

Empirisches Modell für elektrisch deformierte Linsen

Mike Dohmen*, Andreas Heinrich*, Cornelius Neumann**

*Aalen School of Applied Photonics, Hochschule Aalen

**Lichttechnisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie

<mailto:mike.dohmen@hs-aalen.de>

Mikrolinsen werden durch elektrische Deformation flüssiger Polymertropfen erzeugt. Mit Bildverarbeitung, FEM-Simulation und empirischer Modellierung lassen sich Geometrie und Fokuspunkt empirisch vorhersagen. Das Verfahren hat potential für eine schnelle, anpassbare Linsenfertigung.

1 Einführung

Die Miniaturisierung optischer Systeme erfordert neue Ansätze zur Herstellung funktionaler Mikrooptiken. In dieser Arbeit präsentieren wir ein Verfahren zur Herstellung individualisierter Mikrolinsen durch die kontrollierte Deformation flüssiger Polymertropfen in statischen elektrischen Feldern. In Abb. 1 sind solche mikrolinsen in Form von Tropfen dargestellt.

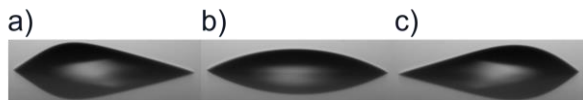


Abb. 1 Beispiele für elektrisch deformierte Polymertropfen. Die Linsenform wird durch die Position der Anode relativ zum Tropfen gesteuert: a) linksseitige, b) mittige und c) rechtsseitige Anodenposition.

Das Verfahren ist auf planaren Substraten sowie Faserendflächen anwendbar und die Linsen können durch UV-Licht ausgehärtet werden. Da dieser Prozess bisher nur deskriptiv beschrieben wurde, ist eine präzise Formvorhersage essentiell. Der hier vorgestellte Ansatz kombiniert experimentelle Bildgebung, FEM-Simulationen und empirische Modellbildung, um die Tropfenform gezielt vorherzusagen.

2 Experimenteller Aufbau und Material

Das zentrale Element des Aufbaus ist eine Schattenwurf Anordnung kombiniert mit einer elektrischen Deformationseinheit. Mit der Deformationseinheit ist ein Hochspannungsgerät verbunden, das von -3 kV bis 3 kV Hochspannung anlegen kann. Die Anode kann durch eine XYZ-Verstellung variiert werden. Kathode kann zur Fokussierung im Bild justiert werden. In dieser Arbeit wird ein modifiziertes PR48-Photopolymer eingesetzt ($\epsilon = 12.77$). Die Tropfenkontur wird aus den Bildern durch eine Kombination aus Superpixel-Segmentierung, Lazy Snapping und Active Contours extrahiert.

3 Numerische Modellierung

Zur Erstellung des empirischen Modells ist es wichtig, das elektrische Feld bzw. die elektrische Feldverteilung zu kennen. Dies wird hier durch eine FEM Simulation bewerkstelligt. Dazu wird die MATLAB PDE-Toolbox verwendet und das Modell wird aus

den bekannten Materialparametern und den extrahierten Konturen des Tropfens und der Anode aufgebaut. Die Feldverteilung E ergibt sich aus dem Potential ∇V . Eine solche Simulation ist in Abb. 2 dargestellt.

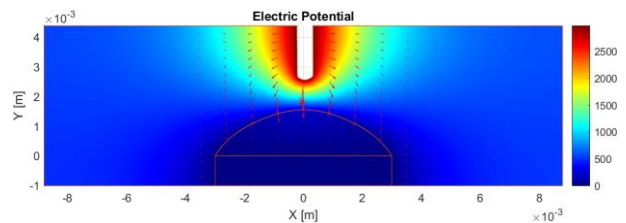


Abb. 2 FEM-Simulation des elektrischen Feldes in MATLAB. Dargestellt ist das elektrische Potential (Farbkodierung) und die elektrischen Feldlinien (Pfeile) um den Tropfen und die Anode bei einer Spannung von 3000 V.

Mit dem elektrischen Feld kann der Maxwell'sche Spannungstensor zur einer Kraftdichteverteilung f_e entlang der Tropfengrenze berechnet werden [1]:

$$f_{e,i} = T_i * n_i = \begin{bmatrix} T_{xx} * n_x & T_{xy} * n_y \\ T_{yx} * n_x & T_{yy} * n_y \end{bmatrix} \quad 1$$

In Abb. 3 ist der Tropfen in der Simulationsumgebung zu sehen, mit der lokalen Kraftverteilung $f_{e,i}$ entlang der Tropfenoberfläche.

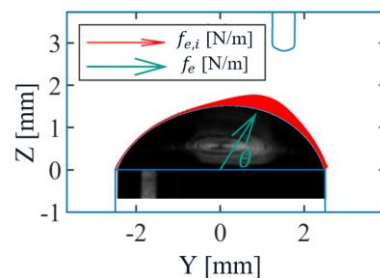


Abb. 3 Berechnete Kraftdichteverteilungen auf der Tropfenkontur. Die roten Pfeile $f_{e,i}$ stellen die lokale Kraftdichte dar, während der grüne Vektor f_e die aufsummierte Gesamtkraftdichte zeigt. Dessen Winkel θ dient als Eingangsparameter für das empirische Modell.

Wird diese lokale Kraftdichteverteilung aufsummiert, so kann eine Gesamtkraftdichte f_e berechnet werden. Da $f_{e,i}$ vektoren sind, ergibt sich für die Gesamtkraftdichte ein Winkel θ vom Vektor mit der x

Achse. In grün ist diese inklusive Winkel eingezeichnet. Die angelegte Spannung und der Winkel wird zur empirischen Modellbildung herangezogen.

4 Empirisches Modell zur Formvorhersage

Zur Vorhersage der Tropfenform muss der Tropfen durch einige wenige Parameter definierbar sein, die dann im Modell vom Winkel und der Spannung abhängen. Es werden sechs Parameter verwendet: Kontaktwinkel links/rechts (θ_L, θ_R), Apex-Position (x, y), Durchmesser und Apexkrümmung am Scheitel. Die Form wird über ein stückweise zusammengesetztes Modell aus Linien- und Kreissegmenten rekonstruiert, gefolgt von einer Polynomapproximation der 8. Ordnung. Der mittlere Fehler der Rekonstruktion beträgt unter 1 % des Durchmessers. Mit dem experimentellen Setup wurden zwei Sets an Experimenten durchgeführt. Zur Entwicklung des empirischen Modells wurden 19 Anodenpositionen mit den je 3 Spannungsstufen 1000V, 2000V und 3000V durchgeführt. Zur Validierung wurden 45 weitere versuche im gleichen variablenraum durchgeführt. Die Parameter werden in Abhängigkeit vom elektrischen Feldwinkel θ und der Spannung V modelliert. Dies ist in Abb. 4 dargestellt.

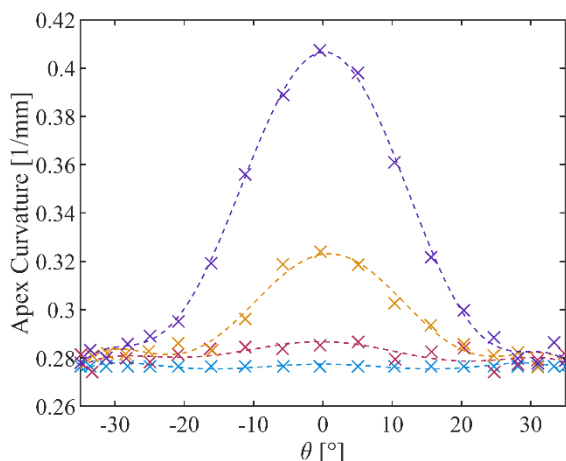


Abb. 4 Apex-Krümmung als Funktion des elektrischen Feldwinkels θ . Kreuze zeigen die experimentellen Daten bei 0 V (hellblau), 1000 V (rot), 2000 V (gelb) und 3000 V (lila). Die gestrichelten Linien stellen die Approximation durch das empirische Modell aus Gl. 2 dar.

Hier ist beispielhaft die Apex Krümmung über den Verlauf dargestellt. Farblich kodiert sind die Spannungsstufen 0V, 1000V, 2000V und 3000V dargestellt. Diese Rohdaten wurden nun mit einer summe aus Sinussen 3.grades approximiert.

$$P(\theta) = a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot \theta + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot \theta + c_2) + a_3 \cdot \sin(b_3 \cdot \theta + c_3) \quad 2$$

Der Parameter $P(\theta)$ wird mit θ als Winkel des elektrischen Feldes und a, b und c als Koeffizienten interpoliert. Diese sind als gestrichelte Linien dargestellt. Eine Interpolation über die Spannung 0–3000 V erlaubt die Vorhersage der Tropfenform für beliebige Konfigurationen. Dies wird überprüft mit den Validierungsdaten, zu sehen in Abb. 5.

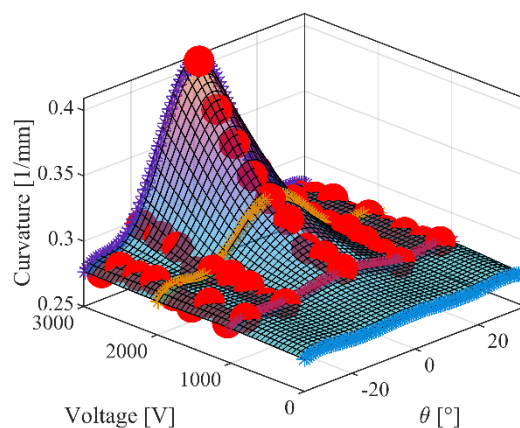


Abb. 5 Validierung des empirischen Modells für die Apex-Krümmung. Die Oberfläche zeigt die Vorhersage des Modells in Abhängigkeit von Spannung V und Feldwinkel θ . Die roten Punkte stellen Messwerte aus einem unabhängigen Validierungsdatensatz dar und bestätigen die gute Vorhersagegüte des Modells.

Es ist zu sehen, dass die Datenpunkte der Validierungsdaten auf der Kurve des Modells liegen.

5 Vorhersage des Fokus

Mit dieser rekonstruierten Tropfengeometrie kann in Lighttools der Fokuspunkt vorausgesagt werden. Die Simulation liefert den Fokuspunkt in x-, y- und z-Richtung. Eine alternative Modellierung erlaubt die direkte Vorhersage des Fokus basierend auf Spannung und Feldwinkel, ohne explizite Geometrierekonstruktion. Die Methode zeigt im Vergleich zur simulationsbasierten Vorhersage eine höhere Genauigkeit, insbesondere in z-Richtung. Die Validierungsdaten zeigen auch hier eine gute Übereinstimmung mit dem Modell.

6 Fazit und Ausblick

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht die Formgebung individualisierter Mikrolinsen durch elektrische Tropfendeformation. Die Kombination aus FEM, empirischer Modellierung und optischer Simulation erlaubt die schnelle Vorhersage der Tropfenform und der optischen Eigenschaften. Die Methode eignet sich für die Entwicklung anwendungsspezifischer Mikrolinsen in Kommunikations-, Beleuchtungs- und Bildgebungssystemen. Künftige Arbeiten sollen das Verfahren auf variierende Materialien, Elektroden Geometrien und zusätzliche optische Kenngrößen erweitern.

7 Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, HE 3533/10-1) gefördert. Wir danken flucon GmbH für die Messung der Permittivität.

Literatur

[1] D. J. Griffiths, *Introduction to electrodynamics*, 4. ed., International ed. in Always learning. Boston: Pearson, 2013.