

„Nutzung von Farbkameras für die 3D-Oberflächenmessung mittels Weißlichtinterferometrie“

T. Machleidt^{1,4}, D. Kollhoff¹, O. Dathe², D. Kapusi³, R. Nestler^{3,4}, K.-H. Franke^{3,4}

¹)Gesellschaft für Bild- und Signalverarbeitung mbH, Ilmenau

²)ProMicron, Kirchheim/Neckar

³)Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V., Ilmenau

⁴)TU-Ilmenau, Graphische Datenverarbeitung, Ilmenau

eMail: info@gbs-ilmenau.de

URL: <http://www.gbs-ilmenau.de>

Tel.-Nr.: 03677-623618

Zusammenfassung

Die Weißlichtinterferometrie hat sich auf dem Gebiet der optischen 3D-Oberflächenmesstechnik aufgrund der hohen erreichbaren Präzision bei hoher Messgeschwindigkeit und großem lateralen Messfeld etabliert und zählt mittlerweile zu den bevorzugten berührungslosen Messverfahren im Mikro-/Nanometerbereich. Die GBS mbH beschäftigt sich seit den letzten Jahren sehr intensiv mit der Weißlichtinterferometrie und entwickelte eine Produktreihe für optische Messgeräte, die unter dem Namen smartWLI vertrieben wird [1]. Die smartWLI-Produktreihe beinhaltet auch ein Nachrüstkit für Mikroskope. Häufig sind jedoch die Mikroskope bereits mit einer Farbkamera ausgestattet, was dem klassischen Ansatz zur Auswertung von Weißlichtinterferogrammen widerspricht, der auf den reinen Kontrastinformationen, die von einer Grauwertkamera aufgezeichnet werden, basiert.

Aus Kostengründen und um das bisherige Applikationsfeld des Mikroskops (z. B. Inspektionsaufgaben) nicht zu beeinträchtigen ist eine nachträgliche Umrüstung auf eine Grauwertkamera in der Regel nicht erwünscht.

Dieser Artikel beleuchtet die Zusammenhänge, die sich aus der schmalbandigen Filtercharakteristik von Bayer-Farbkameras ergeben, die zu Verbreiterung des Korrelogramms und zur Verschiebung dessen Mittenwellenlänge führt. Es werden zudem unterschiedliche Ansätze für eine geeignete Verarbeitung der Farbkameradaten entwickelt und untersucht. Zusammenfassend werden die verschiedenen Verfahren bewertet.

1 Grundlagen der Weißlichtinterferometrie

Die Interferometrie nutzt die Tatsache aus, dass sich zeitlich und räumlich kohärente Lichtwellen überlagern können. Praktisch werden z.B. Michelson-, Mirau oder Linnik-Anordnungen zur Weißlichtinterferometrie verwendet. Abbildung 1 zeigt den Messaufbau für ein Michelson-Interferometer. In der Regel wird Licht von einer Quelle mit der mittleren Wellenlänge λ zu einem Strahlteiler geführt und in zwei Wege aufgespalten. Ein Strahl trifft auf den Referenzspiegel, der andere auf das zu untersuchende Objekt. Die beiden Lichtstrahlen werden jeweils reflektiert und treffen sich auf dem Weg zur Kamera. Dabei interferiert das Licht, wenn die Laufzeitdifferenz der unterschiedlichen Wege kleiner als die Kohärenzlänge¹ der Lichtquelle (für Weißlicht wenige Mikrometer) ist. Bei gleicher Weglänge zwischen Objektarm und Referenzarm gibt es keine Laufzeitdifferenz und damit maximalen Interferenzkontrast.

¹ Die Kohärenzlänge ist der maximale Weglängenunterschied zweier überlagerter Lichtstrahlen aus derselben Quelle, bei dem noch ein deutliches Interferenzmuster entsteht.

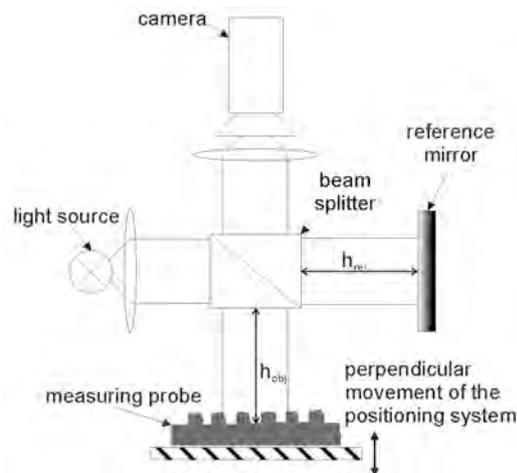


Abbildung 1: Setup zur Weißlichtinterferometrie [2]

Der Interferenzkontrast verringert sich mit größer werdender Wegdifferenz. Schiebt man das Objekt mit einer Schrittweite dz durch die Referenzebene und zeichnet dabei jeweils ein Interferenzbild auf, bekommt man einen Bildstapel, aus dem sich für jeden Pixel der Intensitätsverlauf ablesen lässt. Dieser Verlauf heißt Korrelogramm (Abbildung 2).

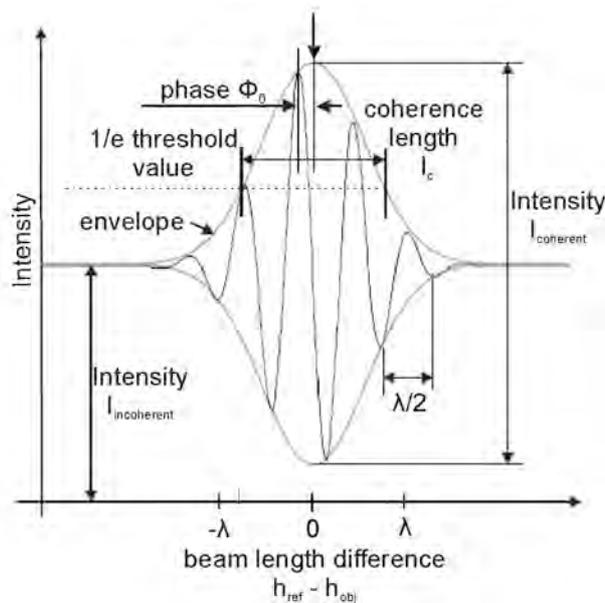


Abbildung 2: Typisches Korrelogramm für ein Pixel [3]

Allgemein wird das Signal eines Korrelogramms vereinfacht als eine auf ein Trägersignal aufmodulierte Hüllfunktion beschrieben:

$$K(z) = H(z) \cdot \cos(\varphi(z) + \varphi_0)$$

$K(z)$ ist dabei die gemessene Intensität an der Stelle z . Die Hüllfunktion $H(z)$ ist durch das Spektrum der Lichtquelle bestimmt (Fouriertransformierte des Spektrums). In der Regel kann von einer Gaußverteilung ausgegangen werden.

2 Weißlichtinterferometrie mit Farbkameras

Sensorseitig gibt es verschiedene Varianten der Realisierung von Farbkamerasystemen. Im Bereich der Weißlichtinterferometrie kommen die folgenden Systeme in Frage:

1. Herkömmliche Flächensensoren mit Mikrofarbfilttern
2. 3-Chip Kameras mit dichroitischen Spiegeln
3. Foveon X3 Sensoren

Da Mikroskope vorrangig mit der ersten Variante ausgerüstet sind, wurde diese detailliert bzgl. des Einsatzes für die Weißlichtinterferometrie untersucht [4].

Ein typisches Schema der Bayer-RGB-Filtermaske auf einer Sensormatrix eines Bayer-Sensors ist in Abbildung 3a dargestellt. Dabei wechseln sich rote, grüne und blaue Transmissionsfilter in einem festen Muster innerhalb der 2x2-Anordnung ab. Abbildung 3b zeigt die relativen spektralen Empfindlichkeiten solcher Filter am Beispiel der eingesetzten Kamera. Der Grund für das doppelte Auftreten des grünen Pixeltyps liegt darin, dass für die Wellenlängenbereiche um 555nm das menschliche Auge eine besonders ausgeprägte Helligkeitswahrnehmung besitzt. Ein solcher Sensor besitzt genau so viele Pixel wie eine entsprechende Monochromvariante.

Um für jedes Pixel einen RGB Farbwert zu berechnen, wird in jedem Kanal eine Interpolationsoperation durchgeführt, welche meist mit Debayering bezeichnet wird. Damit ergeben sich R-,G-,B-Werte für jedes vorhandene Pixel. Typischerweise wird noch eine Matrizierung durchgeführt um den Eigenheiten der menschlichen Farbwahrnehmung zu entsprechen.

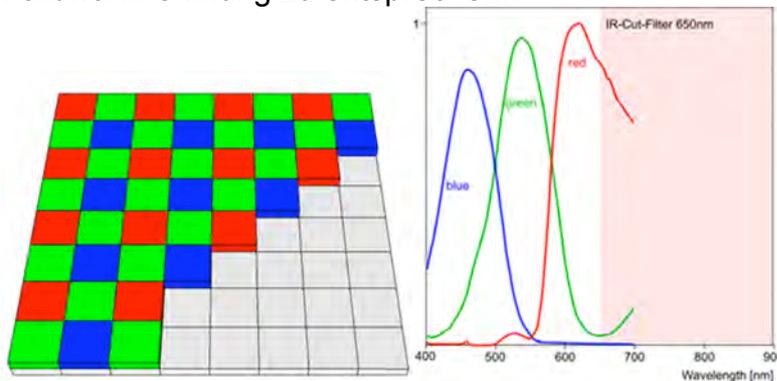


Abbildung 3: a) Schema der Bayer-RGB-Filtermaske auf Sensormatrix, b) Relative spektrale Empfindlichkeiten der Maske am Beispiel eines Sony ICX274AK Sensors [5].

Für die Auswertung im Rahmen der Weißlichtinterferometrie wird der Sensor so ausgelesen, als würde es sich um einen Grauwertsensor handeln (RAW-Bayerformat). Bezüglich der Weißlichtinterferometrie-Auswertung werden lediglich die Teilpixel des Farbmakropixels entsprechend ihrer Filtermasken getrennt voneinander behandelt. Die theoretische Grundlage für die Einsetzbarkeit von Farbkameras mit Weißlichtinterferometrie liefert die Linearität von Licht und spektralen Filtern. Es kann festgestellt werden, dass sich (ungeachtet der Filter im Strahlengang und des Sensors) für eine übliche Halogenlampe bei $T \sim 3200\text{K}$ nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz eine Mittenwellenlänge von 950nm ergeben sollte. Zur Entstehung der vom System aufgezeichneten Korrelogramme ist jedoch noch die Betrachtung weiterer Einflüsse auf das bei der Signalaufzeichnung wirksam werdende Wellenlängenspektrum notwendig. Dazu zählen:

- Verschiedene Transmissionsfilter der Bayeranordnung
- IR-Sperrfilter
- Relative spektrale Empfindlichkeit des eigentlichen Sensors
- Spektrale Remission der Objekt Oberfläche
- Spektrale Remission bzw. Transmission der Bauteile des Interferenzobjektivs

All diese Effekte (sowie ggf. weitere Elemente im System mit einem spektralfilternden Charakter) wirken direkt auf das Wellenlängenspektrum, welches schließlich zu den

aufgezeichneten Korrelogrammen führt. Dementsprechend kann man von einem effektiven oder wirksamen Spektrum sprechen.

Zur Verarbeitung der Daten des Farbsensorsystems wurden drei Ansätze erarbeitet und näher untersucht.

3 Getrennte Verarbeitung der R,G,B-Pixel des Bayermusters

Wie bereits erläutert, werden die Daten des Bayerensors ohne Debayering und Matrizierung ausgelesen - praktisch so, als würde es sich um einen Grauwertsensor handeln. Abbildung 4 zeigt auf diese Weise entstandene Korrelogramme. In Tabelle 1 sind die zugehörigen Parameter Mittenwellenlänge, Kohärenzlänge und spektrale Halbwertsbreite angegeben.

Tabelle 1: Gemessene Parameter λ , l_c und $\Delta\lambda$ der Korrelogramme aus Rot-, Grün- und Blaupixeln eines Weißlichtinterferometers mit Farbkamera

Farbkanal	λ	l_c	$\Delta\lambda$
Rot	610,6 nm	2,914 μm	128 nm
Grün	550,8 nm	2,035 μm	149 nm
Blau	497,3 nm	1,918 μm	129 nm

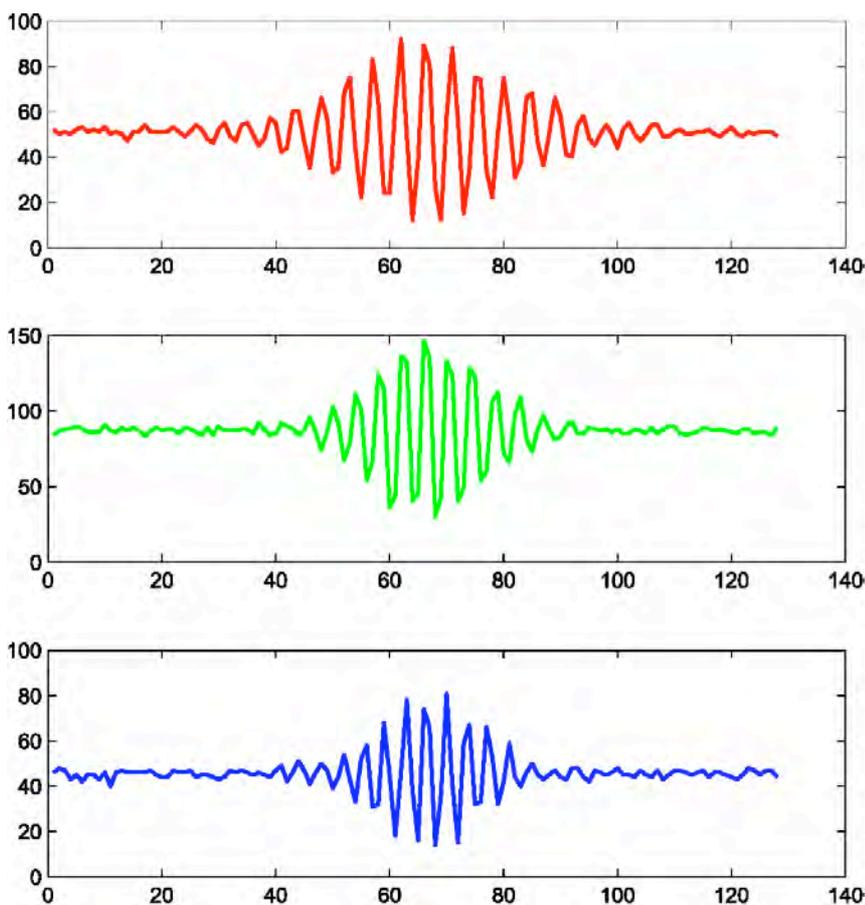


Abbildung 4: Korrelogramme von Rot-, Grün- und Blaupixeln eines Bayerensors.

Aufgrund der verschiedenen Parameter in Tabelle 1 bietet sich die getrennte Verarbeitung von verschiedenen Korrelogrammen aus Rot-, Grün- und Blaupixeln an. Diese Vorgehensweise stützt sich auf die Grundannahme für den Fall von

gaußverteilten Wellenlängenspektren. Geht man von symmetrischen bzw. gaußverteilten Wellenlängenspektren aus, dann ist der Ort der maximalen Modulation eines Korrelogramms (Maximum der Einhüllenden) unabhängig von Mittenwellenlänge und Kohärenzlänge bzw. spektraler Breite. Das bedeutet also, dass diese maximale Modulation lediglich bei einem Gangunterschied von Null bei der Signalaufnahme erreicht wird. Dementsprechend sollte eine ermittelte Topographie aus benachbarten Rot-, Grün- und Blaupixeln in einer flachen Region gewissermaßen bündig aneinanderliegen. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass die Ergebnisdaten nicht dieser Vorhersage entsprechen. In Abbildung 5 sind die getrennten Histogramme von Ergebnishöhendaten aus unterschiedlichen Farbkanälen dargestellt.

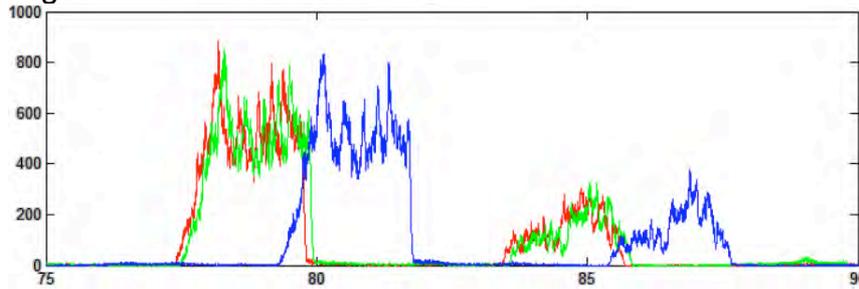


Abbildung 5: Histogramme von Ergebnishöhendaten nach getrennter Auswertung bzgl. Farbkanal. Zu erkennen ist ein statischer Offset zwischen Paaren von Kanälen.

In den Histogrammen ist klar erkennbar, dass es hierbei einen statischen Offset zwischen den Kanälen gibt. Die Gründe hierfür liegen vermutlich zum einen in den unterschiedlichen Bezugsphasenlagen bei der Phasenauswertung, die bei optisch glatten Oberflächen eingesetzt werden kann. Zum anderen sind die effektiven Wellenlängenspektren, die über die Fouriertransformation zur Hüllkurve der Korrelogramme führen, nicht zwangsläufig gleich symmetrisch (siehe Bayerfilterkurven in Abbildung 4). Dies führt in Zusammenhang mit einem Matchedfilter[6], der mittels Kreuzkorrelation nach der Lage eines idealisierten Korrelogramms mit symmetrischer gaußförmiger Einhüllenden sucht, zu einer Schwerpunktverlagerung des Korrelationsmaximums in Abhängigkeit von der Assymetrie der jeweiligen Bayerfilterkurven. In der Praxis kann der Offset der drei getrennt ausgewerteten Topographien bestimmt und korrigiert werden.

4 Spektrale Rekonstruktion

Die spektrale Rekonstruktion aus benachbarten Rot-, Grün- und Blaukorrelogrammen ist so durchzuführen, dass die spektrale Transmissionswirkung der verschiedenen Farbfilter weitgehend rückgängig gemacht wird. Ziel ist es also, auf ein Korrelogramm zurückzuschließen, wie es sich ergeben hätte, wenn keine Rot-, Grün-, Blau- und IR-Filter zum Einsatz gekommen wären. Der Vorteil eines solchen rekonstruierten Korrelogramms läge in einem verbesserten Fittingverhalten des Matchedfilters, da schmalere Korrelogramme durch die kürzere Kohärenzlänge entstünden. Eine solche Operation ließe sich sinngemäß formulieren:

$$I'(x + \frac{1}{2}, y + \frac{1}{2}) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ f_{IR}(k) \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \alpha_{i,j} \mathcal{F} \{ I(x+i, y+j) \} f_{Bayer}(x+i, y+j, k) \right\}$$

Dabei werden Korrelogramme erzeugt, die sich aus einem Rot-, zwei Grün- und einem Blaupixel einer Vierergruppe des Bayerpatterns zusammensetzen. $f_{Bayer}(x+i; y+j; k)$ bezeichnet dabei in der Ortsfrequenzdarstellung die inversen Gewichtungsfaktoren mit denen der Effekt der Bayerfilterkurven des jeweiligen Pixeltyps der Stelle $x+i; y+j$ (R,G oder B) aufgehoben werden sollen. Analog dazu steht $f_{IR}(k)$ für die inversen

Gewichtungsfaktoren mit denen der Effekt des IR-Sperrfilters aufgehoben wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Filterkurven sich überschneiden und dass es für jeden Filter Wertebereiche in k gibt, in denen die korrespondierenden Filterkurven gegen Null streben und somit eine inverse Gewichtung zu Störungen aufgrund des schlechten Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) führen würden. Ansätze, um mit solchen Phänomenen umzugehen, finden sich im Bereich der Wienerfilterung [7]. Weiterhin befindet sich in der Formel ein Faktor $\alpha_{i,j}$, der eine ausgleichende Wirkung bei der Gewichtung einnehmen soll. Dieser begründet sich durch ggf. unterschiedlich Aussteuerung der Korrelogramme im verfügbaren Wertebereich. Wichtig ist die Gestaltung des Übergangsverhaltens zwischen den verschiedenen f_{Bayer} bzw. der Wahl von $\alpha_{i,j}$, um Unstetigkeiten im sich ergebenden rekonstruierten Spektrum zu vermeiden.

5 Additionsansatz

Ziel des Additionsansatzes ist es, eine aufwendige Spektralrekonstruktion zu vermeiden und dennoch eine schmalere Korrelogrammform und damit steilere Einhüllendenfunktion zu erreichen. Hierzu werden die Korrelogramme eines jeweiligen Viererblocks im Bayerpattern lediglich addiert bzw. gemittelt.

$$I''(x + \frac{1}{2}, y + \frac{1}{2}) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \alpha_{i,j} I(x + i, y + j)$$

$\alpha_{i,j}$ ist dabei lediglich zum Ausgleich von unterschiedlicher Aussteuerung der Korrelogramme im Wertebereich vorhanden. Grundlage für die genannte Vorgehensweise stellt eine Betrachtung zur Linearität des Systems aus Licht, Remission, Transmission und Interferenz dar. In Abbildung 6 ist ein Szenario dargestellt, bei dem das WLI-System mit Farbsensoren mit einem variierten Aufbau verglichen wird. Bei diesem hypothetischen Aufbau werden die Bayerfilter $\tau_R(\lambda)$; $\tau_G(\lambda)$; $\tau_B(\lambda)$ des Farbsensors entfernt und die Beleuchtung $E(\lambda)$ durch drei mittels $\tau_R(\lambda)$; $\tau_G(\lambda)$; $\tau_B(\lambda)$ spektral gefilterter Beleuchtungen $E(\lambda)/3$ ersetzt. Wird bei beiden Anordnungen eine laterale Filterung (etwa Mittelung benachbarter Pixel) durchgeführt, so ergibt sich das gleiche Ergebnis, $I_1 = I_2$.

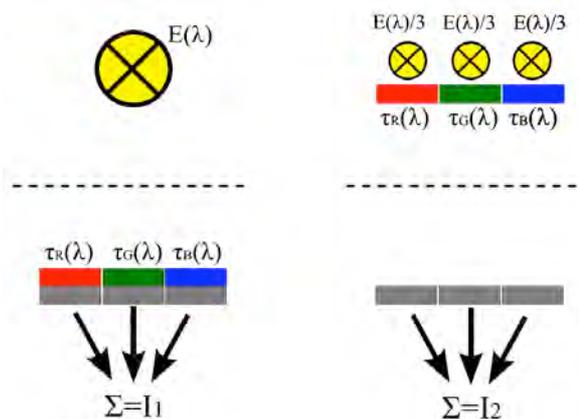


Abbildung 6: Zur Erläuterung des linearen Zusammenhangs von Beleuchtung und Filterung für den Additionsansatz. Ausgeblendet sind die übrigen Komponenten der Interferometeranordnung.

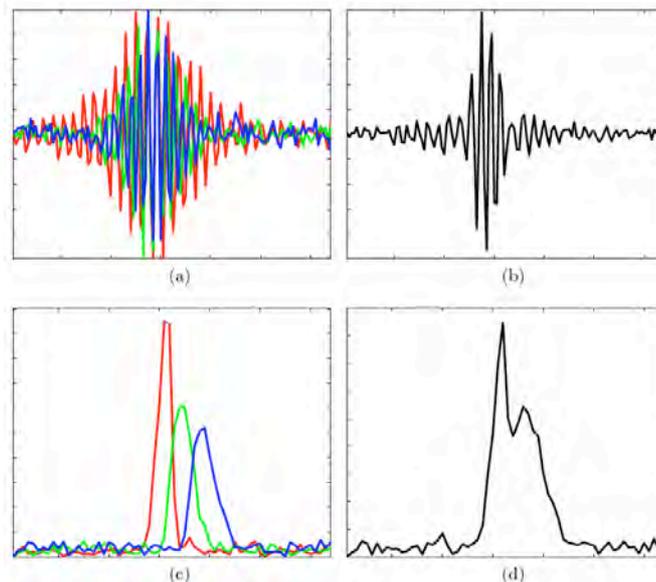


Abbildung 7: (a) Überlagerung von R-,G-,B-Korrelogrammen (b) Addition der R-,G-,B Korrelogramme (c) Betrag der Fourier-Spektren der R-,G-,B-Korrelogramme (d) Betrag des Fourier-Spektrums der addierten R-,G-,B-Korrelogramme.

Das Beispiel soll veranschaulichen, dass das Vorgehen des beschriebenen Additionsansatz dem einer nur leicht variierten Weißlichtinterferometrie gleicht. Ein grundlegender Unterschied zu den vorangegangenen Auswertemethoden zeigt sich in der Form der sich ergebenden Korrelogramme bzw. Spektren nach der Addition. Dabei wird in Abbildung 7 offensichtlich, dass es sich nicht mehr um Spektren handelt, die mit einer Gaußfunktion approximiert werden können, sondern einen multimodalen Charakter aufweisen. Im Ergebniskorrelogramm der Abbildung 7 kann auch ein geringer Schwebungseffekt erahnt werden, was mit dem Prinzip des Heterodynverfahrens erklärt werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Weißlichtinterferometrie mit Farbkameras ist eine praxisrelevante Aufgabenstellung. Im Artikel konnten verschiedene Ansätze zur Verwendung eines Bayer-Sensors vorgestellt werden. Die Getrennte Verarbeitung der R,G,B-Pixel des Bayer-Musters wurde ausführlich behandelt. Die Daten des Bayer-Sensors werden ohne Debayering und Matrizierung ausgelesen, praktisch so, als würde es sich um einen Grauwertsensor handeln. Wird der Offset zwischen den einzelnen Korrelogrammen korrigiert, kann eine stetige Topographie in voller Auflösung ermittelt werden (Abbildung 8).

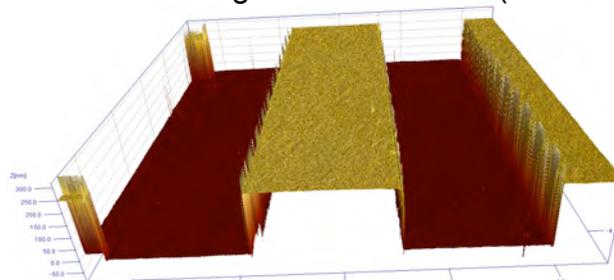


Abbildung 8: Kombinierte R/G/B-Topographien nach Offsetkorrektur

Im Abschnitt 4 wurde der Ansatz der spektrale Rekonstruktion erläutert. Durchgeführt wird eine spektrale Rekonstruktion aus benachbarten Rot-, Grün- und Blaukorrelogrammen, so dass die spektrale Transmissionswirkung der verschiedenen Farbfilter weitgehend rückgängig gemacht wird. Es zeigt sich, dass für eine

praxistaugliche Umsetzung noch einige Probleme bzgl. des Übergangsverhaltens gelöst werden müssen. Gleichzeitig wird ersichtlich, dass sich insgesamt recht komplexe Vorverarbeitungsoperationen bei diesem Ansatz ergeben.

Ziel des Additionsansatzes ist es, eine aufwendige Spektralrekonstruktion zu vermeiden und dennoch eine schmalere Korrelogrammform zu erreichen, um dem Fittingverhalten des Matchedfilters entgegenzukommen. Hierzu werden die Korrelogramme eines jeweiligen Viererblocks im Bayerpattern lediglich addiert bzw. gemittelt.

Zu den Vorteilen des Additionsansatzes kann insbesondere die einfache Vorgehensweise und rechenzeiteffiziente Umsetzbarkeit gezählt werden. So kann im einfachsten Fall eine Boxfilterung jedes Bildes noch während des Scanvorgangs durchgeführt werden. Nachteilig ist der Auflösungsverlust bei diesem Ansatz, der durch die Zusammenfassung der Vierer-Pixelgruppe entsteht. Ein vielversprechender Ansatz zur Reduzierung des Auflösungsverlustes ist die Kombination des Additionsansatzes mit dem klassischen Demosaicing auf den Einzelbildern, wobei zunächst die Farbinformation für jeden Pixel aus seiner Nachbarschaft interpoliert wird und das gewonnene RGB-Tripel zu einem Intensitätswert additiv zusammengefaßt wird.

Literatur

- [1] Machleidt Torsten, Kollhoff Dietmar, Kapusi Daniel: "smartWLI" - eine modulare Systemlösung zur 3D-Oberflächenmessung mittels Weißlichtinterferometrie. In: 3D-NordOst, 13. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten GFal Berlin, Dez. 2010, ISBN: 987-3-033-942709-00-2
- [2] Kapusi Daniel, Machleidt Torsten, Franke Karl-Heinz, Jahn Rainer: White light interferometry in combination with a nanopositioning and nanomeasuring machine (NPMM)". In: Proceedings of SPIE Vol. 6616, Munich 2007.
- [3] Seifert T.: Verfahren zur schnellen Signalaufnahme in der Weißlichtinterferometrie. In: Dissertation, Universität Erlangen, 2005
- [4] Dathe Oliver: Erweiterung eines Leica Mikroskops zur Auswertung von Weißlichtinterferogrammen für die Bestimmung dreidimensionaler Oberflächentopographien von Mikro- und Nanostrukturen, Diplomarbeit, TU Ilmenau, 2010
- [5] uEye: Manual, Enthalten im Treiberpaket. Von: <http://www.ids-imaging.de>
- [6] D. Kapusi, T. Machleidt, E. Manske, K.-H. Franke, R. Jahn: White Light Interferometry Utilizing the Large Measuring Volume of a Nanopositioning and NanomeasuringMachine, XII. International Colloquium on Surfaces, Chemnitz 2008
- [7] Norbert Wiener: Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series. Wiley, New York 1949