

Optische 3D-Vermessung transluzenter Materialien

P. Lutzke, P. Kühmstedt, G. Notni

Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Jena

<mailto:peter.lutzke@iof.fraunhofer.de>

Die optische 3D-Vermessung transluzenter Materialien führt zu einem Messfehler abhängig vom Winkel zwischen Oberflächennormale des Messobjektes und Beleuchtungsrichtung. Die Fehlerentstehung kann durch ein einfaches Modell beschrieben werden. Es wird gezeigt, wie der Messfehler nachträglich kompensiert werden kann.

1 Einführung

Durch steigende Anforderungen an Messgenauigkeit und Geschwindigkeit etablieren sich zunehmend optische 3D-Messverfahren in Bereichen der industriellen Qualitätssicherung, aber verstärkt auch im medizinischen Bereich [1]. Viele Kunststoffe und organische Materialien, aus denen potentielle Messobjekte bestehen, sind transluzent. Es handelt sich hierbei um dielektrischen Materialien, die Licht nicht nur an der Objektfläche reflektieren, sondern auch im Objektvolumen streuen.

Um die Koordinaten eines Punktes auf der Oberfläche eines Objektes zu bestimmen, wird dieser bei dem 3D-Messverfahren der aktiven Triangulation unter Verwendung strukturierter Beleuchtung durch eine Projektionssequenz codiert. Bei Beobachtung mit zwei Kameras ist es somit möglich korrespondierende Punkte auf den Kamerachips subpixelgenau zu ermitteln und unter Kenntnis der inneren und äußeren Parameter des Messsystems die 3D-Koordinaten des Punktes zu berechnen [2].

2 Fehlerabhängigkeiten

Wird ein Objekt aus einem transluzentem Material mit dem Verfahren der aktiven Triangulation unter Verwendung strukturierter Beleuchtung dreidimensional vermessen, kommt es zu einer Abweichung zwischen der Objektfläche und der gemessenen 3D-Koordinate. Für alle Messungen wurde eine Kombination aus einer Graycode und 1+Cos Mustersequenz verwendet. Der Messfehler ist abhängig vom Winkel α zwischen der Oberflächennormale und der optischen Achse des verwendeten Projektionssystems. Der Fehler nimmt bei senkrechter Beleuchtung ein Minimum an, steigt dann auf einen Maximalwert im Bereich von etwa 25° und fällt bei weiter zunehmendem Winkel wieder ab. In Abb. 1 sind die Messkurven an mehreren transluzenten Acrylglasproben dargestellt, auf welche eine ca. 200 nm dicke Aluminiumschicht als optisch dichte Referenzfläche aufgedampft wurde. Da die Oberflächenrauheit das Ver-

hältnis des an der Oberfläche reflektierten Lichtanteils zu dem im Volumen gestreuten beeinflusst, hat eine Variation der Oberflächenrauheit ebenfalls Auswirkung auf den Messfehler. In Abb. 1 wurden die Fehlerkurven für Acrylglasproben aus einem Material aber mit unterschiedlichen Oberflächenrauheiten dargestellt.

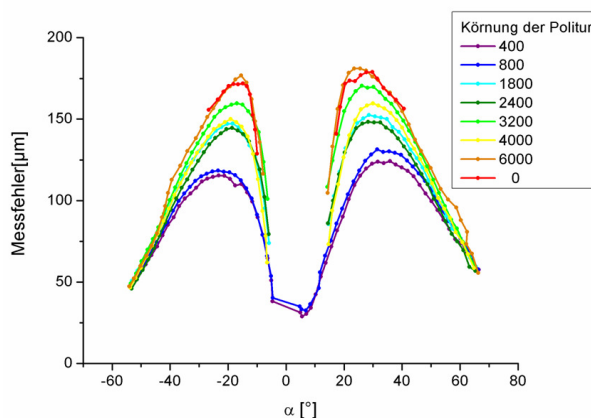


Abb. 1 Abhängigkeit des Messfehlers vom Messwinkel und der Oberflächenrauheit an transluzenten Acrylglasproben

Mit zunehmender Körnung der Politur und somit sinkender Oberflächenrauheit steigt die Ausprägung des Fehlers.

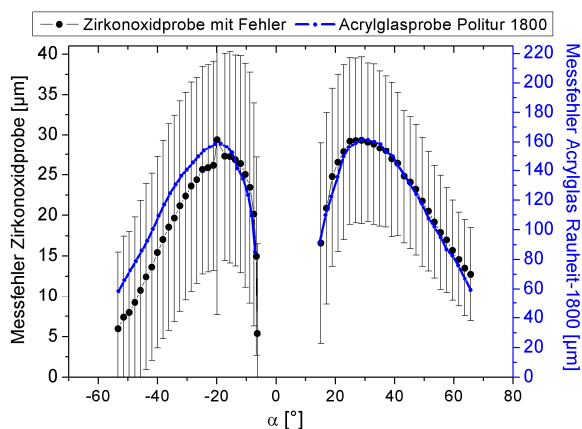


Abb. 2 Doppelt skalierte Darstellung der Fehlerkurven an einer Acrylglas- sowie Zirkonoxidprobe

In Abb. 2 sind die Fehlerkurve an zwei verschiedenen Materialien dargestellt. Die geringe Ausprägung des Messfehlers an der Zirkonoxidprobe beruht auf der höheren optischen Dichte des Materials im Vergleich zur Acrylglasprobe. Der Verlauf hingegen ist annähernd gleich.

3 Modell der Fehlerentstehung

Das entwickelte Modell beschreibt die Fehlerentstehung bei der optischen 3D-Vermessung unter Verwendung des Phasenschiebverfahrens an einer ebenen transluzenten Probe. Die von einem Projektor auf das Messobjekt projizierten $1+\cos$ Muster werden von zwei Kameras $K_{1/2}$ aus verschiedenen Richtungen beobachtet. Die Reflexion an der Objektoberfläche bei Beleuchtung unter einem Winkel α wird durch einen ideal diffus gestreuten Anteil, sowie eine spekulare Keule in Form einer Gaußverteilung beschrieben [3]. Der in das Material eindringende Anteil wird an der Grenzfläche gebrochen und nach einer freien Weglänge τ isotrop gestreut. Das von den Kameras beobachtete Licht setzt sich aus diesen Komponenten zusammen.

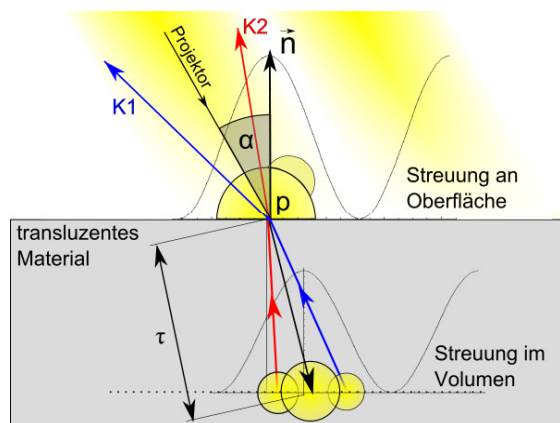


Abb. 3 Modell der Fehlerentstehung

Der im Volumen gestreute Anteil des Lichtes, das die Kameras aus Richtung eines Punktes p auf der Objektoberfläche empfangen, stammt nicht von diesem Oberflächenpunkt. Durch die unterschiedlichen Brechungswinkel für K_1 und K_2 unterscheidet sich dieser Anteil (Abb. 3). Dies hat zur Folge, dass für K_1 und K_2 unterschiedliche Phasenwerte für p berechnet werden. Die Triangulation erfolgt im Anschluss zwischen zwei Sichtstrahlen, die ausgehend von den Kamerazentren die Punkte auf den Kameramatrizen durchstoßen, denen der gleiche Phasenwert zugeordnet wurde. Daher wird eine 3D-Koordinate berechnet, die nicht auf der Objektoberfläche liegt.

Für die Fehlersimulation wurden Parameter für den spekulär reflektierten Anteil verwendet, die bei einer Streulichtmessung einer Acrylglasprobe ermittelt wurden. In Abb. 4 ist ein Vergleich zwischen der gemessenen und simulierten Fehlerkurve dargestellt.

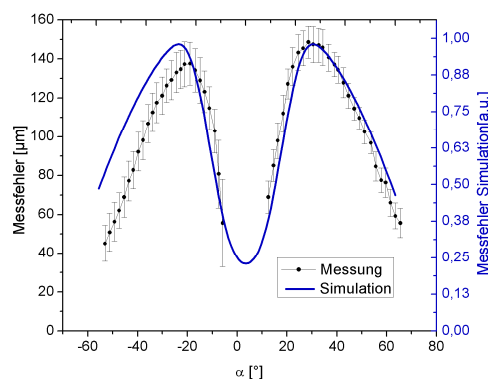


Abb. 4 Vergleich der gemessenen und simulierten Fehlerkurve

4 Fehlerkompensation

Für die nachträgliche Kompensation des Messfehlers wurde die zuvor gemessene Fehlerkurve interpoliert. An jedem Punkt des gemessenen 3D-Datensatzes wurde der Winkel zwischen Normalenvektor und Beleuchtungsrichtung berechnet. Entsprechend dem Messfehler für diesen Winkel wurde die 3D-Koordinate in Normalenrichtung verschoben. In Abb. 5 ist eine Beispielmessung an einer gekrümmten Acrylglasprobe im Vergleich zu einer opaken Referenzfläche dargestellt. Der mittlere Fehler konnte mit der verwendeten Methode von $-95 \mu\text{m}$ auf $13 \mu\text{m}$ reduziert werden.

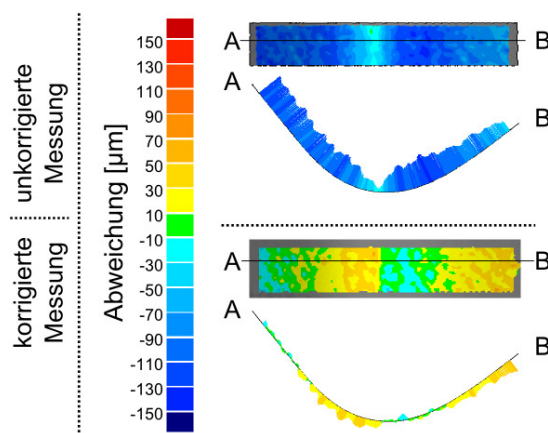


Abb. 5 Messung an einer gekrümmten transluzenten Acrylglasprobe vor und nach der Fehlerkompensation

Literatur

- [1] F. Chen, G. Brown & M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *Optical Engineering* (2000) 39: pp. 10-20.
- [2] P. Kühmstedt, C. Munkelt, M. Heinze, M. Himmelreich, C. Bräuer-Burchardt & G. Notni. 3D shape measurement with phase correlation based fringe projection. In *Proceedings of the SPIE* (2007) 6616: pp.1-9.
- [3] S. Nayar, K. Ikeuchi & T. Kanade. Surface reflection – physical and geometrical perspectives. *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence* (1991) 13: pp. 611-634.