

Flächenhafte, berührungslose Formmessung der Vorder- und Rückfläche von transparenten Objekten

Henri Speck*, Martin Landmann*, Saikat Chandra Das* **,
Stefan Heist*, Peter Kühmstedt*, Gunther Notni* ***

*Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF,
Albert-Einstein-Str. 7, 07745 Jena, Germany

**Friedrich Schiller University, Institute of Applied Physics, Abbe Center of Photonics,
Albert-Einstein-Str. 6, 07745 Jena, Germany

*** Ilmenau University of Technology, Department of Mechanical Engineering,
Gustav-Kirchhoff-Platz 2, 98693 Ilmenau, Germany

mailto:henri.speck@iof.fraunhofer.de

Diese Arbeit befasst sich mit der Messung der Vorder- und Rückseite und damit der Bestimmung der Materialdicke von transparenten Objekten. Dabei wird aktive Triangulation unter Beobachtung von thermischen Streifenmustern verwendet. In diesem Beitrag wird der neue Ansatz anhand eines Simulationsmodells theoretisch untersucht und es werden erste experimentelle Ergebnisse gezeigt.

1 Einführung

Bei vielen industriellen Prozessen ist es erforderlich, nicht nur die vordere, sondern auch die hintere Oberflächenform und der damit einhergehenden Materialdicke, zu bestimmen. Dies ist essenziell für die Identifizierung von Schwachstellen oder möglichen Materialeinsparungen, z. B. bei Behältergläsern. Bestehende Verfahren zur gleichzeitigen Messung von Oberflächenform und Materialdicke (z. B. Computertomographie) [1] sind komplex, teuer, langsam und lassen sich nicht in Produktionslinien integrieren. In diesem Artikel wird ein neuer Messansatz zur Bestimmung der Vorder- und Rückseiten von transparenten Objekten präsentiert. Für den „Shape from Heating“-Ansatz [2, 3] wurde eine FEM-Simulation entwickelt [4]. Diese wurde für die Materialdickenbestimmung erweitert und verwendet, um geeignete Messparameter, wie Laserleistung, Einfallswinkel und Bestrahlungszeiten zu ermitteln. Das Messprinzip wird im Weiteren dargestellt und das erweiterte Simulationsmodell wird anhand eines Experiments mit einer 4,7 mm dicken Glasplatte validiert.

2 Messverfahren

Um Vorder- und Rückfläche gleichzeitig zu bestimmen, dient ein thermischer 3D-Sensor [5] als Grundlage. Anstelle einer Laserlinie bei einer Wellenlänge von $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$, welche an der Oberfläche des Objekts absorbiert wird und das Material nicht durchdringt, wird eine Laserlinie bei einer Wellenlänge im kurzwelligen Infrarot (SWIR) gewählt. Handelsübliche Behältergläser bestehen aus Kalk-Natron-Glas. Dessen Transmission bei einer Wellenlänge von $1 \mu\text{m}$ im SWIR und einer Materialdicke von $d_{\text{Glas}} = 2 \text{ mm}$ beträgt etwa 90 %. Die Absorptions-

länge ist demnach 17 mm. Dadurch durchdringt die Strahlung das Glas über mehrere Millimeter und hinterlässt eine Wärmespur. Dieses Verhalten wird im schematisch dargestellten Messansatz in Abb. 1 veranschaulicht.

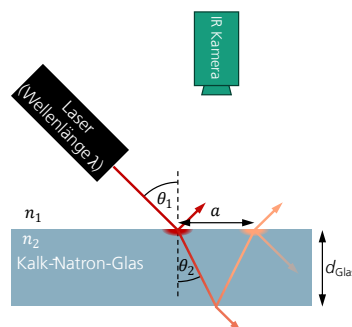


Abb. 1 Messansatz zur Messung der Dicke einer Glasplatte d_{Glas} mit einer Wellenlänge $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$, einem Einfallswinkel θ_1 , einem Brechungswinkel θ_2 , dem Brechungsindex der Luft n_1 , dem Brechungsindex des Glases n_2 und dem Abstand zweier Wärmesignale a [6].

Der Laserstrahl trifft dabei unter dem Winkel θ_1 auf die Vorderfläche. Neben der Reflexion wird ein Teil der Strahlung nach dem Snelliusschem Brechungsgesetz gebrochen und dringt in das Material ein bis er die Rückseite erreicht. An der Rückseite wird die Strahlung teilweise reflektiert und gelangt erneut an die Vorderseite. Auf seinem Weg durch das Material wird die Bestrahlungsstärke gemäß des Lambert-Beerschen Gesetz absorbiert und in Wärme umgewandelt. Zwei Infrarotkameras im langwelligen Infrarot (LWIR) erfassen die Wärmeverteilung nur an der dem Sensor zugewandten Oberfläche.

Indem die Vorderfläche mit einem thermischen Signal abgescannt wird, lässt sich anschließend so-

wohl die Form der Oberfläche mittels zeitlicher Kreuzkorrelation [7, 8], als auch gleichzeitig die Materialdicke mithilfe von Gleichung 1 bestimmen

$$d_{\text{Glas}} = \frac{a}{2 \tan \theta_2 (n_2)}. \quad (1)$$

3 Simulation und Experiment

Das von Landmann et al. [4] entwickelte Modell dient als Grundlage für das erweiterte Simulationsmodell. Die Simulation beginnt mit der Beschreibung der Bestrahlungsmuster, setzt sich mit der Simulation der räumlichen und zeitlichen Temperaturverteilung fort und endet mit der Darstellung der Wärmebildkameraaufnahmen gefolgt von der 3D-Rekonstruktion der Vorderfläche. Die Simulation der Temperaturverteilung berücksichtigt Effekte wie Fresnel-Reflexion, Absorption nach dem Lambert-Beerschen Gesetz, Wärmediffusion sowie Wärmeverluste durch Konvektion und Emission. Eine FEM löst die entstehende parabolische partielle Differentialgleichung für eine spezifische Objektgeometrie.

Mit dem Simulationsmodell wurden die Temperaturen sowie der Abstand a der Wärmepunkte in Abhängigkeit vom Einfallswinkel θ_1 analysiert. Dafür wurden u. a. folgende Projektionsparameter festgelegt: Laserwellenlänge $\lambda = 0.976 \mu\text{m}$, Laserleistung $P = 100 \text{ W}$, Laserpunktweite $w = 1,2 \text{ mm}$ und Bestrahlungsdauer $t_{\text{irr}} = 25 \text{ ms}$.

Diese Projektionsparameter wurden anschließend auch in einem experimentellen Aufbau (Abb. 2) verwendet. Der Laserstrahl wird durch zwei Linsen auf eine 4,7 mm dicke Glasplatte fokussiert, die auf einem Drehtisch positioniert ist. Eine LWIR-Kamera zeichnet die Wärmeverteilung auf der Vorderseite der Glasplatte mit bis zu 3.990 Hz in einer Auflösung von 640×120 Pixel auf.

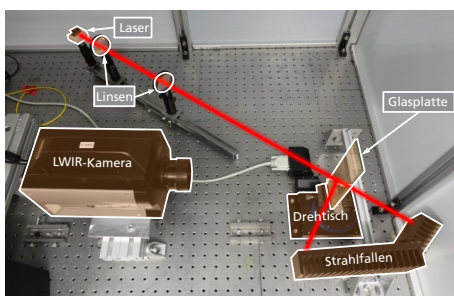


Abb. 2 Experimenteller Aufbau mit einem Faserlaser als Strahlenquelle, zwei sphärischen Linsen zur Strahlformung, einer 4,7 mm dicken Glasplatte, einem Drehtisch, Strahlfallen und einer LWIR-Kamera [6].

Generell zeigen die Simulationsergebnisse das gleiche Verhalten wie die experimentellen Ergebnisse (Abb. 3). Mit zunehmendem Einfallswinkel wird der Abstand a größer und der zweite Wärmepunkt zeigt einen höheren relativen Temperaturanstieg.

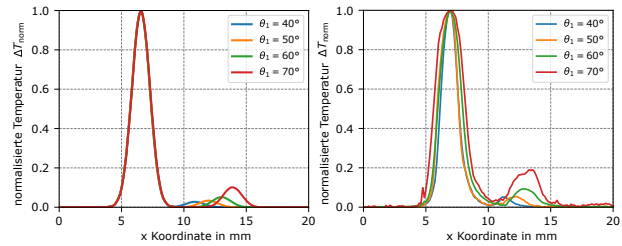


Abb. 3 Horizontale Temperaturprofile für verschiedene Einfallswinkel. Links: simulierte und rechts: experimentelle Ergebnisse [6].

Aus den experimentellen Ergebnissen konnte in einem Einfallswinkelbereich von $\theta_1 = 37^\circ \dots 67^\circ$ die Materialdicke mit einer relativen Abweichung von etwa 2% gemessen werden.

Literatur

- [1] B. Trifonov, D. Bradley, and W. Heidrich, "Tomographic Reconstruction of Transparent Objects," pp. 51–60 (2006).
- [2] J.-F. Pelletier and X. Maldague, "Shape from heating: a two-dimensional approach for shape extraction in infrared images," *Opt. Eng.* **36**(2), 370–375 (1997).
- [3] G. Eren, O. Aubreton, F. Meriaudeau, L. S. Secades, D. Fofi, A. T. Naskali, F. Truchetet, and A. Ercil, "Scanning from heating: 3D shape estimation of transparent objects from local surface heating," *Opt. Express* **17**(14), 11457–11468 (2009).
- [4] M. Landmann, S. Heist, P. Dietrich, H. Speck, P. Kühmstedt, A. Tünnermann, and G. Notni, "3D shape measurement of objects with uncooperative surface by projection of aperiodic thermal patterns in simulation and experiment," *Opt. Eng.* **59**(9), 094107 (2020).
- [5] M. Landmann, H. Speck, J. T. Schmieder, S. Heist, and G. Notni, "Improvement of Thermal Fringe Projection for Fast and Accurate 3D Shape Measurement of Transparent Objects," *Proc. OCM* p. 99 (2021).
- [6] M. Landmann, H. Speck, S. C. Das, S. Heist, P. Kühmstedt, and G. Notni, "Optically measuring the front and rear surface shape of transparent objects," in *Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications XIII*, K. G. Harding, S. Zhang, J.-S. Hyun, B. Li, and A. G. Marrugo, eds., vol. 13038, p. 130380D, International Society for Optics and Photonics (SPIE, 2024).
- [7] M. Landmann, H. Speck, P. Dietrich, S. Heist, P. Kühmstedt, A. Tünnermann, and G. Notni, "High-resolution sequential thermal fringe projection technique for fast and accurate 3D shape measurement of transparent objects," *Appl. Opt.* **60**(8), 2362–2371 (2021).
- [8] S. Heist, "Hochgeschwindigkeits-3D-Formvermessung mittels aperiodischer Sinus-Muster," Ph.D. thesis, Friedrich-Schiller-Universität Jena (2017).