

Charakterisierung der dielektrischen Barrierentladung von Mikroplasmaaktuatoren in Abhängigkeit der Substratdicke

Silberbauer, Theodor; Lindner, Matthias; Schreiner, Rupert
Ostbayerische Technisch Hochschule Regensburg

Kurzfassung

Gezeigt wird die Realisierung und Charakterisierung von miniaturisierten dielektrischen Barrierentladungen (DBD) die mittels mikroelektromechanischer Methoden (MEMS) auf Dünnschichtsubstraten hergestellt wurden. Im Vergleich zu makroskopischen Plasmaaktuatoren (PA) konnte die Zündspannung deutlich reduziert und der Leistungseintrag erheblich gesteigert werden.

1. Einleitung

Durch den Einsatz von Plasmaaktuatoren auf der Tragflügeloberfläche von Flugzeugen kann durch den induzierten Ionenwind die Grenzschicht beeinflusst werden. Durch Beschleunigung der wandnahen Grenzschicht verschiebt sich der Transitionsbereich weiter in Richtung Downstream, was den Luftwiderstand zu reduzieren hilft und somit Treibstoff einsparen könnte [1]. Die Effizienz konventioneller Aktuatoren ist aufgrund hoher Einsatzspannungen noch zu niedrig. Durch eine Miniaturisierung der Aktuatoren ist es möglich, die Zündspannung deutlich zu reduzieren [2]. Im Rahmen dieses Beitrags wird der Einfluss der Substratdicke auf die Zündspannung und den Leistungseintrag ins Plasma systematisch untersucht. Durch die Verwendung eines geeigneten Substrats (Borofloat-Glas) ist es möglich, trotz reduzierter Substratdicke (wenige 100 μm) einen langzeitstabilen und zuverlässigen Betrieb des PA zu gewährleisten. Dabei konnte die Zündspannung deutlich reduziert ($< 3 \text{ kV}$) und der Leistungseintrag ins Plasma erhöht werden ($> 50 \text{ W/m}$).

Bisher untersuchte PA basieren auf einem Dielektrikum, das mehrere Millimeter dick ist und die Elektroden aus Aluminium oder Kupfer-Klebeband bestehen. Der Nachteil dieser Aktuatoren ist ein sehr hoher Energieverbrauch, welcher vornehmlich einer sehr hohen Betriebsspannung von bis zu 20 kV geschuldet ist [3]. Solch enorme Spannungen haben zudem einen höheren Sicherheitsaspekt bei der Handhabung. Des Weiteren ist die Integration von PA mit großer Substratdicke in glatte Oberflächen ein noch ungelöstes Problem. Vorteile bieten hier MEMS-gefertigte Dünnschichtsubstrate mit Dicken von ca. 100 μm , welche durch das Fertigungsverfahren zusätzlich die Möglichkeit der Substrateinbettung bieten. Hierbei weisen Mikrostrukturen deutlich geringere

Betriebsspannungen auf und bieten somit vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten [1]. Als Grundmaterial der Fabrikation wird das anorganische Substrat Borofloat-Glas bevorzugt, welches bisher die längste Betriebsdauer aufweist.

2. MEMS-Fertigung und Verfahren zur Herstellung

Zu Beginn des Herstellungsprozesses (siehe Abb. 1) wird das Substrat mit Aceton und Isopropanol im Ultraschallbad vorgereinigt. Die Wafer werden mit Fotolack AZ 5214NV und AZ 9260 mithilfe einer Lackschleuder aufgetragen und anschließend mittels optischer Lithographie strukturiert. Bei der Lithographie Abfolge werden im ersten Schritt mit einer lasergeschriebenen Maske Strukturen auf einen Fotolack übertragen. Dieser Prozessschritt ist in Abb. 1b schematisch gezeigt.

Anschließend wird durch physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) das Substrat metallisiert. Um die Haftung vom Metall zum Glas zu verbessern, wird Chrom als Haftvermittler verwendet. Die Elektroden wurden mit Nickel und Titan realisiert, da sich bei Tests gezeigt hat, dass diese Metalle eine hohe Erosionsbeständigkeit aufweisen [1]. In einem letzten Prozessschritt wird in einem Lift-Off-Prozess der restliche Fotolack und somit das überschüssige und zu viel aufgetragene Metall entfernt.

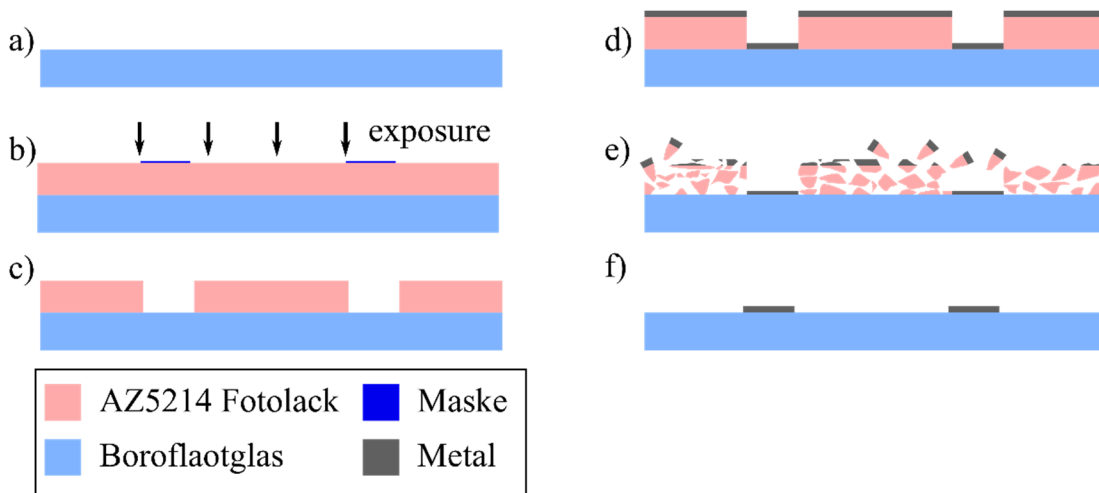


Abb. 1: Skizze der MEMS-Fertigungsprozesse: (a) Die Substrate werden mit Aceton und Isopropanol vorgereinigt. (b) Das Dielektrikum wird mit einem AZ 5214NV-Fotolack beschichtet und mit einer Maske mit UV-Licht belichtet. (c) Die Probe wird nach dem Belichten in einen AZ 726MIF-Entwickler getaucht. (d) Metall wird auf das entwickelte Substrat aufgedampft (PVD). (e) Aceton löst den restlichen Fotolack in einem Lift-Off Prozess. (f) Die Elektroden des PA bleiben auf der Oberfläche erhalten.

Erhalten bleiben die aufgedampften Metallelektroden, dargestellt in Abb. 2. Die Genelektrode („Groundelektrode“) wird auf der Rückseite des Wafers hergestellt. Zur

Isolierung der Masselektrode wurde fließfähiges Silikon (3140 RTV) verwendet, um sicherzustellen, dass sich das Plasma nur an den freiliegenden Elektroden entzündet. Strukturen, welche mit dieser Methode realisiert sind, finden sich in Abb. 3.

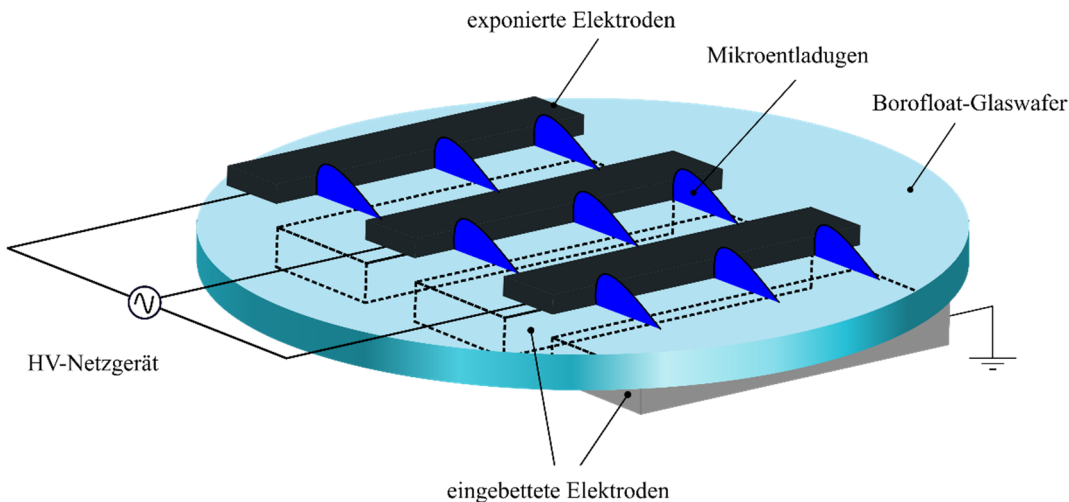
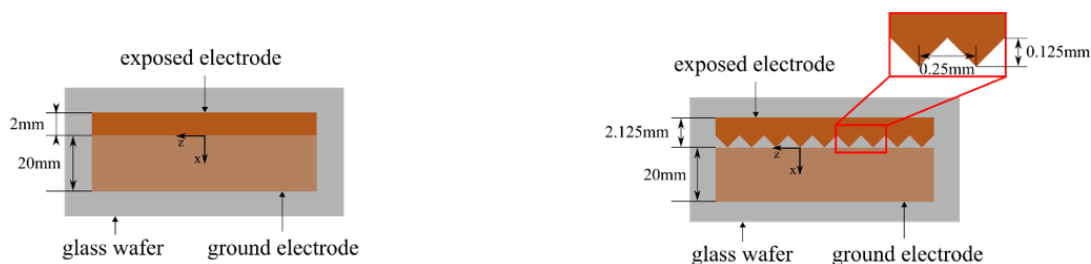
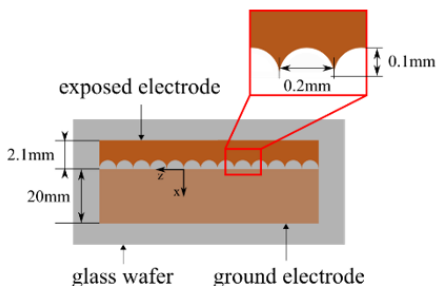


Abb. 2: Skizze eines im Reinraum hergestellten PA. Gezeigt sind die exponierten Elektroden auf der Oberseite sowie die Groundelektroden auf der Unterseite, welche auch eingebettet werden können.

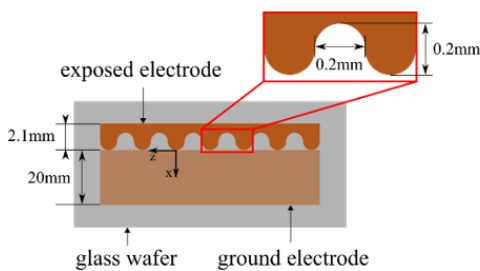


(a) Typ 0 - glatte Elektrode

(b) Typ 1 – spitze Elektrode



(c) Typ 2 – überspitze Elektrode



(d) Typ 3 – wellige Elektrode

Abb. 3: Skizze der realisierten exponierten Elektrodengeometrien. In den Insets der jeweiligen Bilder sind die einzelnen Elektroden dargestellt und zeigen eine Vergrößerung der Geometrien aus der Draufsicht.

Die untersuchten Aktoren wurden auf 4- und 6-Zoll-Substraten realisiert. Als dielektrisches Material wird Borofloat-Glas mit verschiedenen Dicken von 200 μm bis 1000 μm , mit einer Schrittweite von 100 μm verwendet. Die Anpassung der Dielektrikadicken erfolgt durch Waferlappen mit einem Rotopol-35-Schleifgerät. Durch diese Methode ist eine Waferdicke mit einer Genauigkeit von $\pm 20 \mu\text{m}$ möglich.

3. Messaufbau

Alle Teststrukturen werden von einem Sinusfunktionsgenerator (Chroma Model 61603) und einem darauf abgestimmten Hochspannungstransformator (Bremer Transformatoren GmbH) betrieben. Die Messungen sind bei unterschiedlichen Spannungsamplituden, aber mit gleichbleibender Frequenz f von 1 kHz durchgeführt. Die PA wird auf einem eigens konstruierten Polypropylen-Halter montiert, um eine Abschirmung gegenüber Fremdmassen zu gewährleisten. Jeder PA besteht aus einem Elektrodenpaar mit einer Länge l von 5 cm. Diese Mindestlänge ist nötig, um Randeffekte vernachlässigbar klein zu halten, um somit keinen signifikanten Einfluss hinsichtlich ihres Betrags zum Gesamtstromverbrauch zu bewirken. Andernfalls würde dieser Randeffekt die reine Plasmaleistung verfälschen. Die elektrische Charakterisierung erfolgt mittels eines Kondensators, welcher in Reihe zum PA geschaltet ist. Ein Oszilloskop Rode & Schwarz RTO 2034 wurde für die Aufzeichnung der Messdaten verwendet. Die angelegte Gesamtspannung $V(t)$ wird mit einem Tektronix P6015A HV-Tastkopf am Transformator abgegriffen. Der Messaufbau ist in Abb. 4 schematisch dargestellt.

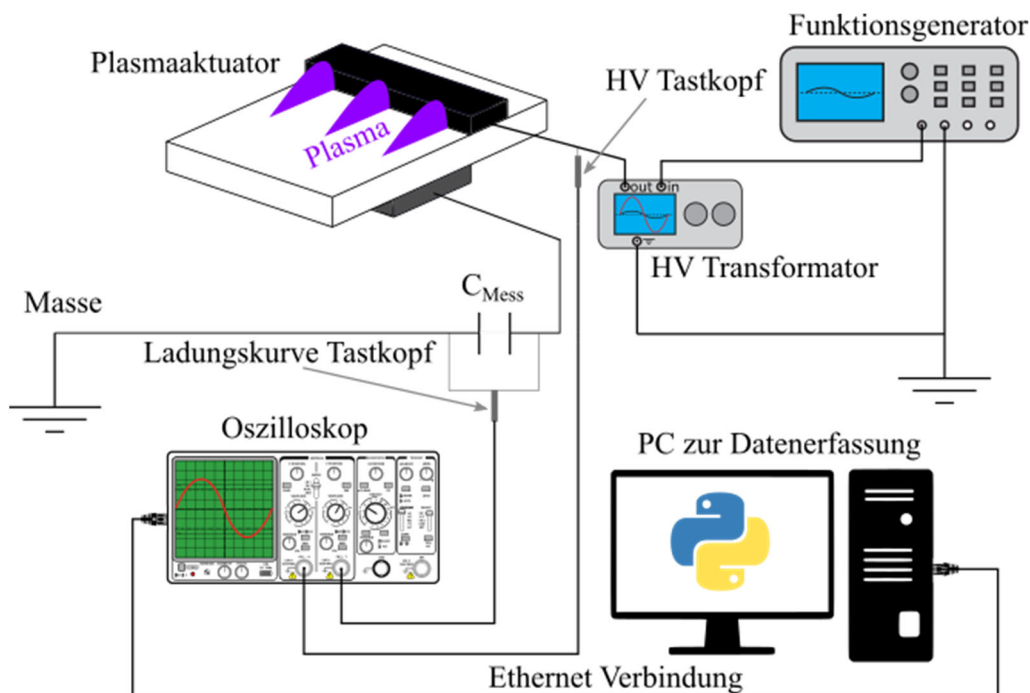


Abb. 4: Messaufbau zur elektrischen Charakterisierung von Plasmaaktoren

Gemessen wird über den Messkondensator C_{Mess} . Wird das zeitliche Spannungssignal $V(t)$ in einem Diagramm auf die Ordinate und das zeitliche Ladungssignal $Q(t)$ auf der Abszisse aufgetragen, zeigt sich im Idealfall bei einer Barrierentladung ein Q-V-Diagramm (siehe Abb. 5). Die Fläche A , welche durch das Diagramm entsteht, entspricht der Energie, die durch die Plasmaentladung pro Entladezyklus verbraucht wird.

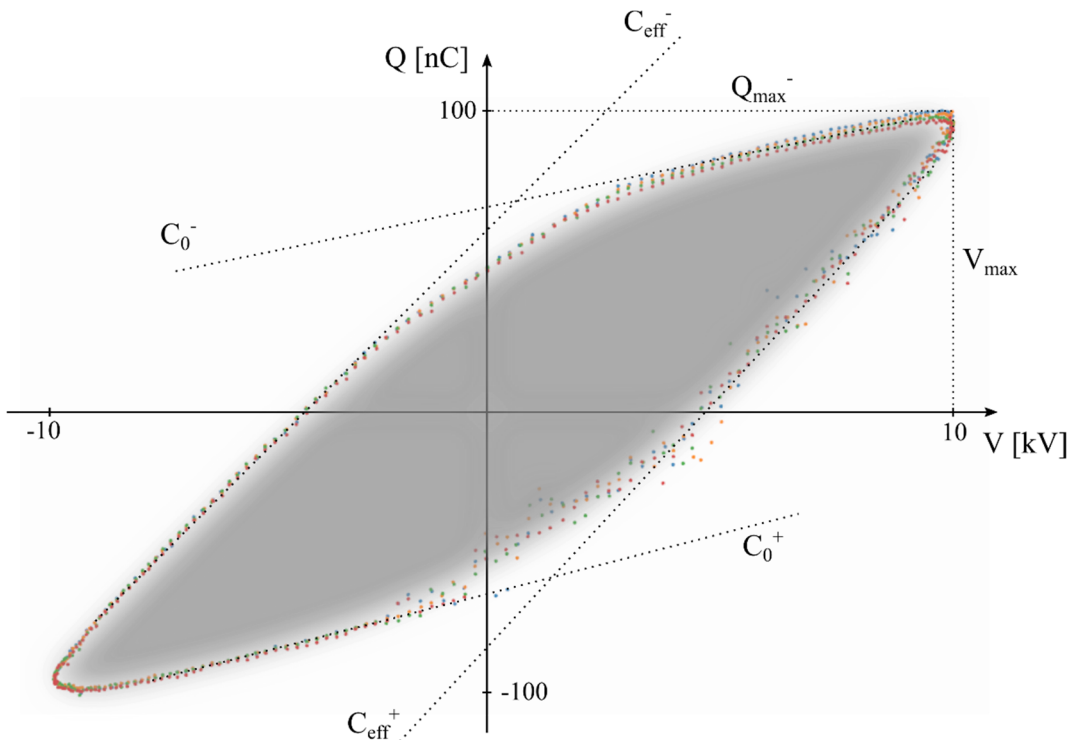


Abb. 5: QV-Diagramm eines DBD PA über mehrere Entladezyklen. Ermittelt werden können die charakteristischen Größen V_{max} , Q_{max} und die Kapazitäten C_0 und C_{eff} .

Der Messkondensator C_{Mess} soll in etwa eine tausendmal größere Kapazität als der PA besitzen ($C_{Mess} = 1000 \cdot C_{PA}$), damit dieser nur ein Tausendstel der Betriebsspannung anliegt. Um die exakten Kapazitäten zu ermitteln, wurde eine 4-Leitermessung mit dem GW Instek 817 LCR-Meter durchgeführt. Die zeitlich gemessene Ladung $Q(t)$ des Messkondensators wurde berechnet mit:

$$Q(t) = C_{Mess} \cdot V(t).$$

Es werden mit dem Oszilloskop pro Aufzeichnung 400 Entladungszyklen aufgenommen, aus denen dann der Mittelwert bestimmt wird. Die Datenaufbereitung, Verarbeitung und Darstellung wurde mittels Python3 durchgeführt. Die am PA anliegende Energie pro Zyklus wird durch Berechnung der vom Zyklusdiagramm aufgespannten Fläche ermittelt durch:

$$E_i = \int_i Q(t) dV.$$

Die daraus resultierende Leistung P , wird mittels der Energie E_i und der angelegten Frequenz f bestimmt mit:

$$P = \frac{f}{i} \sum_{n=0}^N E_i.$$

Eine detailliertere Beschreibung der verwendeten Methoden kann in [2],[4] nachgeschlagen werden.

Wie in Abb. 5 dargestellt, kann sowohl die Gesamtkapazität C_0 des PA als auch die effektive Kapazität C_{eff} des Dielektrikums aus den Steigungen des Entladungszyklogramm bestimmt werden. Die jeweiligen positiven bzw. negativen Halbzyklen des im Idealfall entstehenden Parallelogramms sollten in etwa die selbe gegenüberliegende Steigung aufweisen. Um verschiedene Geometrien und Aktuatoren zu vergleichen, wurde die effektive Leistung auf die Elektrodenlänge normiert (W/m).

4. Ergebnisse

Vermessen wurde zunächst die ins Plasma eingespeiste Leistung der verschiedenen Geometrietypen, siehe Abb. 6. Im Rahmen der Messgenauigkeit wurden keine bedeutenden Auffälligkeiten bei den verschiedenen Geometrietypen hinsichtlich der Leistungseinkopplung festgestellt. Die ins Plasma eingespeiste Leistung ist somit größtenteils unabhängig von der Geometrie der HV-Elektrode. Durch Beobachtungen der Plasmaentladungen konnte jedoch ein Unterschied in der Form des Plasmas festgestellt werden. Bei der glatten Elektrode (Typ 0) entsteht ein gleichförmiges, homogenes Plasma, welche erst bei höheren Spannungen dichtere Entladungskanäle ausbildet. Diese Entladungskanäle konnten bei den strukturierten Elektroden schon bei geringeren Spannungen festgestellt werden und sind auf die Feldüberhöhung an den Elektrodenspitzen zurückzuführen [5]. Obwohl die Leistung sich unwesentlich ändert, bilden sich jedoch durch die Strukturierung lokal dichtere Plasmaentladungen. Durch diese dichteren Plasmaentladungsspots können die höheren Windgeschwindigkeiten des Ionenwindes erklärt werden. Gemessen wurden diese mit einem Pitottube und einem Differenzdruckmessgerät. Der Ionenwind kann somit durch eine Strukturanpassung der HV-Elektrode optimiert werden.

Bei einem weiteren Versuch, siehe Abb. 7, wird die Leistungsaufnahme eines PA in Abhängigkeit der Substratdicke bestimmt. Um die Messwerte miteinander vergleichen zu können, wurden alle HV-Elektroden als Typ 3 ausgeführt. Variiert wurde nur die Substratdicke (Borofloat-Glas). Untersucht wurden die Substratdicken von 200 μm bis 1000 μm in jeweils 100 μm Schritten.

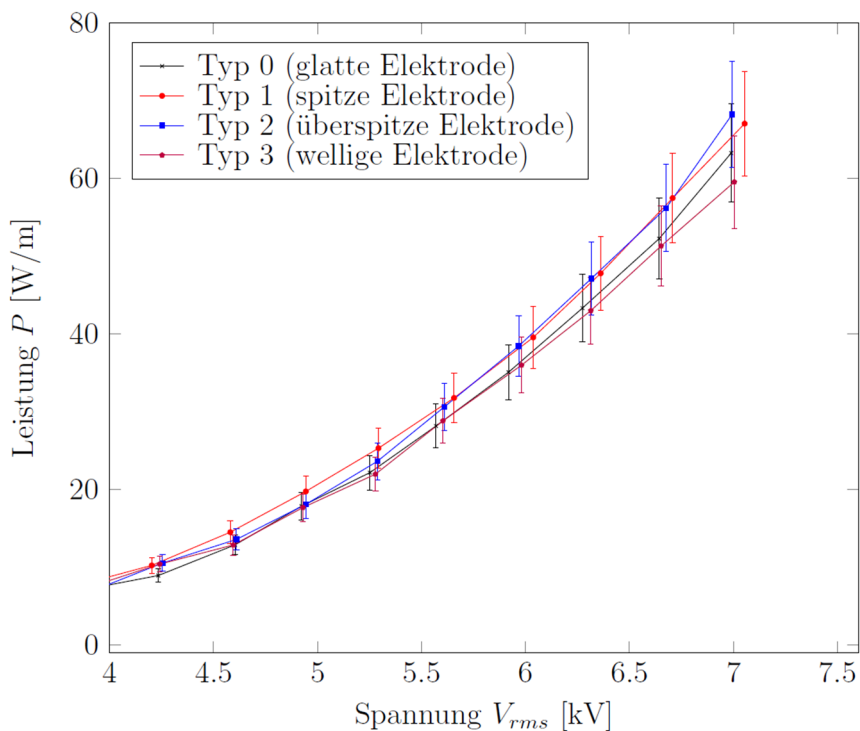


Abb. 6: Elektrische Charakterisierung von Plasmaaktuatoren mit unterschiedlichen Hochspannungselektrodengeometrien (Typen siehe Abb. 3)

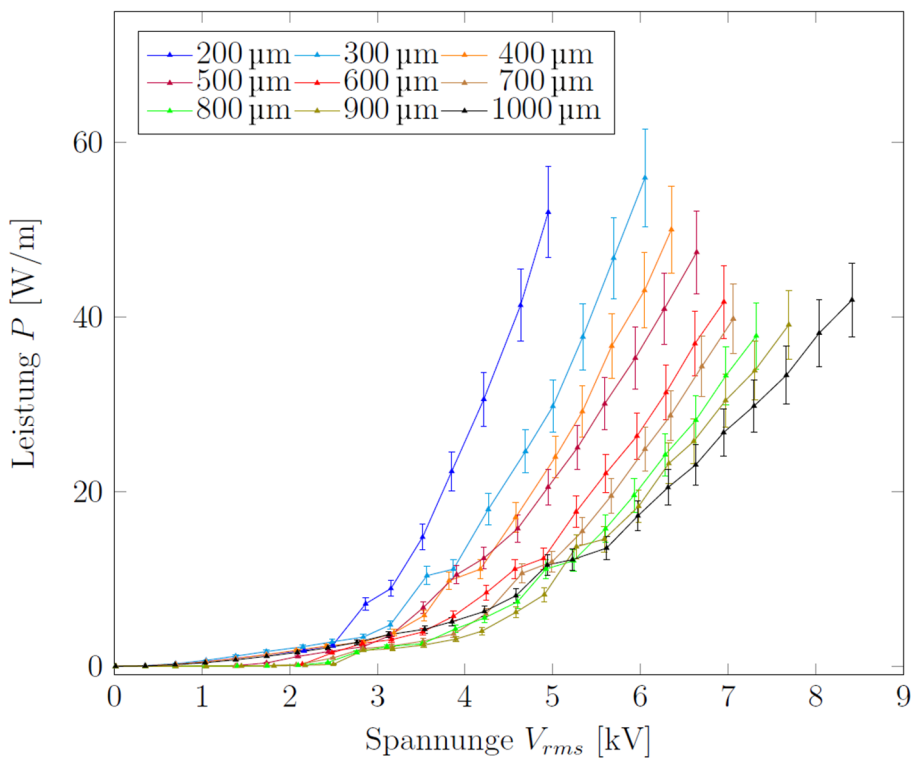


Abb. 7: Graphische Darstellung der Leistung gegenüber der Einsatzspannung bei einer Variation der Substratdicke der Plasmaaktuatoren

Wie aus Abb. 7 ersichtlich, hängt die eingekoppelte Leistung pro Betriebsspannung signifikant von der Substratdicke ab. So wird z.B. eine Leistung von 50 W/m bei dem 200 μm Substrat bereits bei ungefähr 5 kV erreicht, wohingegen bei einem 1000 μm Substrat mehr als 8 kV Betriebsspannung notwendig sind. Betrachtet man alle Graphen, so ist ein steilerer Anstieg der Messkurven für kleinere Schichtdicken ersichtlich.

Durch Variation der Schichtdicke lässt sich somit die Betriebsspannung und auch die Aktuator Effizienz beeinflussen. Wird die Schichtdicke jedoch zu dünn gewählt, kann auf Grund eines elektrischen Durchschlags sehr schnell zur Zerstörung des PA kommen. Für den jeweiligen Anwendungsfall muss somit auch die Lebensdauer des PA mit einbezogen werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde die mikrotechnologische Herstellung und Charakterisierung von PA gezeigt. Zur Messung der Leistungsaufnahme und Kapazität der Aktuatoren wurden ein Q-V-Diagramme verwendet. Hierbei war es wichtig, den Messkondensator auf den zu vermessenden PA anzupassen. Eine Unterscheidung verschieden strukturierter HV-Elektroden hat gezeigt, dass hierbei kein bedeutender Einfluss auf die Leistungsaufnahme des PA besteht. Eine Strukturierung der HV-Elektrode hat jedoch eine Veränderung der Maximalwerte des Ionenwinds zu Folge. Dies wird auf die lokale Feldüberhöhung und ein dichteres Plasma an den Spitzen zurückgeführt. Variiert man die Dicke des Dielektrikums so kann man gezielt die Zündspannung bzw. die Einsatzspannung für eine gewünschte Plasmaleistung einstellen.

Breibt man mehrere Aktuatoren gleichzeitig, so schirmen sich die Elektroden gegenseitig ab. Dieser Effekt soll in Zukunft durch eine phasenverschobene Ansteuerung der Elektroden minimiert werden. Auch die Erzeugung des Ionenwindes durch eine peristaltische Welle [7] (ähnlich einem Linearmotor) bietet vielversprechendes Potenzial und soll in Zukunft untersucht werden.

Literatur

- [1] Lindner, Matthias et al.: Fabrication, surface integration and testing of miniaturized dielectric barrier discharge plasma actuators for active flow control applications. In: AIAA Aviation, 2019.
- [2] Wilke, Jörn Bastian: Aerodynamische Strömungssteuerung mittels dielektrischer Barriereentladungs-Plasmaaktuatoren. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Aerodynamik und Strömungsmechanik, Göttingen, 2009.
- [3] Benard, Nicolas; Moreau, Eric: Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control. In: Experiments in Fluids, 55.11, 2014, p. 1846.

- [4] Pipa, Andrei V.; Brandenburg, Ronny: The Equivalent Circuit Approach for the Electrical Diagnostics of Dielectric Barrier Discharges: The Classical Theory and Recent Developments. In: *Atoms*, 7.1, 2019, p. 14.
- [5] Pescini, Elisa et al.: Electrode material degradation monitoring for durable dielectric barrier discharge plasma actuators manufacturing. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2016.
- [6] Kriegseis, Jochen: Performance Characterization and Quantification of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Dezember 2011.
- [7] Roth, J. Reece: Aerodynamic flow acceleration using paraelectric and peristaltic electrohydrodynamic effects of a one atmosphere uniform glow discharge plasma. In: *Physics of plasmas*, 10(5), Mai 2003, pp. 2117-2126.

Kontakt

Theodor Silberbauer, B.Eng.
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg,
Fakultät Angewandte Natur- und Kulturwissenschaften
Seybothstraße 2
93053 Regensburg
E-Mail: Theodor.Silberbauer@st.oth-regensburg.de