

Erste Untersuchungen zur additiven Fertigung einer Linse mit Gradient im Brechungsindex

M. Rank^{1,2} und A. Heinrich¹

¹Zentrum für optische Technologien, Hochschule Aalen, Anton-Huber-Straße 21, 73430 Aalen

²Institut für Physik, Universität Augsburg, Universitätsstraße 1, 86159 Augsburg

<mailto:manuel.rank@hs-aalen.de>

3D-Druck-Optiken mit gekrümmten Oberflächen weisen durch die Lagenstruktur eine raue Oberfläche auf. Ziel ist die Nutzung von Brechungsindexvariationen im Volumen um Brechkkräfte bei planen Proben zu erreichen. Diese Arbeit stellt erste Untersuchungen, bspw. Messungen zum Brechungsindexprofil dar. Mit der Herstellung synthetischer Proben mit partieller Aushärtung wird gezeigt, dass gemäß von der belichteten Struktur sich optische Effekte ergeben.

1 Einführung

Die additive Fertigung von optischen Elementen, insbesondere mit gekrümmten Flächen, zeichnet sich momentan durch raue Oberflächen aus [1]. Die Lagenstruktur einer Linsenfläche, dargestellt in Abb. 1 links, stört den optischen Effekt fundamental und erzeugt Streulicht. Je nach Drucktechnologie ist die Oberfläche einer einzelnen Lage ebenfalls rau, da bspw. eine diskrete Pixelstruktur bei DMD-SLA-Proben vorliegt (Abb. 1 rechts).

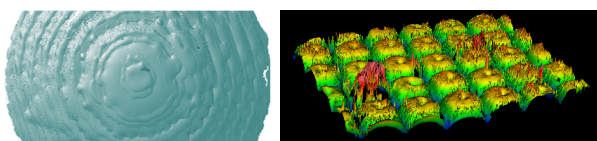


Abb. 1 Raue Oberflächen additiv gefertigter Optikelemente. Links: Lagenstruktur einer Linsenfläche; rechts: Pixelstruktur einer ebenen DMD-SLA-Probe.

Ausgehend von der Pixelstruktur in Abb. 1 rechts wird die Annahme getroffen, dass innerhalb des gedruckten Volumens Brechungsindexschwankungen vorliegen. Gestützt wird die Annahme von bereits vorgestellten optischen Effekten an der Lagenstruktur sowie dem gemessenen Anstieg der Brechungsindizes der Materialien von bis zu 0,04 vom flüssigen zum ausgehärteten Zustand [2].

Ziel ist die Erzeugung und Nutzung von bestimmten Brechungsindexvariationen innerhalb einer 3D-gedruckten Probe. Damit könnten plane Proben für eine simple Nachbearbeitung hergestellt werden, deren Brechkraft im Volumen entsteht. Vereinfacht kann das Prinzip durch einen linsenförmigen Hohlraum mit flüssigem statt ausgehärtetem Harz umgesetzt werden. Durch den geringen Brechungsindexunterschied zwischen flüssigem und polymerisiertem Harz kommt es zu deutlich geringeren Brechkkräften verglichen mit herkömmlichen Linsen mit Luft als umgebendes Medium.

2 Beobachtung und erste Analyse

Zur Überprüfung der Annahme, dass Brechungsindexschwankungen entlang der Pixelstruktur oder

über im Schichtstapel existieren, wird die Scanning Focused Refractive Index Microscopy (kurz SFRIM) eingesetzt [3]. Das Prinzip ist in Abb. 2 dargestellt. Unter hoher numerischer Apertur wird durch ein hochbrechendes Prisma auf die Grenzfläche Prisma-Probe fokussiert. Abhängig vom lokalen Brechungsindex kommt es für einen Winkelbereich zur Totalreflektion während der andere Teil ausgekoppelt wird. Im reflektierten, auf einen Kamerachip projizierten Strahl kommt es zu einer Hell-Dunkel-Kante im Bild, die entsprechend ausgewertet werden kann. Kalibriert wird das Verfahren über Keilplättchen aus unterschiedlichen Glassorten.

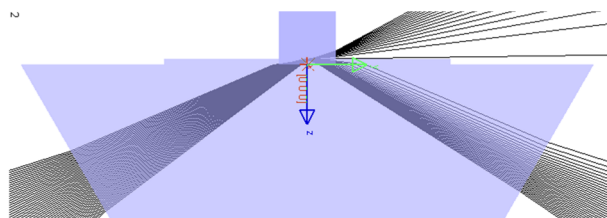


Abb. 2 Messprinzip der Scanning Focused Refractive Index Microscopy per Grenzwinkel der Totalreflektion.

3 Synthetische Proben

Zum Nachweis des optischen Effekts durch lokale Brechungsindexvariationen werden ideale Proben hergestellt. Dazu wird wie in Abb. 3 gezeigt Harz zwischen zwei Objektträgern eingekapselt und einseitig mit dem DMD-UV-Projektor belichtet. Mit dem Projektor können über Graustufenbilder Belichtungsprofile (glockenförmige Fläche) erzeugt werden. Zusätzlich kann zur Begrenzung des Probenfeldes ein Rahmen ausgehärtet werden.

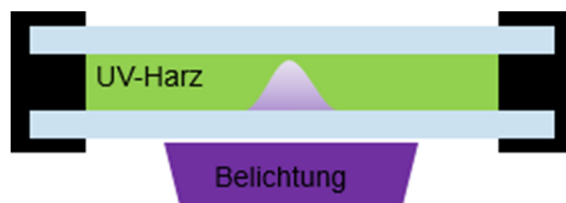


Abb. 3 Herstellungsverfahren synthetischer Proben mit Variation im Brechungsindex durch partielle Aushärtung

Vorteil dieser synthetischen Proben ist die Immersion und die optisch glatten Oberflächen der Objektträger, sodass Streueffekte weitestgehend minimiert sind. So können die optischen Effekte isoliert untersucht werden. Eine fertig bestrahlte Probe ist in Abb. 4 links zu sehen. In den hellen Streifen sind die ausgehärteten Strukturen sichtbar. Mitte rechts ist ein Punkt mit umgebenden Rahmen ausgehärtet worden. Bei Betrachtung eines strukturierten Hintergrunds wie das Schachbrettmuster in Abb. 4 rechts ist eine deutliche Verzerrung als erste Bestätigung des optischen Effekts erkennbar. Um den Punkt herum, wo keine Bestrahlung erfolgt ist, wird das Schachbrettmuster nicht verzerrt.



Abb. 4 Verschiedene synthetische Proben zwischen zwei Objektträgern. Die Reflexe an den hellen Reflektionen zeigen partielle Aushärtungen.

Eine erste Messung der lokalen Brechungsindexverteilung von zwei ausgehärteten Punkten umgeben von flüssigem Harz ist in Abb. 5 dargestellt. Eine mikroskopische Kontrolle des Abstands der Punkte ergibt eine hohe Übereinstimmung im Rahmen der gewählten Auflösung der SFRIM-Messung ($975 \pm 25 \mu\text{m}$). Der Brechungsindex liegt ebenfalls im erwarteten Bereich für das flüssige ($n = 1.479$) und ausgehärtete ($n = 1.506$) Harz. Das Messsignal ist jedoch noch rauschbehaftet.

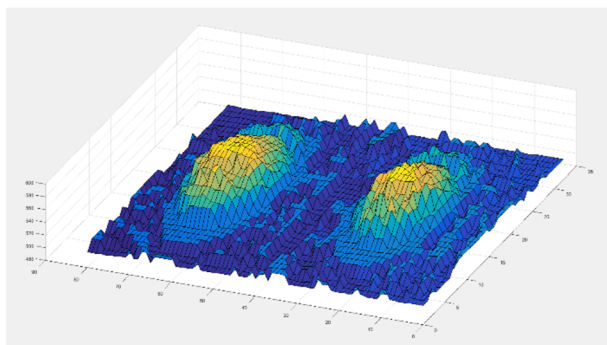


Abb. 5 Lokal aufgelöste Brechungsindexmessung zweier ausgehärteter Punkte umgeben von flüssigem Harz.

4 Optische Effekte mit Laser

Zur Kontrolle der optischen Effekte der synthetischen Proben werden die Proben mit einem HeNe-Laser ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) durchleuchtet. In Abb. 6 sind oben jeweils das Belichtungsprofil dargestellt. Ganz links ist nur der Rahmen ausgehärtet, sodass kein optischer Effekt für den Laser, der mittig durch die Probe geht, entsteht. Der Spot entspricht dem rohen Laserspot ohne Probe. Wird die Probe flächig und im Fokus bestrahlt (Mitte links) ergibt sich ein gitterförmiges Beugungsmuster, begründet in der

Pixelstruktur des DMD-Projektors. Bei einer leicht unscharfen zylinderförmigen Belichtung (Mitte rechts) entsteht am Schirm eine schwache horizontale Ausdehnung des Laserspots. In vertikaler Richtung ist keine Ausdehnung gegenüber des rohen Laserspots erkennbar. Bei einer unscharfen, punktförmigen Belichtung (rechts) kommt es zu einem in allen Richtungen ausgedehnten Spots. Der gezeigte Spot ist mit offener Blende aufgenommen, sodass Streuung deutlich erkennbar ist. Im rohen Laser, der nur durch flüssiges Harz geht, kommt es zu keiner ausgeprägten Streuung. Wie im Beispiel mit der Hohlraumlinse erwähnt sind die optischen Effekte durch den geringen Brechzahlunterschied nur schwach ausgeprägt. Der Schirm in der Untersuchung von Abb. 6 ist 50 cm von der Probe entfernt.

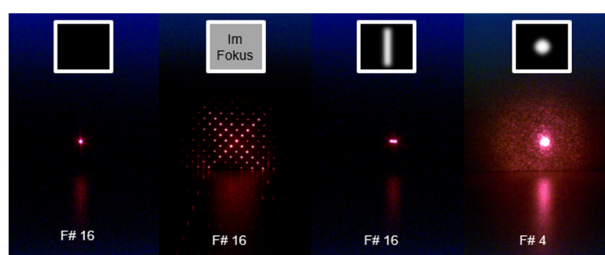


Abb. 6 Optische Effekte eines Lasers an unterschiedlichen synthetischen Proben.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit zeigt ein neues Konzept für additiv gefertigte optische Elemente, bei dem an planen Proben eine Brechkraft durch eine Variation des Brechungsindex erzeugt wird. Ein Messsystem (SFRIM) für lokale Brechungsindexmessungen wurde aufgebaut und erste kalibrierende Tests und Messungen durchgeführt. Der optische Effekt durch eine Brechzahlvariation zwischen flüssigem und ausgehärtetem Harz konnte an synthetischen Proben gezeigt werden. Abhängig vom Belichtungsprofil können linsenartige Effekte bei Durchleuchtung mit einem Laser erzeugt werden.

Im nächsten Schritt werden die belichteten Profile mit dem SFRIM analysiert und die Umsetzung der Brechungsindexvariation in 3D-gedruckten Proben evaluiert.

Referenzen

- [1] A. Heinrich *et al.*, "Additive manufacturing of optical components," *Advanced Optical Technologies*, vol. 5, no. 4, p. 9525, 2016.
- [2] M. Rank *et al.*, "Diffraktive Effekte an additiv gefertigten optischen Elementen," *DGaO-Proceedings*, vol. 118, http://www.dgao-proceedings.de/download/118/118_b8.pdf, 2017.
- [3] T.-Q. Sun *et al.*, "Scanning focused refractive-index microscopy," (eng), *Scientific reports*, vol. 4, p. 5647, 2014.