

Integration von Metallfolien in Polymerschichtsysteme mittels Laserdurchstrahlschweißens

Integration of Metal Foils into Polymer Stacks via Laser Welding

Thomas Brettschneider¹, Dr. Christian Dorrer¹, Daniel Czurratis¹, Prof. Dr. Roland Zengerle² und Dr. Martina Daub¹

¹Robert Bosch GmbH, Robert-Bosch-Platz 1, 70839 Gerlingen, Deutschland, thomas.brettschneider2@de.bosch.com

²Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK, 79110 Freiburg, Deutschland

Kurzfassung

Die direkte Metallisierung von Polymeren eröffnet vielfältige Möglichkeiten, nicht nur in Form von Leiterbahnen, sondern auch für eigenständige Funktionen in einem polymeren Bauteil. Hier stellen wir ein laserbasiertes Aufbaukonzept zur Herstellung metallisierter Polymerschichtsysteme vor, welches zur Einbindung neuer Funktionen, beispielsweise bei Lab-on-a-Chip Implementierungen, verwendet werden kann. Als wesentliche Schritte des Prozesses wurden die Verbindung sowie die Strukturierung der Metallfolie mittels Schältests und 3D-Mikroskopie untersucht. Dabei wurden Schältestfestigkeiten von 1,37 N/mm erreicht und minimal realisierbare Strukturgrößen von ca. 20 µm ermittelt. Als Anwendung wird ein Thermoelement Typ T in einem polymeren Schichtaufbau vorgestellt.

Abstract

Direct metallization of polymers opens up versatile possibilities, not only for conductor tracks, but also for autonomous electrical functions inside a polymer device. Here, we present a laser-based assembly concept for the production of metallized polymer stacks which can be used for the integration of new functions, e.g. in the field of lab-on-a-chip solutions. The essential steps of the process, bonding and structuring of the metal foil, were investigated using peel tests and 3D microscopy. As a result, peel strengths of 1.37 N/mm were obtained and minimal structure sizes of ca 20 µm determined. A polymer-integrated thermocouple type T is presented as an application.

1 Einleitung

Zur Einbindung von elektrischer Funktionalität in polymere Systeme spielen Metallisierungstechnologien für Polymeroberflächen eine zentrale Rolle. So lassen sich durch direktes Aufbringen von Leiterbahnen alle Vorteile und Freiheiten moderner Polymerverarbeitung ausnutzen, ohne die mit der sonst notwendigen Integration von Leiterplatten verbundenen Einschränkungen. Speziell im Bereich mikrofluidischer Einwegbauteile sind Polymere aufgrund geringer Herstellungskosten gut geeignet und bieten mit der Möglichkeit, Schichtsysteme herzustellen, vielseitige Freiheiten zur Abbildung mikrofluidischer Strukturen. Die Integration von elektrischen Systemen wie Heizern, Lichtschranken oder Biosensoren eröffnet auch in diesem Bereich vielfältige neue Möglichkeiten und erfordert entsprechende Metallisierungstechnologien, beispielsweise Inkjet Printing [1], Heißprägen von Metallfolien [2], lithographische Methoden [3] oder 3D MID [4]. Alle diese Technologien haben spezifische Vor- und Nachteile und müssen je nach Anwendungsfall ausgewählt werden. Sie haben jedoch gemeinsam, dass es mit der zugrundeliegenden Metallisierungstechnologie nur ein Prozessschritt hin zum Gesamtsystem – z. B. ein Lab-on-a-Chip – abgedeckt wird. Der Aufbau des Gesamtsystems erfolgt mit anderen Technologien und damit verknüpft mit anderen Maschinen und Umgebungsbedingungen. Hier stellen wir ein neues Aufbaukonzept zur Herstellung metallisierter Polymerschichtsysteme mit Hilfe von La-

serdurchstrahlschweißen und Laserstrukturierung vor. Im Gegensatz zu bestehenden Technologien erfolgen dabei alle Arbeitsvorgänge zum Aufbau des Komplettsystems, d. h. Befestigung und Strukturierung der Metallschicht sowie Fügen der Polymere zum mehrlagigen Gesamtsystem, mit einer einzigen Basistechnologie.

2 Prozess der Metallisierung

2.1 Prozessfluss

Der Metallisierungsprozess verläuft in mehreren laserbasierten Stufen, wobei zunächst eine Metallfolie mit dem polymeren Schichtaufbau verbunden und strukturiert wird. In nachfolgenden Schritten kann der metallisierte Aufbau mit weiteren Polymerschichten gedeckelt werden.

Im ersten Schritt (**Bild 1(a)**) wird ein Schichtaufbau bestehend aus einem für die entsprechende Laserwellenlänge transparenten Polymersubstrat, einer absorbierenden Polymermembran und einer Metallfolie hergestellt und anschließend die absorbierende Polymermembran mit einem Laser (Nd:YAG, 1064 nm) erhitzt und dabei verflüssigt. Hierbei kommt es an der Grenzfläche zwischen Polymersubstrat und Polymermembran zu dem beim Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen bekannten Durchmischen der Materialien und nach Abkühlen zu einer dauerhaften Verbindung. Wird die Polymermembran dünn genug gewählt, so dass diese über die gesamte Dicke verflüssigt wird, so führt der gleiche Pro-

zessschritt zu einer Adhäsion zwischen Metallfolie und Polymermembran, welche sich auf eine Mischung aus mechanischer Verzahnung, Van-der-Waals-Kräften oder auch kovalenten Bindungen zurückführen lässt, wobei die Anteile je nach Oberflächenbehandlung von Metallfolie und Polymermembran variieren. Auf diese Weise ist es möglich, den genannten Schichtaufbau in einem einzigen Vorgang zu verbinden, wobei nur diejenigen Flächen bestrahlt werden, auf denen nach der Strukturierung Metall zurückbleiben soll.

In einem zweiten Schritt (Bild 1(b)) wird nun die Metallschicht im so verbundenen Schichtaufbau von der anderen Seite mit einem Laser strukturiert. Hierbei wird die Metallfolie entlang vorgegebener Konturen durchtrennt und auf diese Weise die Geometrie der metallischen Strukturen definiert. Die überschüssige Metallfolie ist nicht mit der Polymermembran verbunden und lässt sich leicht entfernen (Bild 1(c)).

In nachfolgenden Schritten können schließlich weitere Polymerschichten im bekannten Laserschweißprozess mit dem Schichtaufbau verbunden werden (Bild 1(d)). Die Elastizität der Polymermembran führt in diesem Prozessschritt zu einem Eindringen der Metallfolie und verhindert auf diese Weise die Bildung von Spalten an den Kanten der Metallbahnen. Werden die Polymerschichten mit Kanälen und Kavitäten versehen, können speziell in Kombination mit der flexiblen Polymermembran vielfältige mikrofluidische Funktionen bereitgestellt werden, beispielsweise Ventile und Pumpen [6].

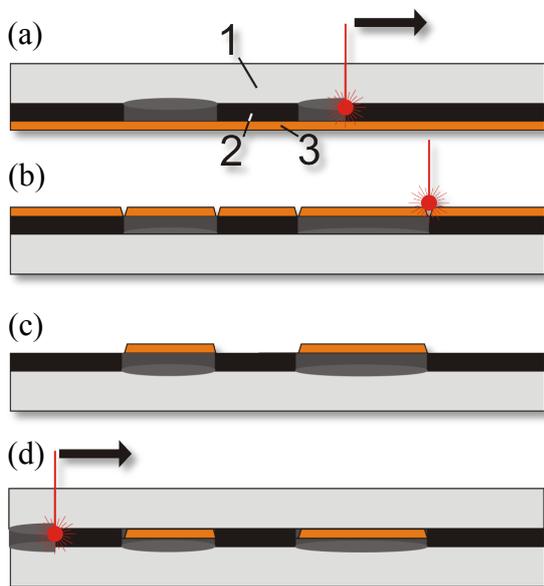


Bild 1 Prozessfluss der Metallisierung: (a) Verbindung von Polymersubstrat 1, Polymermembran 2 und Metallfolie 3 durch Einkopplung von Laserenergie. (b) Strukturierung der Metallfolie. (c) Wegnahme der überschüssigen Metallfolie (d) Deckelung des metallisierten Substrats mit einer weiteren Polymerschicht.

3 Charakterisierung

Zur Charakterisierung des Prozesses wurden die beiden Teilschritte der Verbindung und der Strukturierung genauer untersucht.

3.1 Bestimmung der Schälfestigkeit

Hinsichtlich der Eignung des Prozesses für offene Leiterbahnen oder Kontaktpads, beispielsweise zur Flip-Chip-Kontaktierung von elektronischen Bauelementen, ergeben sich bestimmte Anforderungen an die Schälfestigkeit. Zur Beurteilung des Prozesses wurde die Schälfestigkeit in Abhängigkeit verschiedener Laserparameter sowie Oberflächenbehandlungen der Metallfolie bestimmt. Hierzu wurden nach beschriebener Verfahren Prüfkörper hergestellt. In Anlehnung an [5] wurden pro Prüfkörper vier Leiterbahnen strukturiert ($4 \times 50 \text{ mm}^2$), im Winkel von $90^\circ \pm 4^\circ$ zur Substratoberfläche abgezogen und die hierzu nötige Kraft gemessen (Zwicki 1120, Z2.5, Zwick). Die Schälfestigkeit R_s wird definiert als

$$R_s = \frac{\langle F \rangle}{b}, \quad (1)$$

wobei b die Breite der Leiterbahn und $\langle F \rangle$ die mittlere Abzugskraft über eine Abzugslänge von 45 mm beschreibt. Aus [7] ergibt sich als Richtwert für Leiterplatten eine Schälfestigkeit von $R_s = 0.6 \text{ N/mm}$.

3.2 Analyse des Schnittlinie

Die minimal realisierbaren Strukturgrößen des Prozesses hängen maßgeblich von den Eigenschaften der Schnittlinie nach dem Durchtrennen der Metallfolie ab. Neben der Breite der Schnittlinie sind hier die Höhe und Breite der Wulst durch ausgeworfenes Metall, sowie die Schnitttiefe interessant. Da das Polymersubstrat und die Polymermembran für mikrofluidische Anwendungen zusätzliche Funktionen übernehmen können, besteht außerdem Interesse, möglichst nur die Metallfolie zu durchtrennen und die darunter liegenden Schichten wenig zu beschädigen.

Zur Untersuchung der Geometrie des Schnittprofils wurden 3D-mikroskopische Messungen (Zeta 200, Zeta Instruments) über einen lateralen Bereich von $140 \times 180 \mu\text{m}^2$ für verschiedene Laserparameter durchgeführt und mit Hilfe einer automatisierten MATLAB-Routine die Schnittkanten und damit die mittlere Breite B der Schnittlinie bestimmt. Aus 1024 Einzelschnitten senkrecht zur Schnittkante, wurde das mittlere Schnittprofil (schwarze Linie) und daraus die Tiefe T , Wulsthöhe W_h und -breite W_b bestimmt.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Schälfestigkeit

Bild 2 zeigt die Schälfestigkeiten der untersuchten Metallfolien für verschiedene Laserleistungen. Für unbehandelte Kupferfolie (Cu-SE walzhart, Schlenk) wurde

eine mit der Laserleistung ansteigende Schälfestigkeit von maximal 0.37 N/mm bei 900 mW erreicht. Für eine mit Schwarzoxid beschichtete Folie (Cu Heißprägefolie, Bolta-Werke) wurde die Vorgabe von 0.6 N/mm aus [7] bereits bei 700 mW übertroffen. Für eine mit durch Elektrolattierung aufgetragenen Dendriten beschichtete Kupferfolie (Folie Typ JTCHTE, Gould Electronics) wurde eine maximale Schälfestigkeit von 1.37 N/mm ermittelt, wobei die Streuung der Messwerte eines Prüfkörpers deutlich geringer war als bei der Metallfolie mit Schwarzoxidbeschichtung.

Oberhalb von Leistungen im Bereich von 900 mW kam es während des Laserprozesses zu Einkopplungen auf der Metall-abgewandten Seite des Polymersubstrats, weshalb dieser Bereich nicht weiter untersucht wurde.

Das Anwachsen der Schälfestigkeit mit der Laserleistung kann erklärt werden durch die erhöhte Temperatur und entsprechend niedrigere Viskosität der Polymermembran während des Laserprozesses. Je flüssiger die Polymermembran, desto besser kann während des Zeitfensters des Schweißprozesses eine vollständige Benetzung der Oberfläche der Kupferfolie stattfinden. Der Effekt fiel für die oberflächenbehandelten Kupferfolien weit stärker aus, da es hier zu einer deutlichen Oberflächenvergrößerung kam. Zusätzlich konnte die Polymermembran in vorhandene Hinterschneidungen einfließen und so zu einer mechanischen Verankerung beitragen.

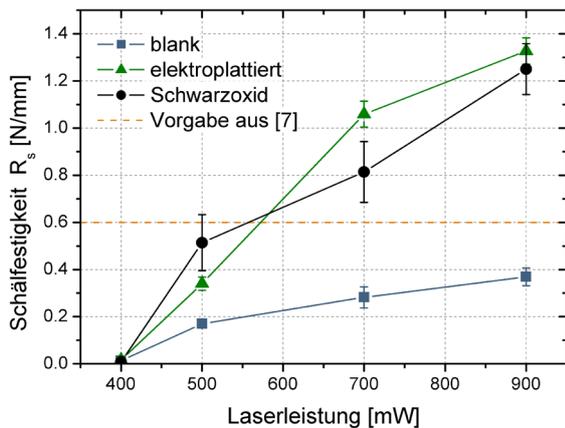


Bild 2 Schälfestigkeit über Laserleistung für Kupferfolien mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen.

4.2 Schnittlinie

Bild 3 zeigt eine mikroskopische Aufnahme einer typischen Laserschnittlinie, wobei zusätzlich die von der MATLAB-Routine ermittelten Kanten des Schnittgrabens eingezeichnet wurden. In **Bild 4** ist das zugehörige mittlere Schnittprofil und zehn zufällig ausgewählte Einzelschnitte überlagert gezeigt. In dem vorliegenden Beispiel wurde neben der Metallfolie auch die komplette Polymermembran und ca. 20 µm des Polymersubstrats abgetragen.

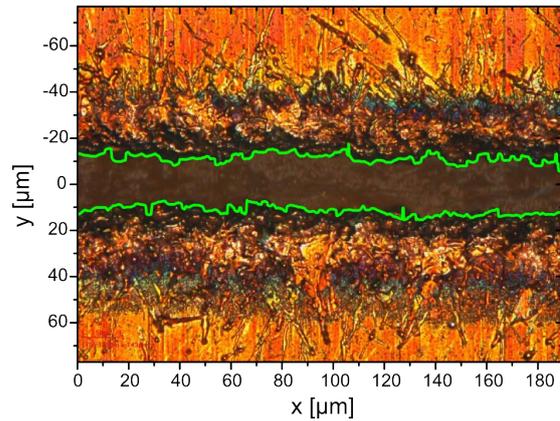


Bild 3 Aufsicht einer typischen Schnittlinie. Hervorgehoben sind die aus den zugehörigen Höhendaten bestimmten Schnittkanten.

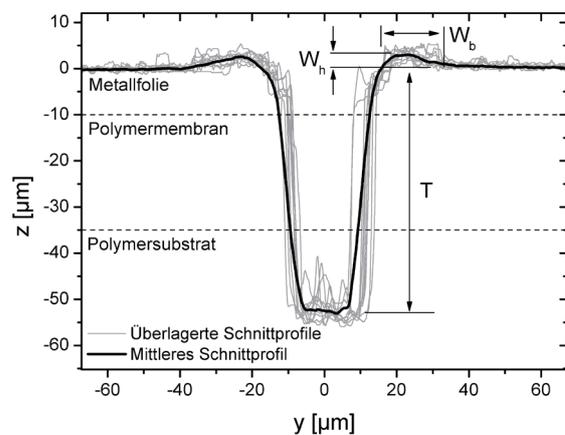


Bild 4 Profil der Schnittlinie aus Bild 3. Aus den zugehörigen Höhendaten wird aus 1024 Einzelschnitten entlang der y-Achse das mittlere Schnittprofil (schwarze Linie) und daraus weitere Parameter bestimmt.

Die Schnittlinien wurden für Laserleistungen von 1500 mW, 2000 mW und 3400 mW sowie Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 10 und 80 mm/s untersucht. Dabei wurden nur Datenpunkte berücksichtigt, für die eine vollständige Durchtrennung der Kupferfolie (blank) in einem Durchlauf erfolgt war.

Die Breite der Schnittlinie B (**Bild 5**) ließ sich mit kleineren Laserleistungen bzw. höherer Vorschubgeschwindigkeit auf 12 µm reduzieren. Selbst bei der höchsten untersuchten Leistung und kleinen Vorschubgeschwindigkeiten wurde eine Breite von 35 µm nicht überschritten. Für die Breite der Wulst W_b ergibt sich über alle Messungen ein Wert von $22,3 \pm 3,3$ µm, wobei keine Abhängigkeit von den Laserparametern festgestellt wurde. Die Höhe der Wulst W_h (nicht dargestellt) bewegte sich zwischen 1 und 5 µm und nahm mit steigenden Vorschubgeschwindigkeiten ab. Die Tiefe der Schnittlinie T (nicht dargestellt) überstieg für die höchste untersuchte Leistung sowie einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mm/s einen Wert von 50 µm. Für höhere Vorschubgeschwindigkeiten ist es jedoch möglich, mit einer Tiefe von ca. 12 µm die Polymermembran weitgehend unbeschadet zu lassen.

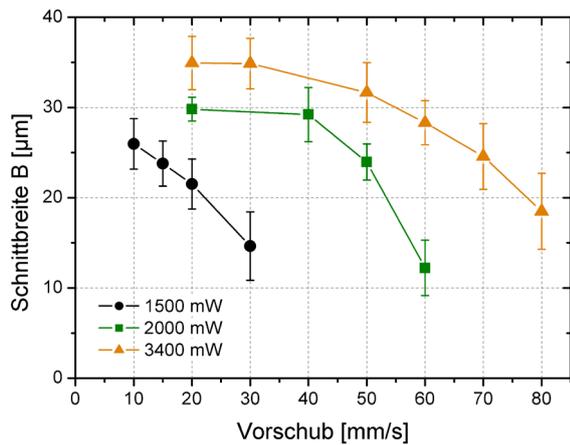


Bild 5 Schnittbreite über Vorschubgeschwindigkeit.

4.2.1 Minimal realisierbare Strukturgrößen

Ausgehend von den Standardabweichungen bei der Schnittbreite von ca. 5 µm kann ein Wert von 20 bis 30 µm für minimale Strukturgrößen als realisierbar angesehen werden. Es ist jedoch zu beachten, dass unterhalb von ca. 50 µm die gesamte Oberfläche der Metallfolie aufgrund der an allen Kanten vorhandenen Wulst eine entsprechende Topographie aufweist. Wird eine unbeeinträchtigte Oberfläche benötigt (z. B. für Drahtbonds), muss ein Sicherheitsabstand zur Schnittkante von ca. 25 µm eingehalten werden. Für den minimalen Abstand zwischen metallischen Strukturen ergibt sich aus Bild 5 ein Wert von 15 µm.

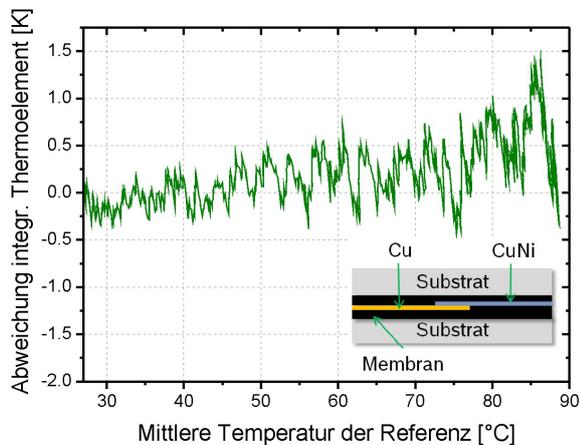


Bild 6 Abweichung des integrierten Thermoelements vom Mittelwert zweier Referenz-Thermoelemente.

5 Anwendung: Thermoelement

Als Anwendung des vorgestellten Metallisierungsprozesses wird im Folgenden ein Thermoelement Typ T beschrieben, bestehend aus Kupfer- und Konstantanfolie. Hierzu wurde zunächst ein Schichtaufbau hergestellt, wie im Inlet von Bild 6 gezeigt. Dabei berührten sich die beiden Metallfolien auf einer Fläche von ca. 3 x 3 mm² und wurden jeweils nach außen geführt, um mit Ausgleichsleitungen kontaktiert werden zu können. Dieser Aufbau wurde in einem Wasserbad zusammen mit einem Mantel-

thermoelemente sowie Thermoelement mit geschweißter Spitze Typ T (RS Components) von Raumtemperatur bis ca. 90°C aufgeheizt. **Bild 6** zeigt die Abweichung des integrierten Thermoelements vom Temperaturmittelwert der beiden Referenz-Thermoelemente während des Aufheißvorgangs. Als mittlere Abweichung ergab sich ein Wert von 0.36 K. Wir betrachten dies als eine sehr gute Übereinstimmung mit den Referenz-Thermoelementen.

6 Zusammenfassung

Ein mehrstufiger laserbasierter Prozess zur Integration von Metallfolien in Polymerschichtsysteme, bestehend aus einem Verbindungs- und Strukturierungsschritt, wurde vorgestellt und charakterisiert. Dabei wurden für elektroplattierte Metallfolien Schälfestigkeiten von ca. 1.4 N/mm erreicht, welche die Vorgaben aus [7] deutlich übertreffen. Eine Analyse der beim Strukturierungsschritt entstehenden Schnittkante ergab minimal realisierbare Strukturgrößen im Bereich von 20 bis 30 µm bei einem Mindestabstand von 15 µm. Für den untersuchten Schichtaufbau ist es möglich, den größten Teil der Polymermembran beim Strukturierungsschritt unbeschädigt zu lassen.

Als Anwendung des Metallisierungsprozesses wurde ein Thermoelement Typ T realisiert und eine sehr gute Übereinstimmung der Messgenauigkeit gegenüber zwei Referenz-Thermoelementen nachgewiesen.

7 Literatur

- [1] van Osch et. al, Inkjet Printing of Narrow Conductive Tracks on Untreated Polymeric Substrates; *Adv. Mater.*; vol. 20; pp. 343-345, 2008.
- [2] J. F. May, P. Rothacher, C. Müller, H. Reinecke, Embossing of metallic conductors on polycarbonate, in 19th Micromechanics Europe Workshop, 2008.
- [3] N. Takano et. al, Fabrication of metallic patterns by microstencil lithography on polymer surfaces suitable as microelectrodes in integrated microfluidic systems; *J. Micromech. Microeng.*; vol. 16; pp. 1606, 2006.
- [4] P. Amend et. al, A fast and flexible method for manufacturing 3D molded interconnect devices by the use of a rapid prototyping technology; *Physics Procedia.*; vol. 5; pp. 561-572, 2010.
- [5] VDE, Basismaterial für gedruckte Schaltungen, DIN EN 60249, 1993.
- [6] J. Rupp et. al., The Way to High Volume Fabrication of Lab-on-a-Chip Devices: A Technological Approach for Polymer Based Microfluidic Systems with Integrated Active Valves and Pumps; *Journal of microelectronics and electronic packaging*; vol. 6, pp. 198-204, 2009.
- [7] Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID: Technologie 3D-MID: räumliche elektronische Baugruppen; *Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte*; Carl Hanser Verlag, München, 2004.