

# Untersuchung der Reaktion eines Dielektrikums auf elektrische Felder für die Herstellung von Freiform-Mikrolinsen

Selina Burkert\*, Mike Dohmen\*, Andreas Heinrich\*

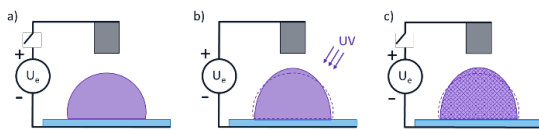
\*Aalen School of Applied Photonics, Hochschule Aalen

<mailto:selina.burkert@hs-aalen.de>

Eine Reduktion optischer Aberrationen von Mikrolinsen lässt sich beispielsweise durch die Ausbildung von Freiformflächen erreichen. Diese Freiform-Mikrolinsen können auch hilfreich sein, um beispielsweise eine spezifische Lichtverteilung zu erzeugen oder effizient Licht in Fasern einzukoppeln. Eine Methode zur Realisierung besteht in der Deformation flüssiger Fotopolymertropfen im elektrischen Feld mit anschließender Aushärtung unter UV-Licht. Die vorliegende Arbeit untersucht die Einflüsse auf die Reaktion des Dielektrikums wie das Linsenvolumen, der Elektrodenabstand und die Intensität des elektrischen Feldes.

## 1 Einführung

Mikrolinsen sind kaum aus ihren Anwendungen in Smartphones, bei der Faserkopplung oder in Array-Beleuchtungen wegzudenken. Zur Optimierung von Auflösung, Effizienz und Homogenität lassen sich optische Aberrationen durch Freiformoberflächen minimieren. Eine Methode zur Herstellung solcher Freiform-Mikrolinsen ist die Anwendung eines definierten elektrischen Felds während des Formgebungsprozesses (vgl. Abb. 1). Dabei wird zuerst ein Fotopolymertropfen auf ein beliebiges Substrat aufgebracht a) und ein elektrisches Feld angelegt b). Die resultierende Linsenform ergibt sich aus der Feldverteilung und der Reaktion des Dielektrikums auf dieses Feld [1]. Durch Variation der Elektrodengeometrie, des Abstands sowie der dielektrischen Eigenschaften des Materials sind komplexere Verformungen als in Abb. 1 dargestellt möglich. Während das elektrische Feld anliegt, wird das Fotopolymer mit UV-Licht ausgehärtet b) und die individuelle Mikrolinsengeometrie bleibt c).

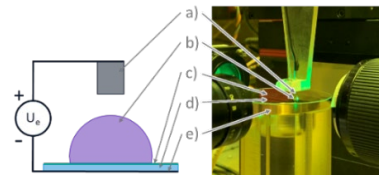


**Abb. 1** Herstellungsprozess einer elektrisch deformierten Mikrolinse. a) Tropfenantrag, b) Tropfendeformation durch eine definierte Feldverteilung und Aushärtung des Fotopolymers, c) Erhalt der Deformation auch nach Ablegen des elektrischen Feldes

Für einen definierten Herstellungsprozess von Freiform-Mikrolinsen soll die Reaktion des Dielektrikums analysiert und modelliert werden. Deshalb werden im Rahmen dieser Arbeit Einflüsse wie der Elektrodenabstand  $D$ , das Tropfenvolumen  $V$ , die Beschleunigung  $dU_e/dt$  und die Polarität des elektrischen Felds untersucht.

## 2 Methodik und Aufbau

Für die Untersuchung der Reaktion eines flüssigen Dielektrikums auf ein angelegtes elektrisches Feld, wurde zunächst ein möglichst einfaches experimentelles Umfeld geschaffen, welches in Abb. 2 dargestellt ist. Die elektrische Einheit des Aufbaus basiert auf einer Zylinder- und einer Plattenelektrode. An die Elektroden werden mit einer Rampe von 200 V/s bis 3000 V/s 3 kV angelegt. Die Tropfendynamik wird mittels Schattenlichtprojektion (530nm) erfasst. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde Glycerin bei 19°C als Dielektrikum verwendet.



**Abb. 2** a) Edelstahlelektrode: Zylinderdurchmesser 1 mm b) Glycerintropfen, c) Hydrophobe Antihafschicht (ASL R36), d) Borosilikatwafer, e) Kupferelektrode

Alle Variablen und die zugehörigen Testbereiche sind in Tab. 1 zusammengefasst.

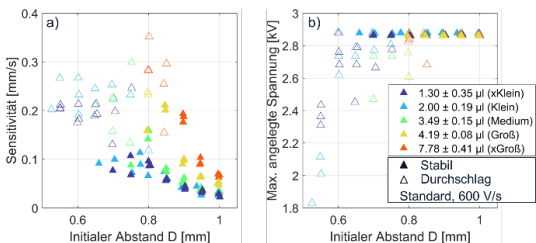
**Tab. 1** Übersicht über die Testvariablen und -bereiche

Variable	Beschreibung
<b>Spitze-Tropfen Abstand D</b> 1 : -0,05 : 0,55 mm *	
<b>Tropfenvolumen V</b> 1,3 : 7,9 µl (5 Volumina)	
<b>Spannungsgradient dU_e/dt</b> 200 : 400 : 3000 V/s	
<b>Feldpolarität</b> standard vs. invers	

\*kleinster Abstand hängt vom Tropfenvolumen ab

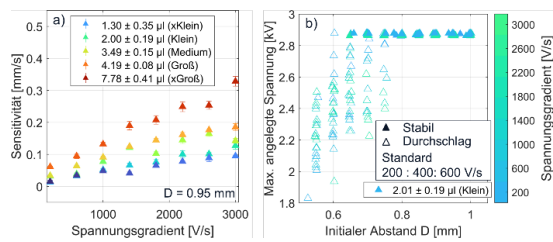
### 3 Ergebnisse und Diskussion

In der Analyse der Tropfendynamik liegt der Fokus auf der **Sensitivität** und der **Durchschlagsfestigkeit**. Die Sensitivität entspricht der maximalen Apexgeschwindigkeit  $dZ/dt$  [mm/s], gemessen über eine Integrationszeit von 0,32 s. Die Durchschlagsfestigkeit wird durch die maximal anlegbare Spannung  $U_e$  [kV] charakterisiert – entweder ohne Luftdurchschlag ( $\blacktriangle$ ) oder mit beobachtetem Durchschlag ( $\triangle$ ). Zuerst wurde in der Standardkonfiguration eine Spannung 3 kV mit 600 V/s angelegt. Für Tropfenvolumina von 1,3  $\mu$ l bis 7,78  $\mu$ l und Elektrodenabstände  $D$  von 0,55 mm bis 1 mm erfolgten jeweils drei Wiederholungen. Die Ergebnisse zur Sensitivität (a) und Durchschlagsfestigkeit (b) sind in Abb. 3 dargestellt. Abb. 3a) zeigt, dass die Tropfensensitivität mit zunehmendem Volumen und abnehmendem Abstand  $D$  deutlich steigt. Danikas et al. erklärt dies mit der elektrische Kraft  $F_e$ , die mit der dritten Potenz des lokalen Krümmungsradius skaliert ( $F_e \sim R^3$ ) [2]. Gleichzeitig überwindet ein größerer Tropfen aufgrund der höheren Bondzahl ( $Bo \sim R^2$ ) leichter die Oberflächenspannung [3]. Außerdem sammeln existieren bei einem größeren Tropfen mehr freie Ladungsträger, die sich an den Grenzflächen ansammeln. Dies führt zu einer Feldverstärkung im Bereich zwischen Spitzenelektrode und Tropfen [4], [5], [6]. Wie Abb. 3b) zeigt, sinkt die Durchschlagsfestigkeit der Luft bei größerem Volumen oder geringerem Abstand  $D$ . Diese Abhängigkeit wird durch das Paschen-Gesetz beschrieben, wonach die Durchbruchspannung  $U_e$  vom Produkt aus Druck  $p$  und Elektrodenabstand  $D$  abhängt ( $U_e \sim p \cdot D$ ) [7].



**Abb. 3** Einfluss des Volumens  $V$  und des initialen Spitze-Tropfen Abstands  $D$  auf die Sensitivität a) und die Durchschlagsfestigkeit b)

Zur Analyse des Einflusses des Spannungsgradienten wurde die Sensitivität bei einem initialen Abstand von 0,95 mm und verschiedenen Volumina über Spannungsraten von 200 V/s bis 3000 V/s in Abb. 5a) dargestellt. Abb. 4b) zeigt exemplarisch die Durchschlagsfestigkeit eines kleinen Tropfens (2,0  $\mu$ l) in Abhängigkeit vom initialen Abstand  $D$  (0,55–1,00 mm). Aus Abb. 4 ergeben sich zwei zentrale Erkenntnisse zur Tropfendynamik. Erstens nimmt die Sensitivität mit steigendem Spannungsgradient zu, wobei eine nichtlineare Abhängigkeit vom Tropfenvolumen besteht. Zweitens bestimmen primär der initiale Abstand  $D$  die Sensitivität und Durchschlagsfestigkeit [2], [7].

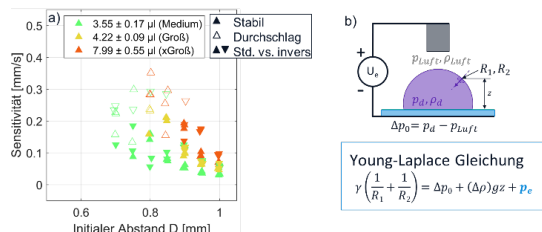


**Abb. 4** Einfluss des Spannungsgradienten des angelegten Felds auf die Sensitivität a) und die Durchschlagsfestigkeit b)

Die gemessene Sensitivität bei Standard- und inverser Polarität des elektrischen Feldes (600 V/s) ist in Abb. 5a für drei exemplarische Volumina dargestellt. Abb. 5b zeigt schematisch das Young-Laplace-Gleichgewicht zwischen Oberflächenspannung  $\gamma$ , initialer Druckdifferenz  $\Delta p_0$ , gravitativer Druckdifferenz  $(\Delta p)gz$  und elektrischem Druck  $p_e$  [9]. Aus Abb. 5a) kann kein signifikanter Einfluss der Polung weder auf die Sensitivität noch auf die Durchschlagsfestigkeit des Tropfens identifiziert werden. Dies spiegelt sich auch in der Gleichung (1) des elektrischen Drucks

$$p_e = \frac{1}{2} (\epsilon_{Luft} - \epsilon_d) \left[ \frac{\epsilon_{Luft}}{\epsilon_d} E_n^2 + E_t^2 \right] \quad (1)$$

wieder. Dabei sind  $\epsilon_{Luft}$ ,  $\epsilon_d$  die Permittivität von Luft und Tropfen.  $E_n$ ,  $E_t$  sind die normal und tangential orientierten elektrischen Feldanteile [9], [10]. Durch die Quadrierung des elektrischen Feldes entfällt eine Richtungsabhängigkeit. Dennoch werden in der Literatur richtungsabhängige elektrochemische Grenzflächenreaktionen bei hohen Feldstärken diskutiert [5].



**Abb. 5** Einfluss der Polarität des angelegten Felds auf die Sensitivität a) und das analytische Gleichgewicht b) zwischen der Oberflächenspannung  $\gamma$ , der initialen Druckdifferenz  $\Delta p_0$ , der gravitativen Druckdifferenz  $(\Delta p)gz$  und dem elektrischen Druck  $p_e$

[1] M. Dohmen, A. Heinrich und C. Neumann, doi: 10.1117/12.3001481.  
 [2] M. Danikas et al.: 10.48084/etasr.3742.  
 [3] J. Berthier und K. A. Brakke, Hg. The physics of microdroplets. Hoboken, N.J., Salem, Mass: John Wiley & Sons Inc, 2012.  
 [4] W. Wang und Y. Su, doi: 10.2991/icmeme-16.2016.43.  
 [5] Y. Ye, H. Jin, M. Zhao, F. Xu und Z. Jiang, doi: 10.3390/ma17112717.  
 [6] H. Tian, C. Wang, J. Shao, Y. Ding und X. Li, doi: 10.1021/la5027043.  
 [7] M. A. Lieberman und A. J. Lichtenberg, Principles of plasma discharges and materials processing, 2. Aufl. Hoboken N.J.: Wiley-Interscience, 2005.  
 [8] A. Bateni et al., doi: 10.1021/la0494167.  
 [9] M. T. Harris und O. A. Basaran, doi: 10.1006/jcis.1995.1107.

Diese Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms FH-Kooperativ (Förderkeennzeichen 13FH080KX1) gefördert.