faktor $1/2$ im Nenner von Gleichung 1, da bei der direkten Detektion von Ortsfrequenzen anders als in der Interferometrie keine doppelte Weglänge in Form von Hin- und Rückweg berücksichtigt werden muss. Anstelle der Weglänge L wird im Weiteren die Position X entlang der Kodierungsrichtung, also die Ortskoordinate innerhalb des Musters betrachtet. Für die betrachteten räumliche Signale entfällt zudem der Brechungsindex n . Entsprechend vereinfacht sich Gleichung 1 für den hier betrachteten Fall zu Gleichung 3.

$$\phi(X) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot X \quad (3)$$

An die Stelle des Interferenzkontrasts γ in Gleichung 2 tritt die Modulation M . Damit folgt für die beobachtbare Intensität $I(X)$ nachfolgende Gleichung 4.

$$I(X) = I_0 \cdot \left[1 + M \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda} \cdot X \right] \quad (4)$$

Eine Veranschaulichung einer entsprechenden Wellenlängensequenz, anhand welcher die weitere Diskussion nachvollzogen werden kann, ist in Abbildung 1 dargestellt. Zur Visualisierung wurden als Grenzen des Wellenlängenspektrums $\lambda_{\min} = 20 \text{ px}$, $\lambda_{\max} = 36 \text{ px}$ und die Anzahl N der diskreten Wellenlängen zu $N = 32$ gewählt. Die zwischen λ_{\min} und λ_{\max} liegenden Wellenlängen λ_i sind wie oben gefordert derart abgestuft, dass sich die Ortsfrequenz $1/\lambda_i$ linear ändert. In Abbildung 1 ist die resultierende Musterabfolge im Intervall $X \in [0 \text{ px}; 800 \text{ px}]$ dargestellt. Zunächst ist festzustellen, dass für $X = 0$ alle Signale dieselbe

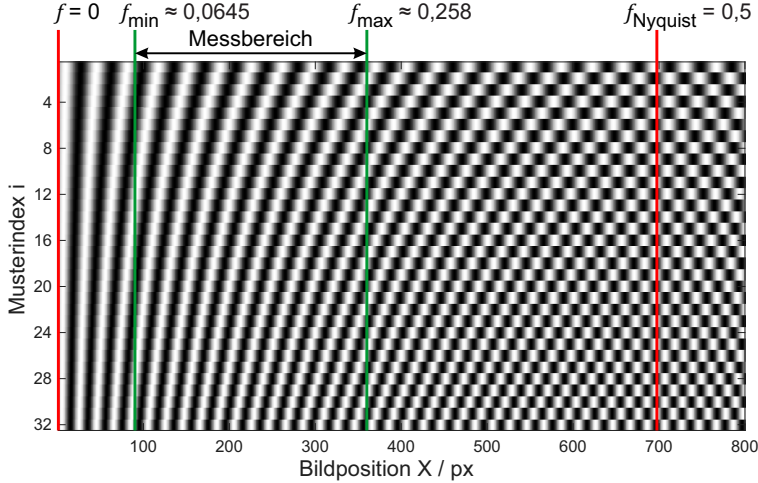


Abbildung 1: Beispielhafte Wellenlängen-Sequenz für Ortskodierung nach dem Mehrwellenlängen-Verfahren.

Anfangsphase aufweisen. Die am Ort $X = 0$ aus der Sequenz resultierende harmonische Schwingung weist daher die nicht auswertbare Frequenz $f = 0$ auf. Da sich die Frequenz mit zunehmender Koordinate X linear erhöht, wird irgendwann die korrekt erfassbare Nyquist-Frequenz f_{Nyquist} erreicht. Für die Frequenz f in Abhängigkeit der registrierten Periodenanzahl P der harmonischen Schwingung und der Anzahl N unterschiedlicher Musterwellenlängen gilt Gleichung 5.

$$f = \frac{P}{N - 1} \quad (5)$$

Für das in Abbildung 1 exemplarisch betrachtete Muster ergibt sich für den Fall der Nyquist-Frequenz $f_{\text{Nyquist}} = 0,5$ die Anzahl der zwischen erstem und letztem Sample registrierten Perioden P durch Umstellen von Gleichung 5 somit zu $P = 0,5 \cdot 31 = 15,5$. Für die Phasendifferenz $\Delta\phi$ zwischen $\phi_{\lambda_{\min}}$ und $\phi_{\lambda_{\max}}$ gilt ausgehend von Gleichung 3 ferner allgemein nachfolgende Gleichung 6.

$$\Delta\phi = \phi_{\lambda_{\min}} - \phi_{\lambda_{\max}} = \left(\frac{2\pi}{\lambda_{\min}} - \frac{2\pi}{\lambda_{\max}} \right) \cdot X \quad (6)$$

Mit der für die Nyquistfrequenz hier geltenden Bedingung $\Delta\phi = 15,5 \cdot 2\pi$ kann der Ort X , an welchem die Nyquistfrequenz für obige Musterabfolge erreicht wird daher, wie in Abbildung 1 eingetragen, zu $X = 697,5 \text{ px}$ ermittelt werden. Jenseits dieser Koordinate fallen die Frequenzen wieder linear ab, während die Phasenlage um 180° gedreht ist. Innerhalb des theoretischen Frequenzbereichs von $f = 0$ bis $f = 0,5$ sind sinnvollerweise weitere Anforderungen an die aufgezeichneten Schwingungssignale zu stellen, welche den nutzbaren Ortsbereich weiter einschränken. So ist es im Interesse einer möglichst zuverlässigen Frequenz- und Phasenmessung etwa sinnvoll, eine Mindestanzahl aufgezeichneter Perioden P zu fordern. Mit der Forderung $P_{\min} = 2$ ergibt sich für die betrachtete Sequenz eine Koordinate von $X_{\min} = 90 \text{ px}$. Um am anderen Ende des Messbereichs einen ausreichenden Abstand von der Nyquistfrequenz einzuhalten, ist zudem die Forderung einer Mindestanzahl an Samples pro Signalperiode zweckmäßig. Mit S als der Anzahl der Samples pro Signalperiode kann Gleichung 5 zu Gleichung 7 umgeschrieben werden.

$$f = \frac{P}{(N - 1) \cdot S} \quad (7)$$

Mit der zweckmäßigen Forderung $S_{\min} = 4$ ergibt sich somit $P_{\max} = 8$ und in der Folge $X_{\max} = 360 \text{ px}$. Im vorliegenden Fall ergäbe sich demnach ein effektiv nutzbarer Messbereich vom $\Delta X = X_{\max} - X_{\min} = 270 \text{ px}$. Die hier zur Veranschaulichung genutzten Parameter sind folglich für den praktischen Einsatz des Verfahrens nicht zweckmäßig gewählt. Mit den für die im Weiteren vorgestellten experimentellen Untersuchungen gewählten Parametern $\lambda_{\min} = 20 \text{ px}$, $\lambda_{\max} = 21 \text{ px}$, $N = 48$, $P_{\min} = 2$ und $S_{\min} = 4$ entsteht hingegen ein nutzbarer Kodierungsbereich von $\Delta X = X_{\max} - X_{\min} = 5040 \text{ px} - 840 \text{ px} = 4200 \text{ px}$. Hiermit kann folglich selbst ein 4K Monitor eindeutig ortskodiert werden oder alternativ können, wie in Abschnitt 4.1 gezeigt, zwei Full HD Monitore mit nicht-überlappenden Frequenzbereichen kodiert werden.

3 Datenauswertung

Die rechnerische Auswertung der aufgenommen Bildsequenzen besteht im Wesentlichen aus der Bestimmung von Frequenz und Phase

der für jeden Bildpunkt aufgezeichneten harmonischen Schwingung. Im Folgenden werden zwei bereits experimentell näher untersuchte Fälle unterschieden, nämlich erstens die Messung ohne Überlagerung verschiedener Ortsinformationen, für welche die Bestimmung der Parameter nur einer harmonischen Schwingung erforderlich ist, sowie zweitens der Fall der Überlagerung zweier Ortsinformationen, für welchen die Parameter zweier unterschiedlicher harmonischer Schwingungen ermittelt werden müssen.

3.1 Auswertung einer Frequenz

Für jeden Messpunkt werden aus der Aufzeichnung der Bildsequenz N diskrete Intensitätswerte y_i gewonnen, welche in ihrer zeitlichen Abfolge eine harmonische Schwingung repräsentieren. Als Maß für die interessierende Ortskoordinate X dient, aufgrund des gegenüber der Frequenz besseren Signal-Rausch-Verhältnisses, der Phasenwinkel des Signals, wobei jedoch auch die Frequenz benötigt wird, um die Entfaltung der periodischen relativen Phase vornehmen zu können. Aufgrund der eher geringen Anzahl an Stützstellen N zeigt sich, dass eine zur Lösung des Problems naheliegende Fouriertransformation eine nur sehr geringe und letztlich trotz Interpolation nicht ausreichende Frequenzauflösung bietet. Es ist daher erforderlich, eine Sinusfunktion iterativ an die Messdaten anzupassen. Hierfür werden jedoch, um ein gutes Konvergenzverhalten zu erzielen, hinreichend gute Startwerte für die freien Parameter der Zielfunktion benötigt. Diese lassen sich mittels einer Fouriertransformation mit ausreichender Güte bestimmen, so dass der Auswerteprozess im Wesentlichen aus der Abfolge einer Fouriertransformation und eines iterativen Sinusfits besteht.

Offenkundig ist damit der Rechenaufwand für das vorgestellte Mehrwellenlängen-Verfahren signifikant höher als jener für das etablierte Phasenschiebeverfahren. In einer ersten Implementierung wurde das oben umrissene Auswerteverfahren in den beiden wesentlichen Teilen, der Fast Fourier Transformation (FFT) sowie des Sinusfits, in einer C++ Dynamic Link Library realisiert, wobei von der Möglichkeit der Parallelisierung von Teilaufgaben gebraucht gemacht wurde. Die bislang erzielten Auswertedauern liegen exemplarisch auf einem Prozessor vom Typ AMD Ryzen™ 7 5800H bei rund 5 Sekunden pro eine Million Messpunkte. Damit liegt die Auswertedauer bereits in

dieser frühen Erprobungsphase in einer durchaus praxistauglichen Größenordnung. Eine nochmals deutliche Reduzierung der Auswertedauer wäre mit überschaubarem Aufwand durch Nutzung von GPU Computing insbesondere für die FFT erreichbar.

3.2 Auswertung zweier Frequenzen

Sofern an einem Ort der Bildsequenz zwei Ortsinformation zur Überlagerung kommen, sind statt der Parameter für nur eine harmonische Schwingung die Parameter zweier harmonischer Schwingungen zu berechnen. Unter günstigen Randbedingungen – das heißt insbesondere sofern die überlagerten Frequenzen hinreichend weit voneinander entfernt liegen und eine ähnlich hohe Modulation aufweisen – ist es möglich, den zuvor beschriebenen Auswerteablauf im Grundsatz beizubehalten. In diesem Fall werden aus dem FFT-Spektrum die beiden lokalen Maxima mit den größten Amplituden extrahiert und direkt als Startwerte für das Optimierungsproblem genutzt. Es werden im Rahmen der Optimierung nach Gauß-Newton für jede der beiden Schwingungen eine individuelle Modulation, Frequenz und Phase angesetzt, während der Offset nur summarisch für beide Schwingungen berechenbar ist.

Die Erfahrungen verschiedener Testmessungen zeigen, dass für anspruchsvollere Szenarien – also insbesondere geringer Frequenzabstand und/oder deutlich unterschiedliche Modulation beider Signale – die Wahrscheinlichkeit für ein Scheitern dieses direkten Ansatzes deutlich zunimmt. Zum einen werden dann mit zunehmender Häufigkeit zu stark abweichende Startwerte aus der FFT ermittelt, zum anderen zeigt das Gauß-Newton-Verfahren zunehmend problematisches Konvergenzverhalten. Das Zusammenwirken von FFT und Sinusfit kann jedoch im Grundsatz beibehalten werden, nur dass dieses vorteilhafterweise in mehrere Teilschritte untergliedert wird und als finaler Optimierungsschritt ein Downhill-Simplex-Verfahren eingesetzt wird.

4 Messergebnisse

Die bislang nach dem vorgestellten Ansatz durchgeführten Messungen verfolgen im Wesentlichen zwei Ziele. Erstens soll untersucht werden,

ob das Verfahren grundsätzlich eine vergleichbar hohe Kodierungsgüte wie die etablierten Phasenschiebverfahren ermöglicht. Zweitens soll überprüft werden, ob eine Trennung zunächst zweier überlagerter Ortsinformationen – wie sie typischerweise bei der deflektometrischen Linsenmessung auftritt – mit grundsätzlich vergleichbarer Qualität wie bei einer Messung ohne Überlagerung möglich ist.

4.1 Messung ohne Signalüberlagerung

Der Messaufbau des Szenarios ohne Signalüberlagerung besteht aus einer elektronischen Kamera vom Typ IDS UI5240SE-M mit einem Objektiv FUJINON HF9HA-1B, welche direkt die vollständige Bildschirmfläche eines Samsung PLS-Monitors vom Typ S24E650 mit einer Auflösung von 1920×1200 px beobachtet. Als Referenzkodierungsansatz wird die heterodyne Phasenschiebetechnik nach [2] mit Wellenlängen von $\lambda_1 = 20$ px, $\lambda_2 = 21,5$ px und $\lambda_3 = 23$ px verwendet. Für den Mehrwellenlängen-Ansatz wurde der Parametersatz $\lambda_{\min} = 20$ px, $\lambda_{\max} = 21$ px, $N = 48$ und $P_{\min} = 5$ gewählt. Die vollständige Phasenschiebungssequenz besteht somit aus insgesamt 12 Bildern, während die Mehrwellenlängensequenz aus 48 Bildern besteht. In beiden Fällen wird jedes Bild durch Addition von vier 12-Bit-Bildern der Kamera erhalten, wodurch Sätze synthetischer 14-Bit-Bilder erzeugt werden.

Als Maß für die Genauigkeit wird der erhaltene relative Positionsfehler verwendet. Dieser sei hier definiert als das Verhältnis von Phasenabweichungen $\Delta\Phi$ und der Spanne der Phasenwerten $\Phi_{\max} - \Phi_{\min}$ in jeder Messung. Da die realen Messungen nicht nur hochfrequente, rauschartige Abweichungen enthalten, sondern auch niederfrequente Abweichungen, die sich aus der Aufbaugeometrie und optischen Verzerrungen ergeben, wird der relevante hochfrequente Anteil durch Hochpassfilterung der Phasendaten bestimmt. Beide Messungen liefern ca. 654.000 Messpunkte und einen in sehr guter Näherung normalverteilten relativen Positionsfehler. Dabei beträgt die Standardabweichung für den Mehrwellenlängen-Ansatz ca. $7,79 \cdot 10^{-6}$, während das Phasenschiebverfahren einen Wert von ca. $8,54 \cdot 10^{-6}$ liefert. Allerdings sollte hierbei beachtet werden, dass die Anzahl der Bilder beim Mehrwellenlängen-Ansatz um den Faktor 4 größer ist. Dennoch lässt sich festhalten, dass das Mehrwellenlängen-Verfahren trotz des etwas höheren Messaufwand eine gegenüber etablierten Phasenschiebver-

fahren konkurrenzfähige Ortskodierung ermöglicht.

4.2 Messung mit Signalüberlagerung

Für die Untersuchungen zur Trennbarkeit zweier überlagelter Signalanteile wurde ein Aufbau aus zwei unter einem Winkel von 90° zueinander angeordneten Monitoren vom oben genannten Typ in Verbindung mit einer Kamera vom Typ IDS UI3070CP-M und einem Objektiv FUJINON HF16HA-1B eingesetzt. Unmittelbar vor dem Objektiv ist ein Strahlteilerwürfel derart positioniert, dass die Kamera eine Überlagerung der beiden Displays beobachtet, sobald beide aktiviert sind. Anhand dieses Aufbaus wurden zwei Szenarien untersucht. Zum ersten der Fall, dass die beiden Monitore mit einer Mustersequenz beaufschlagt werden, welche zu einem nicht-überlappenden Frequenzbereich beider Monitore führt. Zum zweiten das anspruchsvollere Szenario, dass beide Monitore mittels desselben Frequenzbandes kodiert werden.

Der für das erste Szenario verwendete Parametersatz lautet wie zuvor $\lambda_{\min} = 20 \text{ px}$, $\lambda_{\max} = 21 \text{ px}$, $N = 48$. Mit $P_{\min,1} = 2,4$ für den in Transmission durch den Strahlteiler beobachteten Monitor 1 und $P_{\min,2} = 7,4$ für den gespiegelt beobachteten Monitor 2 liefert das Muster zwei nicht überlappende Frequenzbereiche, wovon der erste bei $X_{\min,1} = 1176 \text{ px}$ und der zweite bei $X_{\min,2} = 3108 \text{ px}$ beginnt.

Um die Güte der Signaltrennung zu bewerten, wurden zusätzlich Messungen mit jeweils nur einem aktivierten Monitor durchgeführt, so dass Referenzdaten ohne Signalüberlagerung zur Verfügung stehen. Die Differenzen zwischen den rechnerisch separierten Phasendaten aus der Messung mit Überlagerung sowie den jeweils korrespondierenden Einzelmessungen zeigen eine hervorragende Übereinstimmung der Phaseninformation. Der relative Phasenfehler, zu verstehen als $\Delta\Phi_{\text{rel}} = \Delta\Phi/2\pi$, weist für Monitor 1 eine Standardabweichung von $\sigma_{\Delta\Phi_{\text{rel},1}} \approx 1/1107$ und für den deutlich dunkler erscheinenden Monitor 2 von $\sigma_{\Delta\Phi_{\text{rel},2}} \approx 1/460$ auf. Diese Werte stimmen ungefähr mit jenen überein, die ausgehend vom Grundrauschen des Verfahrens auch bei Subtraktion zweier Einzelmessungen ohne Signalüberlagerung zu erwarten wären.

Werden beide Monitore mit demselben Frequenzbereich kodiert, so gelingt die Trennung der überlagerten Signalanteile im größten Teil

des Bildfeldes vergleichbar gut, wie zuvor beschrieben, da wegen des Strahlteilers Monitor 2 gegenüber Monitor 1 horizontal gespiegelt erscheint. Lediglich in einem schmalen Bereich, in welchem die Frequenzen beider Signalanteile sehr dicht beisammen liegen, ermöglicht das derzeitige Berechnungsverfahren keine erfolgreiche Signaltrennung. Der im beschriebenen Messaufbau für eine erfolgreiche Signaltrennung derzeit erforderliche Signalversatz entspricht etwa 100 Pixel in der Monitorebene. Es ist davon auszugehen, dass eine Optimierung des Berechnungsverfahrens eine weitere Steigerung der Trennschärfe ermöglicht.

5 Zusammenfassung

Das vorgestellte Mehrwellenlängen-Verfahren stellt einen neuartigen Ansatz zur strukturierten Beleuchtung dar, welcher bei Messverfahren wie der Streifenprojektion und der Deflektometrie eingesetzt werden kann. Das Hauptmerkmal des Ansatzes besteht darin, dass er im Gegensatz zu den etablierten Phasenschiebetechniken mit der Überlagerung mehrerer Ortsinformationen umgehen kann. Neben den Grundlagen des Ansatzes werden Datenauswertungsverfahren für einzelne und doppelte Ortsinformationen pro Bildpunkt aufgezeigt. Für beide Fälle liegen experimentelle Daten vor, die das Potenzial des Ansatzes aufzeigen. Es lässt sich festhalten, dass der Mehrwellenlängen-Ansatz eine optische Ortskodierung mit Unsicherheiten ermöglicht, welche vergleichbar mit jener etablierter Phasenschiebetechniken sind. Für den Fall der Signalüberlagerung zeigt das gegebene Beispiel, dass zwei überlagerte Datensätze effektiv und korrekt getrennt werden können, sofern die zu trennenden Ortsinformationen nicht zu ähnlich sind. Somit zeigt der Mehrwellenlängenansatz ein hohes Potenzial für spezielle Anwendungen im Bereich der Streifenprojektion und Deflektometrie, die mit den etablierten Phasenschiebetechniken nicht bewältigt werden können.

Literatur

1. C. Zuo, S. Feng, L. Huang, T. Tao, W. Yin, and Q. Chen, "Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review," *Optics and Lasers in*

- Engineering*, vol. 109, pp. 23–59, 2018.
2. M. Petz, H. Dierke, and R. Tutsch, “Wellenlängenoptimierung bei Heterodyn-Phasenschiebverfahren,” *tm - Technisches Messen*, vol. 87, no. 10, pp. 599–613, 2020.
 3. C. Faber, *New Methods and Advances in Deflectometry*, ser. Progress in Modern Optics, S. Malzer, G. Leuchs, P. S. J. Russell, and V. Sandoghdar, Eds. Erlangen Scientific Press, Univ. Erlangen-Nürnberg, 2012.
 4. P. Kayser, “Verfahren und Vorrichtung zum dreidimensionalen optischen Vermessen von Objekten mit einem topometrischen Messverfahren sowie Computerprogramm hierzu,” Deutsches Patentamt München, 2013.
 5. H. Kikuta, K. Iwata, and R. Nagata, “Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light,” *Appl. Opt.*, vol. 25, no. 17, pp. 2976–2980, Sep 1986.
 6. F. Pollinger, K. Meiners-Hagen, and A. Abou-Zeid, “Absolutlängen mittels Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometrie,” *PTB-Mitteilungen*, vol. 120, no. 2, pp. 105–109, 2010.