

# Phasenmessende Deflektometrie mit aktiver Displayregistrierung

Jonas Bartsch\*, Ralf B. Bergmann\* \*\*

\*BIAS – Bremen Institut für angewandte Strahltechnik, Klagenfurter Str. 5, 28359 Bremen, Deutschland

\*\*Universität Bremen Fachbereich 01- Physik und Elektrotechnik und MAPEX Center of Materials and Processes, 28359 Bremen, Deutschland

<mailto:bartsch@bias.de>

Phasenmessende Deflektometrie mit aktiver Displayregistrierung erlaubt das Anpassen des Messsystems an unterschiedliche Probengeometrien ohne erneute Systemkalibrierung. Variieren der Pose des zum Phasenmessen eingesetzten Displays ermöglicht vollflächiges Erfassen stark gekrümmter Proben und wird zum Auflösen des Mehrdeutigkeitsproblems genutzt.

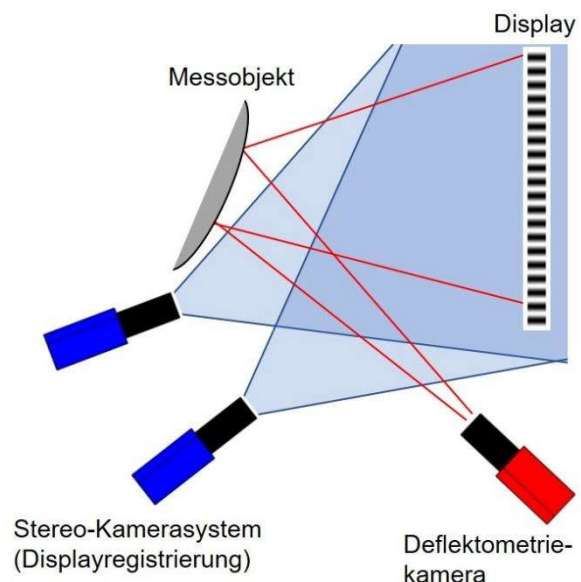
## 1 Einführung

Phasenmessende Deflektometrie (PMD) ist ein Verfahren zur hochgenauen flächenhaften Formerfassung spiegelnder Oberflächen. Eine Kamera ist auf das Messobjekt gerichtet. Ein Display ist so platziert, dass die Anzeigefläche von der Kamera in Reflexion am Objekt beobachtet wird. Das Verfahren des Phasenschiebens, bei dem Serien phasenverschobener Sinusmuster auf dem Display zur Anzeige gebracht werden, liefert eine Zuordnung der Kamerapixel zu den Koordinaten der Displayoberfläche am jeweils beobachteten Punkt. Inverse Strahlverfolgung von den Pixeln der Kamera über das Messobjekt zur Displayoberfläche führt zum Messergebnis. Dabei existiert das Mehrdeutigkeitsproblem, dass beispielsweise durch den Einsatz einer weiteren Kamera oder durch Kenntnis eines Referenzpunkts aufgelöst werden kann.

Mit dem beschriebenen Vorgehen sind eingerichtete PMD-Systeme stets für bestimmte Oberflächengeometrien optimiert. So wird beispielsweise ein PMD-System, welches zur Messung ebener Proben eingerichtet wurde, bei konvex gekrümmten Oberflächen nur auf einer kleineren Fläche messen können, da ein Teil der Sichtstrahlen der Kamera nicht mehr auf das Display trifft. In vielen Fällen kann eine Anpassung des Messsystems durch Änderung von Position und Orientierung (Pose) des Displays erreicht werden. Da diese Informationen für die Messung bekannt sein müssen, erfordert dies eine erneute Systemkalibrierung. Dies kann vermieden werden, indem man die Oberfläche des Displays mit einem externen Messsystem erfasst. Die damit gewonnene Freiheit erlaubt es außerdem Phasenmessungen für mehrere Displayposen zur Regularisierung zu nutzen und ein größeres Messfeld zu realisieren. Des Weiteren werden systematische Messfehler vermieden, die in Folge von Ebenheitsabweichungen der Displayoberfläche auftreten [1, 2].

## 2 Aktive Displayregistrierung

Zur Registrierung der Displayoberfläche kann ein Stereo-Kamerasystem verwendet werden. Eine schematische Darstellung eines entsprechenden Messaufbaus ist in Abb. 1 dargestellt.



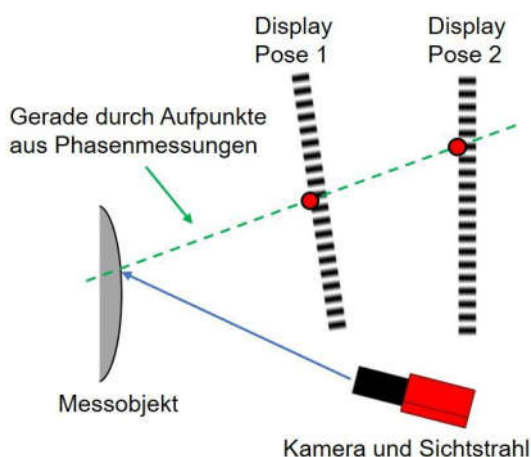
**Abb. 1** Schematische Darstellung eines Messaufbaus für PMD mit aktiver Displayregistrierung. Das Display kann in dem Bereich, in dem die Sichtfelder aller Kameras überlappen frei platziert werden. Das Stereo-Kamerasystem liefert Ortskoordinaten der Displayoberfläche zu den Phasenmessungen der Deflektometrie-kamera.

Wie die Deflektometrie-kamera nutzt auch das Stereo-Kamerasystem zur Displayregistrierung die zur Anzeige gebrachten Muster zur Bestimmung der Phase. Analog zum Verfahren der Streifenprojektion mit Stereo-Kamerasystem werden so Punkte der Displayoberfläche zu den Phasenwerten ermittelt. Sind Deflektometrie-kamera und Stereosystem zueinander geometrisch kalibriert, können den gemessenen Phasenwerten der Deflektometrie-kamera direkt und ohne Vorwissen über Pose und Form der Displayoberfläche Ortskoordinaten zugeordnet werden. Die geometrische Kalibrierung der

drei verwendeten Kameras zueinander ersetzt die sonst in der PMD übliche geometrische Kalibrierung der Displaypose. Das Display kann innerhalb des Bereichs, in dem die Sichtfelder der Kameras überlappen, frei platziert werden.

### 3 Regularisierung

Inverse Strahlverfolgung vom Kamerapixel über die Reflexion am Objekt zum Display liefert zunächst nur eine Funktion möglicher Oberflächenpunkte in Abhängigkeit der lokalen Neigung. Um die tatsächlichen Werte dieser Größen zu bestimmen wird eine Regularisierung benötigt. Existieren zu einem Kamerapixel mehrere Aufpunkte hinter dem Messobjekt, kann eine Gerade für den reflektierten Sichtstrahl bestimmt werden. Das Verschneiden dieser Gerade mit dem Sichtstrahl der Kamera führt zum Punkt der Reflexion auf der Objektfläche [3] wie in Abb. 2 schematisch dargestellt. Für PMD-Systeme, bei denen die Displaypose veränderbar ist, bietet sich dieses Vorgehen zur Regularisierung an. Es ermöglicht große Flexibilität und erfordert keine zusätzlichen Komponenten, wie beispielsweise eine zusätzliche Kamera für die Stereo-Deflektometrie.



**Abb. 2** Regularisierung mit Phasenmessungen für mehrere Displayposen. Aus den Phasenmessungen werden für jeden Kamerapixel die Koordinaten der Durchstoßpunkte mit der Displayoberfläche für die jeweilige Pose bestimmt. Durch diese Aufpunkte der einzelnen Kamerapixel werden Geraden gelegt und mit dem zugehörigen Kamerasichtstrahlen verschnitten, um die Oberfläche des Messobjekts zu erfassen.

### 4 Herausforderungen

Die Genauigkeit der Phasenmessungen wird von der Schärfe der Abbildung der Displayanzeige auf Bildebenen der einzelnen Kameras sowie von der Frequenz der verwendeten Streifenmuster beeinflusst. Wird die Positionierung des Displays verändert, beeinflusst dies die Phasenmessungen. Die Deflektometrikamera wird auf das Messobjekt scharf gestellt, damit die Oberflächenstrukturen

aufgelöst werden können. Entsprechend befindet sich das Display stets außerhalb der Fokusebene. Es müssen Systemkonfigurationen gefunden werden, bei denen sowohl Stereo-Kamerasystem zur Displayregistrierung als auch die Deflektometrikamera die gleichen Streifenmuster zur Phasenmessung nutzen können. Fehler der Phasenmessungen gehen zudem zweimal ein: Aus den Phasenmessungen des Stereo-Systems werden Ortskoordinaten bestimmt, die den Phasenmessungen der Deflektometrikamera zugeordnet werden. Des Weiteren sind große Sichtfelder für die Kameras des Stereo-Systems wünschenswert, um möglichst große Freiheit bei der Positionierung des Displays zu ermöglichen. Aus einem größeren Sichtfeld folgt jedoch eine geringere räumliche Abtastung der Displayoberfläche. Es ist zu klären, wie sich dies auf die Messgenauigkeit des vorgeschlagenen Verfahrens auswirkt.

### 5 Zusammenfassung

Es wurde ein neuer Ansatz zur Messung mit PMD vorgestellt, bei dem die Pose des Displays verändert werden kann. Ermöglicht wird dies, indem die Displayoberfläche bei jeder Messung zusätzlich von einem Stereo-Kamerasystem eingemessen wird. Dies bietet die Vorteile eines flexibel an das Messobjekt anpassbaren Systems, mit dem Messfehler durch Ebenheitsabweichungen der Displayoberfläche vermeiden werden sowie die Möglichkeit einer einfachen Regularisierung. Es ist zu untersuchen, wie ein für die Phasenmessungen optimales Messsystem realisiert werden kann und wie sich Fehler in den Phasenmessungen in das Messergebnis zur Objektform fortpflanzen.

### 6 Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Entscheidung zur Förderung der Erforschung des vorgestellten Messverfahrens im Rahmen des kürzlich bewilligten Forschungsvorhabens DeflektAktiv (444018140) sowie für die Finanzierung unserer laufenden Arbeiten zum Thema PMD im Rahmen von DOTS (381609254), MultiDeflect (411170139), Sichtstrahl-Plus (289307220) und KaSifo (418992697).

### Literatur

- [1] J. Bartsch, J. R. Nüß, M. H. U. Prinzler, M. Kalms, R. B. Bergmann, „Effects of non-ideal display properties in phase measuring deflectometry: A model-based investigation“ in: *Proc. SPIE* **10678**, 106780Y (2018)
- [2] J. Bartsch, M. Kalms, R. B. Bergmann, „Improving the calibration of phase measuring deflectometry by a polynomial representation of the display shape“, *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public.* **15**, 20 (2019)
- [3] M. Petz, R. Tutsch, „Rastereflexions-Photogrammetrie zur Messung spiegelnder Oberflächen“ in: *TM-Technisches Messen* **71** (7-8), 389-397 (2004)