

Orts- und zeitaufgelöste bildbasierte Bestimmung der Brechungsindexverteilung bei der additiven Fertigung optischer Komponenten

Locally and temporally resolved image-based determination of the refractive index distribution during additive manufacturing of optical components

Manuel Rank und Andreas Heinrich

Aalen University, Center for Optical Technologies
Anton Huber Straße 21, 73430 Aalen

Zusammenfassung Der Brechungsindex stellt eine wesentliche Eigenschaft einer optischen Komponente dar. Dabei ist es oft wünschenswert diesen material- und prozessabhängigen Parameter 2dimensional mit einer möglichst hohen Ortsauflösung zu erfassen. Dies trifft auch für den Fall additiv gefertigter Optiken zu. Solche Komponenten können z.B. mit Hilfe der Photopolymerisation realisiert werden. Dabei wird mit UV Strahlung die Aushärtung eines flüssigen Polymer ermöglicht. Wesentlich ist dabei, dass der Aushärtegrad und der damit in Zusammenhang stehende Brechungsindex von den Bestrahlungseigenschaften abhängt. Somit ergibt sich neben dem materialabhängigen Brechungsindex auch eine prozessbedingte Abhängigkeit des Brechungsindex. Im Umkehrschluss können damit über eine Messung der 2dimensionalen Brechungsindexverteilung auf den Aushärtegrad einer Probe geschlossen und Prozessparameter definiert werden.

In diesem Beitrag soll eine Möglichkeit der orts- und zeitaufgelösten Vermessung des Brechungsindex während und nach der UV Aushärtung von Polymeren vorgestellt und diskutiert werden. Die Grundlage dafür bildet ein Messansatz basierend auf Totalreflexion. Gewonnen werden mit dem Messaufbau Bilder, welche die Information des lokal vorliegenden Brechungsindex

dex enthalten. Diese können entweder analytisch, oder mit Hilfe eines neuronalen Netzes ausgewertet werden.

Schlüsselwörter Brechungsindex, optische Messung, additive Fertigung, Stereolithografie

Abstract The refractive index represents an essential property of an optical component. It is often desirable to measure this material- and process-dependent parameter 2-dimensionally with the highest possible spatial resolution. This also applies to the case of additively manufactured optics. Such components can be realized, for example, with the aid of photopolymerization. In this process, UV radiation is used to cure a liquid polymer. It is important to note that the degree of curing and the associated refractive index depend on the irradiation properties. Thus, in addition to the material-dependent refractive index, there is also a process-dependent dependence of the refractive index. Conversely, a measurement of the 2-dimensional refractive index distribution can be used to infer the degree of curing of a sample and subsequently to define process parameters.

In this paper, a possibility of spatially and temporally resolved measurement of the refractive index during and after UV curing of polymers will be presented and discussed. The basis for this is a measurement approach based on total internal reflection. Images are obtained with the measurement setup, which contain the information of the locally present refractive index. These can be evaluated either analytically or with the help of a neural network.

Keywords Refractive index, optical metrology, additive manufacturing, stereolithography

1 Einleitung

In vielen Bereichen und Anwendungen ist eine ortsauflösende Vermessung des Brechungsindexes wünschenswert. Dies trifft auch auf die additive Fertigung von optischen Komponenten zu und gilt vor allem im speziellen Fall der Photopolymerisation von flüssigen Harzen durch UV Bestrahlung.

Ein entsprechender Versuchsaufbau, welcher die Untersuchung der Aushärtung von photonsensitiven Polymeren ermöglicht, ist in Abbildung 1 gezeigt. Wie in Abbildung a) zu erkennen, wird das Licht mit Hilfe eines UV Projektors (Wintech Pro4500, $\lambda = 450\text{nm}$, 912×1140 Pixel) in Form einer Pixelmaske erzeugt (Intel DLP System). Ein einzelnes Pixel weist dabei eine Kantenlänge von $35\mu\text{m}$ auf. Das eingestellte Maskendesign wird über einen Umlenkspiegel und ein Objektträgerglas (Substrat) auf das flüssige Polymer abgebildet, um dieses auszuhärten (s. Abbildung b). Dabei härtet lediglich das Polymer in den belichteten Bereichen aus, wobei es auch zu einem Übersprechen der einzelnen aktiven Pixel in Nachbarbereiche kommt. Da der sich einstellende finale Brechungsindex vom Aushärtegrad des Polymers sensitiv abhängt, ist direkt einsichtig, dass je nach Maske sich lokal unterschiedliche Brechungsindexe ergeben können. Ein mögliches Maskendesign ist in Abb. c) dargestellt. Hierbei wurde jede zweite Pixelspalte aktiviert. Zusätzlich ist auch zu erkennen, dass fertigungsbedingt die einzelnen Pixel in der Mitte einen „schwarzen Punkt“, also einen Bereich aufweisen, in dem sie kein UV Licht auf die Probe senden können. Auch dies führt aufgrund der Inhomogenität in der Bestrahlung zu einer Inhomogenität in der Brechungsindexverteilung.

Da also die lokale UV Bestrahlungsstärke den lokalen Aushärtegrad des Polymers bestimmt, und dieser wiederum mit dem sich dabei ergebenden Brechungsindex korreliert, kann so über die Prozessparameter die lokale Eigenschaft einer additiv gefertigten Optik manipuliert werden. Um für eine gewünschte Brechungsindexverteilung die richtigen Prozessparameter einstellen zu können, ist vorab der nichtlineare Zusammenhang zwischen Prozessparameter (lokale Bestrahlungsstärke) und lokaler Brechungsindex zu erarbeiten. Dies erfordert eine orts- und zeitaufgelöste Messung des Brechungsindexes während der Bestrahlung, welche hier diskutiert werden soll.

2 Experimenteller Aufbau

Der realisierte Messaufbau zur örtlichen und zeitlichen Vermessung des Brechungsindexes ist in Abbildung 2 dargestellt und stellt eine Weiterentwicklung ([1], [2]) des in der Literatur diskutierten scanning focused refractive index microscopes dar [3]. Auf einem Prisma

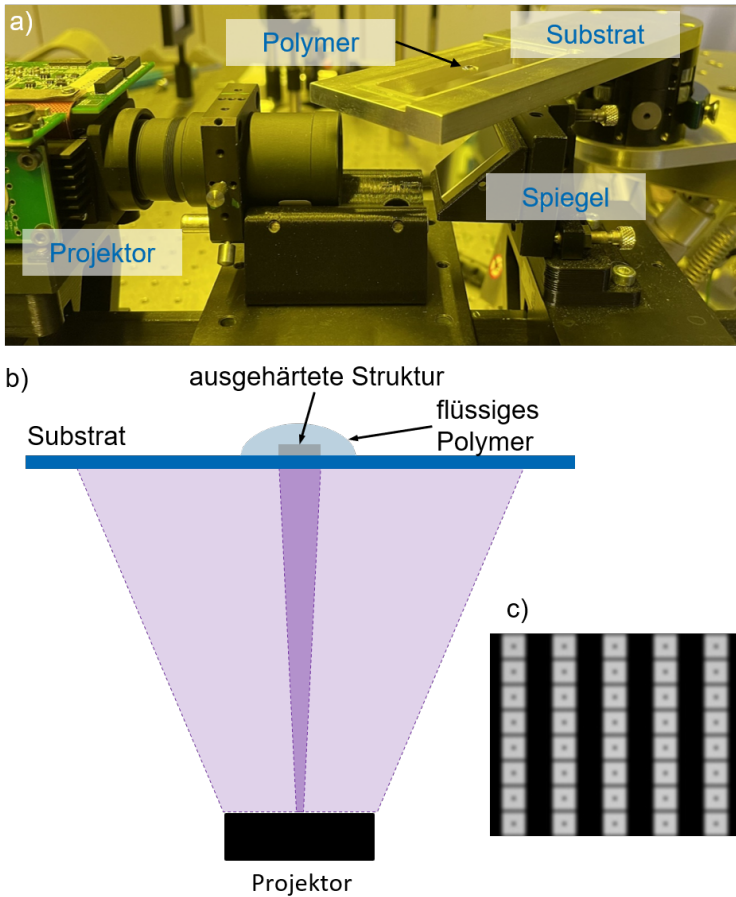


Abbildung 1: a) Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der UV Aushärtung von Photopolymeren; b) schematische Darstellung des Lichtwegs; c) Beispiel einer Pixel-basierten Beleuchtung: alternierend wurde eine Pixelspalte an bzw. aus geschaltet. In der Mitte eines jeden Pixels ist ein fertigungsbedingter „Totbereich“ zu erkennen.

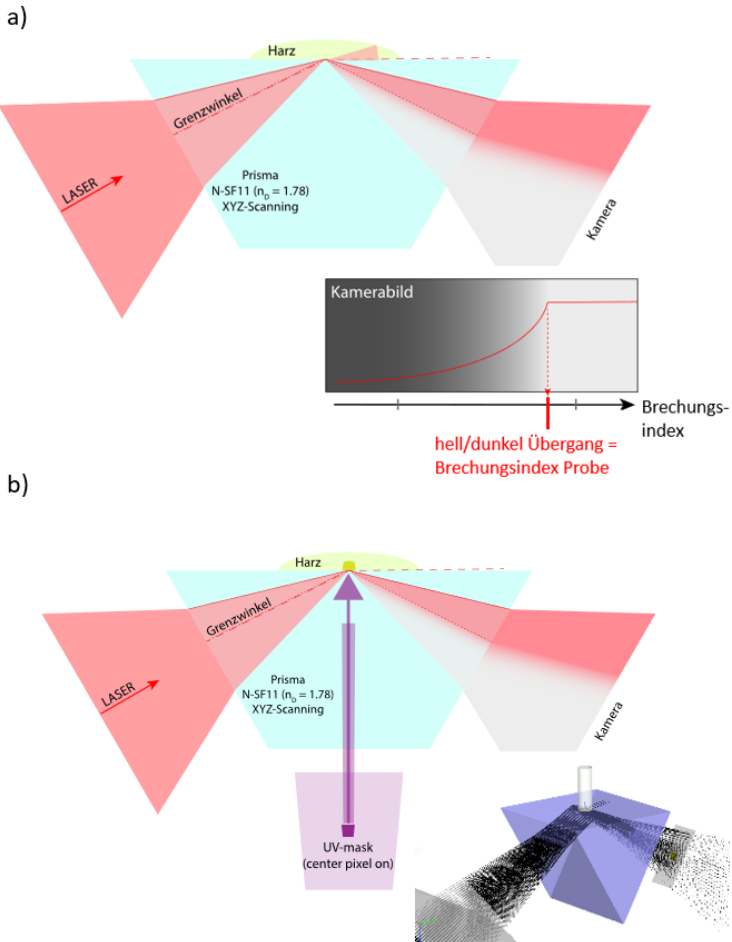


Abbildung 2: a) SFRIM – optisch Vermessung des Brechungsindexes basierend auf Total-reflexion. b) Weiterentwicklung: LineSFRIM – zeitlich und orts aufgelöste Vermessung des Brechungsindexes während der UV Polymerisation.

(Abbildung a) / SFRIM Verfahren) befindet sich die zu untersuchende Probe – z.B. ein flüssiges Polymer, dessen Brechungsindex bestimmt werden soll oder eine plane Probe, welche über eine „Index-matching“ Flüssigkeit in Kontakt mit dem Prisma gebracht wird. Ein Laserstrahl wird auf die Grenzfläche zwischen Probe und Prisma fokussiert. Aufgrund der Fokussierung treffen Lichtstrahlen aus einem bestimmten Winkelbereich auf die Probe. Diese Lichtstrahlen werden entsprechend der Bedingung für Totalreflexion entweder total reflektiert, oder aus dem Prisma ausgekoppelt. Der kritische Winkel, unter dem Totalreflexion auftritt, ist dabei gegeben durch:

$$\theta_c = \arcsin \left(\frac{n_{\text{Probe}}}{n_{\text{Prisma}}} \right)$$

Durch Bestimmung des kritischen Winkels kann also auf den Brechungsindex der Probe zurück geschlossen werden.

Wird nun über einen Kamera Chip das total reflektierte Licht aufgenommen, so kann aus der Position der Kante des hell – dunkel Übergangs der Totalreflexionswinkel und damit direkt der lokale Brechungsindex (gemittelt über die Fläche des Fokuspunktes des Laserstrahls - hier Durchmesser ca. 2 μm) der Probe bestimmt werden. Für eine quantitative Auswertung ist dabei vorab eine Kalibrierung des Systems (bzw. der hell - dunkel Kante) mit Proben mit bekanntem Brechungsindex notwendig. Hierzu wurde eine Bandbreite von kommerziellen Index-Matching Gele verwendet.

Grundsätzlich kann so im Fokuspunkt des Lasers der Brechungsindex der Probe bestimmt werden. Um eine orts aufgelöste Messung zu ermöglichen, wird über einen x-y Verschiebetisch das Prisma relativ zum Laserstrahl bewegt. Letztendlich erhält man dadurch eine 2dimensionale Vermessung der Brechungsindexverteilung an der Oberfläche der Probe mit einer Auflösung von 2 μm . Eine zeitlich aufgelöste Messung der Aushärtung des Polymers ist in dieser Konfiguration nicht möglich.

Für eine zeitaufgelöste Vermessung der Brechungsindexverteilung während der Aushärtung wurde das System modifiziert (s. Abb. b / LineSFRIM Verfahren). In diesem Fall wird statt eines punktförmigen Fokus ein linienförmiger Fokus auf das Interface Prisma / Probe gebracht. Es ergibt sich somit die Möglichkeit einer orts aufgelösten Vermessung der Brechungsindexverteilung entlang der Fokuslinie. Des Weiteren wird der oben erwähnte UV Projektor zur Aushärtung

des Polymers mit in den Aufbau integriert, um das Polymer auszuhärten und parallel die Brechungsindexänderung entlang der Fokuslinie während des Aushärtevorgangs untersuchen zu können. Die zeitliche Auflösung des Systems ist dabei durch die Framerate der Kamera bestimmt.

3 Ergebnisse

In Abbildung 3 sind Ergebnisse der beiden Verfahren SFRIM und LineSFRIM gegenübergestellt. Wie im jeweiligen rechten Bildabschnitt zu erkennen, wurde als Maske für den Projektor ein alternierendes Muster aus jeweils 5 angeschalteten Pixelreihen (helle Reihen) und 5 ausgeschalteten Pixelreihen (dunkle Bereiche) zur Aushärtung verwendet. Jedes aktive Pixel führt dabei zu einer lokalen Aushärtung des UV Polymers am Interface des Prismas und damit zu einer Änderung des Brechungsindex.

Betrachtet werden soll zunächst die punktförmige Messung basierend auf der SFRIM Methode, welche in Abbildung a) gezeigt ist. Das Ergebnisbild ist durch ein abscannen der Probe in y-Richtung (senkrecht zu den aktivierten Pixelreihen / gelbe Punkte) über einen Bereich von ca. 0,5mm entstanden. Jede horizontale Zeile im Ergebnisbild entspricht dabei einer Messung für einen bestimmten y-Wert auf der Probe. In dieser Messung wird der hell-dunkel Übergang mit Hilfe der Kamera aufgenommen und als Zeile im Ergebnisbild dargestellt. Die x-Achse im Ergebnisbild entspricht damit dem Brechungsindex. Wie in der Abbildung zu erkennen, zeigt sich entlang der punktierten Linie eine Erhöhung des Brechungsindex (hell - dunkel Kante „wandert nach rechts“) für den Fall, dass eine Aushärtung der Probe stattfindet. In den unbeleuchteten Bereichen bleibt die Position bzw. der Brechungsindex unverändert.

In Abbildung b) wird der Versuch wiederholt, nur wird zur Vermessung der Brechungsindexverteilung das LineSFRIM Verfahren verwendet. Aufgrund dessen, dass der Linienfokus (gelbe Linie) den kompletten Bereich überstreicht, handelt es sich hier um eine einzige Messung, d.h. das dargestellte Ergebnisbild entspricht einer einzigen Aufnahme. Es ist erneut eine identische Ausprägung der Brechungsindexverteilung zu verzeichnen. Allerdings ist dabei auch ein wesentlicher

Nachteil dieser 20x schnelleren „one shot“ Methode zu erkennen: die örtliche Auflösung ist reduziert. Dennoch ist sie ausreichend, um zeitliche Vorgänge während der UV Bestrahlung zu untersuchen.

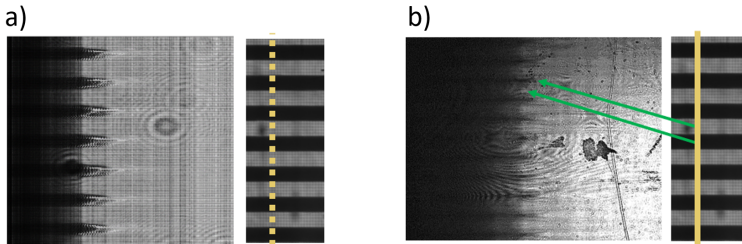


Abbildung 3: a) SFRIM und b) LineSRIM Vermessung der Brechungsindexverteilung nach der Aushärtung eines Polymers mit Hilfe eines Linienmusters einer UV DMD Beleuchtung.

In Abbildung 4 ist eine zeitaufgelöste Messung der Brechungsindexverteilung während der Aushärtung mit Hilfe der LineSFRIM Methode gezeigt. Abbildung a) zeigt die schematische Anordnung in Seiten- und Draufsicht. Auf das Polymer wird in diesem Fall ein UV Puls (violett) mit Hilfe einer UV LED oberhalb des Polymers gegeben, welcher zur Aushärtung führt. In y-Richtung wird mit Hilfe des Linienfokus (grün) zeitaufgelöst die Brechungsindexverteilung entlang des Linienfokus auf der Probe gemessen. Abbildung b) zeigt die Aufnahme vor der Belichtung. Entlang der Linie ist ein homogener Brechungsindex zu verzeichnen. Erfolgt nun der UV Puls, so kommt es zur Aushärtung und damit zu einer Brechungsindexänderung in diesem Bereich. Dies äußert sich im Bild durch die lokale Verschiebung des hell / dunkel Übergangs in x-Richtung (Abbildung c) Aufnahme nach ca. 0.5s). Der Brechungsindex steigt im belichteten Bereich weiter an und erreicht einen Maximalwert nach ca. 1 Sekunde (Abbildung d). Im weiteren folgt eine Verbreiterung des Aushärtebereichs in y-Richtung, bis letztendlich ca. 1/2 des betrachteten Bereiches in y-Richtung ausgehärtet ist. Auf diese Weise kann somit über die Brechungsindexverteilung die Kinetik der Aushärtung untersucht werden.

Nach einer entsprechenden Kalibrierung des Bildes, kann aus diesem die Information des lokalen schwarz / weiß Übergangs in eine Darstellung des Brechungsindexes gegenüber dem Ort aufgetragen wer-

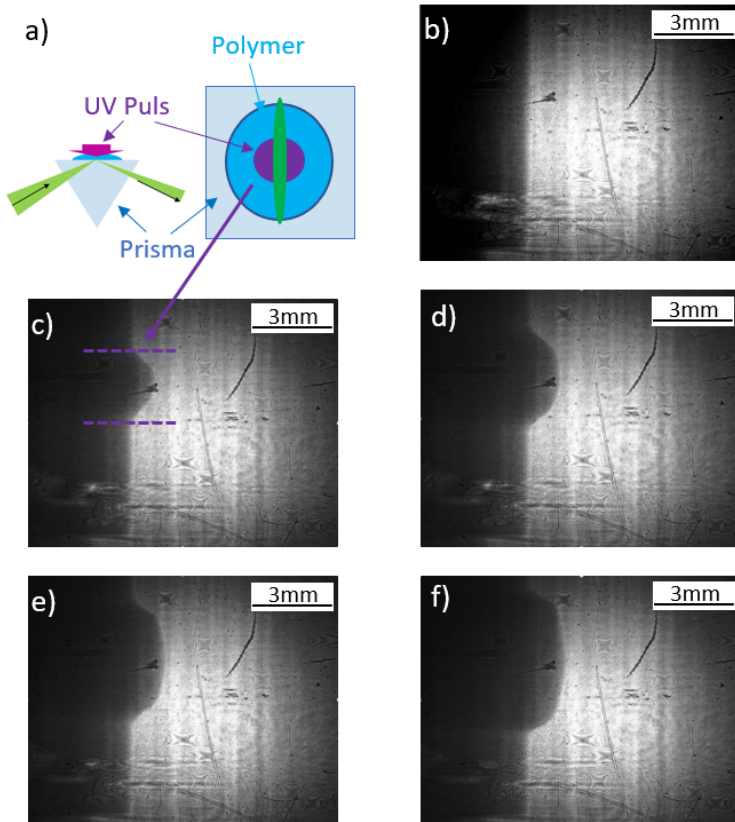


Abbildung 4: a) SFRIM und b) LineSRIM Vermessung der Brechungsindexverteilung nach der Aushärtung eines Polymers mit Hilfe eines Linienmusters einer UV DMD Beleuchtung.

den, wie es in Abbildung 5 dargestellt ist. Die Abbildung zeigt dabei den Brechungsindexverlauf entlang der y-Richtung vor der Belichtung (Start) und nach mehreren sequentiellen Belichtungen mit Hilfe des Projektors. Als Belichtungsmaske wurde dabei eine Sequenz von 10 angeschalteten und 5 ausgeschalteten Pixeln verwendet - beginnend mit 108 mJ/cm^2 , gefolgt mit einer erhöhten Dosis von 215 mJ/cm^2 und abschließend eine Bestrahlung mit allen angeschalteten Pixeln bei 855 mJ/cm^2 . Wie zu erkennen ist, zeigt sich noch eine klare Differenzierung zwischen aktiven und nicht aktiven Pixel und ein daraus resultierender ausgehärteter und nicht ausgehärteter Bereich für die geringste Energiedosis. Bei höherer Dosis zeigt sich ein Überstrahlen in eigentlich nicht beleuchtete Bereiche, so dass es auch dort zur Aushärtung kommt. Es zeigt sich aber auch, dass bei einer kompletten Beleuchtung der Probe, bei der alle Pixel aktiviert wurden, Variationen im Brechungsindex und damit im Aushärtegrad in den Bereichen der ursprünglich nicht aktiven Pixel vorliegen.

Zur Auswertung selbst wurden dabei 2 Vorgehensweisen gewählt – zum einen eine klassische Auswertung des Fresnel Fits und zum anderen die Auswertung über ein neuronales Netz, welches ein identisches Ergebnis liefert aber um 2 Größenordnungen schneller die Auswertung durchführt. Für den Aufbau des neuronalen Netzes wurde das „Neural Net Fitting“ Tool von Matlab genutzt. Die Größe der Eingangsschicht entspricht dabei der Pixelanzahl einer Bildzeile (1280). Im verwendeten Netz werden in den „hidden layers“ 50 Neuronen verknüpft. Die Ausgangsschicht reduziert das Ergebnis auf nur einen Ausgabewert, so dass jede Bildzeile mit einem Grauwertverlauf über 1280 Pixel eine Position der hell - dunkel Kante zugeordnet wird, was dem Brechungsindex entspricht. Die zum Anlernen des Netzes notwendigen Trainingsdaten wurden synthetisch über den theoretisch bekannten Verlauf der Fresnel-Reflexionen generiert.

4 Zusammenfassung

Zusammengefasst wurde ein bildbasiertes Messsystem für die örtlich und zeitlich aufgelöste Vermessung der Brechungsindexverteilung realisiert. Dieses kann für die Untersuchung des Aushärteverhaltens im Bereich der additiven Fertigung von optischen Komponenten einge-

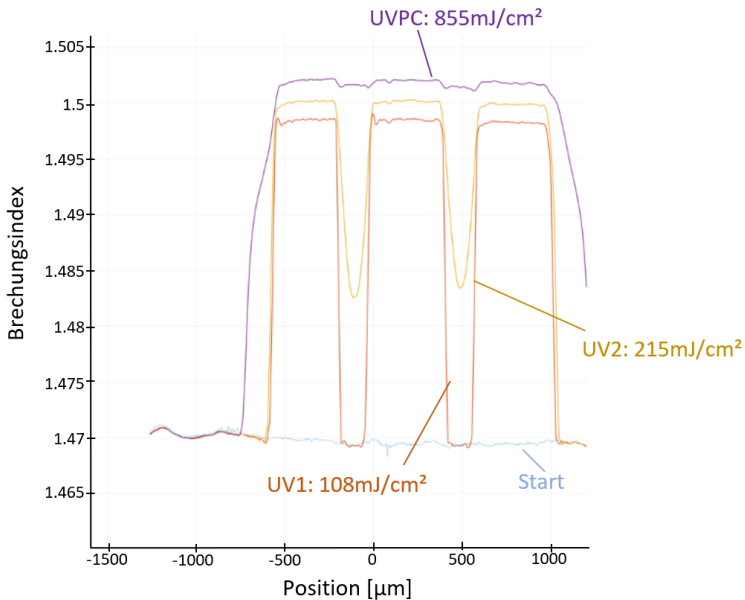


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der Brechungsindex-Verteilung während der UV Aushärtung eines Polymers. (Start: blaue Linie; rote und gelbe Linie: on / off Modus einzelner Pixelreihen bei 108mJ/cm² und 215 mJ/cm²; violette Linie: alle Pixel des UV Projektes aktiviert)

setzt werden. Eine wesentliche Beschleunigung der Auswertung ergab sich dabei durch den Einsatz eines neuronalen Netzes, so dass das System auch eine „online“ Auswertung des Messergebnisses für zeitlich aufgelöste Vorgänge ermöglicht.

Literatur

1. M. Rank and A. Heinrich, "Measurement and use of the refractive index distribution in optical elements created by additive manufacturing," in *Proc. 10930, Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics*; doi: 10.1117/12.2507262, Aalen, Germany, May 2019.
2. A. Heinrich, "3d printing of optical components," in *3D Printing of Opti-*

cal Components, Springer Series in Optical Sciences, ISBN 978-3-030-58959-2, Aalen, Germany, March 2021.

3. T. Sun, Q. Ye, and X. Wang, "Scanning focused refractive-index microscopy," in *Sci Rep* 4, 5647 <https://doi.org/10.1038/srep05647>, Tianjin, China, July 2014.