

Erzeugen von leitfähigen Strukturen auf Kunststoffoberflächen durch Laserstrahlaktivierung

Michael Seiler¹, Andreas Knauff¹, Andrea Barz¹, Jens Bliedtner¹,
Andrés Fabián Lasagni^{2,3}

¹Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

²Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, 01062 Dresden

³Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, 01277 Dresden

Die Entwicklung von smarten Devices und Wearables erfordert individuelle Leiterstrukturen und leichte Elektronikbauteile. Die Schaffung von leitfähigen Strukturen auf bisher ungenutzten Flächen wie Gehäuseteilen ist ein wichtiger Entwicklungsschritt zur Reduzierung von Gewicht und Bauraumgröße. Der Inhalt dieses Artikels beschäftigt sich mit einem laserbasierten Verfahren, das für spritzgegossene Kunststoffe verwendbar ist. Die jeweilige Oberfläche wird laserstrukturiert, danach in wässriger Lösung bekeimt und im Anschluss stromlos verkupfert. Für eine erfolgreiche und homogene Verkupferung sind die Laserparameter und die Parameter der Nasschemie von entscheidender Bedeutung.

The development of smart devices and wearables requires individual electronic circuits and lightweight structures. One essential point is the formation of conductive traces on different surfaces like plastic cases and over dead space. This paper deals with a laser-based method to allow this application for different injection molded polymers. Therefore, the initial surface is activated by laser, afterwards infected by palladium and finally electroless copper plated. To achieve a homogenous copper layer the laser parameters and also the wet chemistry is important.

1. Einleitung

Zur Strukturierung und anschließenden Metallisierung von Kunststoffen bedient sich die Industrie aktuell verschiedener Verfahren [1,2]. Dabei ist ein wichtiges Ziel die Schaffung elektrisch leitender Strukturen auf Isolatoren. Eine spezielle Anwendung sind sogenannte MID, räumlich integrierter elektronischer Schaltungsträger, oder „molded interconnected devices“. Hier handelt es sich um zwei- und dreidimensional Bauteile aus spritzgegossenem Kunststoff bei denen sich Leiterbahnen direkt auf der Oberfläche befinden und damit konventionelle Leiterplatten substituieren. Zur Herstellung dieser Strukturen werden Methoden wie 2-Komponenten-Spritzguss [1], Heißprägen [3], Folienhinterspritzen [4], Flamecon® [1], Plasmadust® [1], und verschiedene laserbasierte Verfahren verwendet. Letztere bieten zahlreiche Vorteile durch eine selektive und flexible Art der Bearbeitung, die u.a. für geringe Kosten zur Prototypenherstellung sorgt. Über das direkte Schreiben mittels Laserstrahl können metallische Bahnen ohne den Einsatz von Masken und Fotolacken erzeugt werden [2]. Die etablierteste Methode ist das Laserdirektstrukturieren (LDS) [5]. Der Prozess beinhaltet zwei Schritte: die Laserablation und das stromlose Metallisieren. Eine wichtige Voraussetzung ist das Vorhandensein metallischer Partikel, die sich nach dem Spritzgießen bereits im Volumen befinden. Mit Hilfe der Laserablation werden diese Partikel lokal an der Oberfläche freigelegt. Ohne diese metallischen Bestandteile kann im darauffolgenden Metallisierungsschritt keine metallische Schicht entstehen. Die LDS-Methode konnte an verschiedenen Kunststoffen

und Lasersystemen (CO₂-Laser, lampen- und diodengepumpte Nd:YAG-Laser) erprobt werden [6]. In Ratautas et al. [7-9] und Seiler et al. [10, 11] wird eine Erweiterung dieser Methode präsentiert. Die konventionellen spritzgegossenen Substrate (PBT, PA; ABS, PMMA, PET) enthalten keinerlei Additive. Stattdessen wird nach der Laseraktivierung mittels Kurzpuls- und ultra-kurz-gepulsten Lasern ein zusätzlicher Schritt eingeführt. Es folgt eine chemische Bekeimung mit Silber [7-9] oder Palladium [10, 11]. Anschließend kann das Substrat herkömmlich stromlos metallisiert werden. Die Ergebnisse, die in der Literatur vorgestellt, und mit nanosekunden Pulsen erzeugt wurden, zeigen keinerlei erfolgreiche Verkupferung. Die Aktivierungsuntersuchungen werden vor allem in Abhängigkeit der Laserfluenz dargestellt und ausgewertet. Die morphologische und chemische Analyse der Oberfläche kann momentan die Prozesse der Laseraktivierung nicht vollständig erklären.

Dieser Artikel zeigt einen Ansatz zur Findung eines Prozessfensters homogener metallischer Schichten für den Kunststoff Polykarbonat (PC). Die Auswertung erfolgt über die Korrelation der akkumulierten Laserfluenz und den Scanparametern (Puls- und Linienabstand). Das entwickelte Verfahren benötigt keine Additive und basiert auf dem Einsatz von konventionellem Polykarbonat (PC).

2. Experimentelles Vorgehen

Das verwendete Polykarbonat (PC) ist vom Hersteller Trinseo und wird unter den Namen Calibre™ vertrieben. Das grün eingefärbte Substrat beinhaltet zusätzlich Titandioxid (TiO₂). Die Substratgröße wurde für die experimentellen Untersuchungen zu von 60 mm x 60 mm x

3 mm (Höhe x Breite x Dicke) ausgewählt. Die Ausgangsrauheit beträgt 300 nm (R_q taktil gemessen).

Für die Untersuchungen wird der Pikosekundenlaser TruMicro 5050 von Trumpf verwendet. Die Strahlablenkung erfolgt durch die Scaneinheit hurrySCAN II 14 von Scanlab. Die Fokussierung der Laserstrahlung wird durch ein F-Theta-Objektiv mit der Brennweite von 100 mm ermöglicht und erzeugt einen Fokusbereich in der Bearbeitungsebene von 30 μm (gemessen mit Kamera SP620U von Spiricon). Die weiteren wichtigsten Kenngrößen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Laser- und Scanparameter

Kenngröße	Wert
Pulsdauer	7 ps
Strahlqualität	1,3
Repetitionsrate	25 kHz
Laserfluenz F	7-35 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$
Doppelte Rayleighlänge	600 μm
Puls- und Linienabstand (d_p und d_l)	10-80 μm

Die Prozesskette ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Im Schritt a) erfolgt die selektive Laseraktivierung. Dazu können einzelne Scanprogramme erzeugt oder Schaltkreise und Daten in Form von DXF-Dateien importiert werden. Die beiden Folgeschritte beinhalten die Bekeimung mit Palladium Pd b) und das stromlose Verkupfern c). Die Palladiumlösung weist eine Konzentration von 1 g/L auf. Durch die Verweilzeit der Probe im Palladiumbad lagert sich ausschließlich an den selektiv aktivierten Flächen elementares Palladium an. Dieser Prozess ist die Voraussetzung für das Bilden der Kupferschichten im folgenden Schritt der stromlosen Verkupferung. Palladium ist ausschließlich auf den laseraktivierten Flächen zu sehen. Das unbehandelte Ausgangsmaterial zeigt keine Anlagerung von Pd.

Für die das Kupferbad wird die industriell etablierte Lösung ENPLATE LDS CU 200 von MacDermid Enthone eingesetzt.

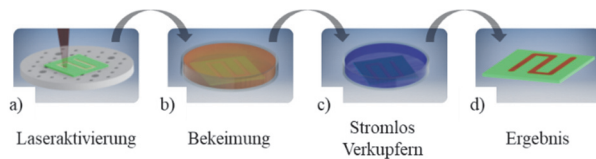


Abbildung 1: Verwendete Prozesskette für die Verkupferung von PC

Final ist das Substrat an den vorher laseraktivierten Flächen erfolgreich mit einer Kupferschicht versehen.

Die auftretenden Phänomene an bekeimten und fertig verkupferten Oberflächen werden mit Digitalmikroskop (Keyence VHX-2000) und Rasterelektronenmikroskop (Zeiss EVO MA 10) analysiert und ausgewertet.

3. Ergebnisse und Diskussion

Für die Bestimmung des Prozessfensters für eine homogene Kupferschicht werden auf die Substratoberfläche

5x5 Matrizen in Abhängigkeit der Laserfluenz F (pro Spalte) und des Pulsabstand (pro Zeile) erzeugt. Dies ist in Abbildung 2a dargestellt. Für jede Einzelmatrix ist der Linienabstand konstant über die 25 Felder. Die Felder haben eine Fläche von 8 mm x 8 mm. Der Feldabstand beträgt 3 mm. Über die konstante Repetitionsrate von 25 kHz ist der Pulsabstand nur noch von der gewählten Scangeschwindigkeit abhängig.

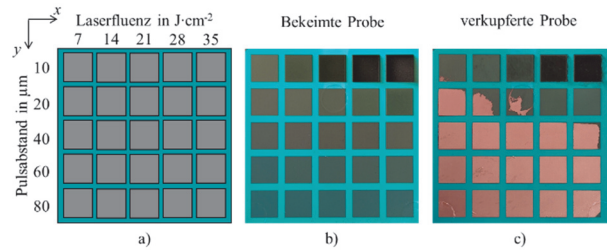


Abbildung 2: a) Prozessmatrix, b) Probe nach Bekeimung und c) verkupferte Probe (Matrix $d_L = 10 \mu\text{m}$)

Der Linienabstand wird für jede Matrix konstant gehalten und wie der Pulsabstand von 10 bis 80 μm variiert. Damit ergeben sich 5 Matrizen mit je 25 Feldern. In Abbildung 2b ist beispielhaft eine laseraktivierte Probe dargestellt. Die bearbeiteten Felder weisen einen gräulichen Farbschlag auf. Dieser ist stark vom Kunststoff, seiner Farbe und den Laserparametern abhängig [10, 11].

Diese Abhängigkeit gilt ebenso nach der Bekeimung und Verkupferung der Felder. Die Kupferschicht und das sich ergebende Prozessfenster wird im Folgenden betrachtet. Abbildung 2c zeigt eine 5x5 Matrix nach durchlaufen der Prozesskette. Es zeigt sich bereits ein Einfluss der Laserfluenz und des Pulsabstandes.

Für die Ermittlung des Prozessfensters für die Bildung homogener Kupferschichten werden die fertig verkupferten Matrizen mit einer digitalen Spiegelreflexkamera (Nikon D600) fotografiert. Die Bilder dienen zur Auswertung des Anteils der Verkupferung auf jedem Einzelfeld. Der Anteil an Kupfer wird ins Verhältnis mit der Feldgröße von 8 mm x 8 mm gesetzt. Dadurch kann eine quantitative Bewertung des Kupferanteils erfolgen. Das Programm binarisiert die Daten und wertet über eine Maske jedes Feld einzeln aus. In Abbildung 3 ist ein solches Ergebnis dargestellt.

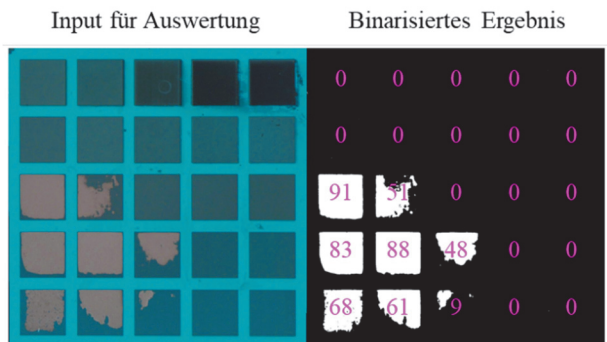


Abbildung 3: Foto zur Auswertung in Matlab (links) und binarisiertes Ergebnis mit jeweiligem Anteil der Verkupferung

Für die weitere Auswertung werden drei Grenzen für das Prozessfenster festgelegt. Die Bereiche für die drei Grenzen sind in Tabelle 2 aufgeschlüsselt.

Tabelle 2: Grenzbereich für die Auswertung des Prozessfensters in Abhängigkeit der Kupferfläche pro Einzelfeld

Bereich	Verkupfter Anteil in %
Homogene Schichte	> 90 %
Teilweise verkupfert	3 bis 89 %
Kein Kupfer	< 2 %

Die gewonnenen Daten fließen in die Erstellung des finalen Prozessfensters in Abbildung 4, das in Abhängigkeit der akkumulierten Fluenz F_{akk} dargestellt wird und sich wie folgt berechnen lässt.

$$F_{akk} = F \cdot N_P$$

Dabei ist N_P die Anzahl an Pulsen pro Einzelfeld. In das Diagramm fließen neben dem Pulsabstand an der x-Achse, der Linienabstand ein. Dieser wird über verschiedene Symbole in der Legende ausgedrückt. Die Farbwahl markiert die drei Grenzen aus Tabelle 2.

kein Kupfer (<2%) teilweise verkupfert (3-89%) homogene Schicht (>90%)

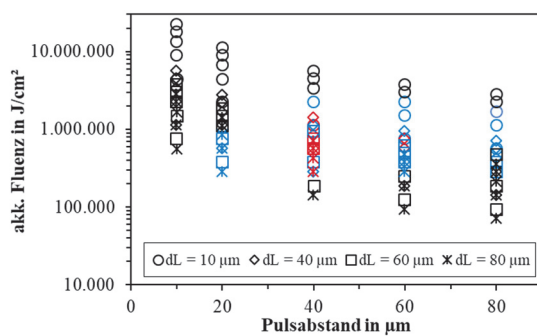


Abbildung 4: Prozessfenster für die Verkupferung von PC in Abhängigkeit der Laserfluenz und der verwendeten Scanparameter

Am Beispiel von PC zeigt sich, dass über die verwendeten Parameter 11 homogene Kupferschichten entstehen. Diese bilden sich hauptsächlich im Pulsabstand von 40 µm aus. Der umliegende Bereich stellt die teilweise verkupferten Schichten dar und ist an den Rändern gefolgt vom Bereich ohne nennenswerte Kupferausbildung. Der Bereich der rot-markierten Symbole umfasst eine Anzahl an Pulsen pro Flächen von etwa 0,5 bis 1,0 Millionen Pulse. Die maximale Anzahl der Pulse ist bei der geringsten Fluenz zu finden und verschiebt sich mit sinkender Pulsanzahl zu höheren Fluenzen bei geringeren Linienabständen. Damit ist eine klare Abhängigkeit der Pulsanzahl und der Fluenz erkennbar.

Die Phänomenologie der erzeugten Schichten ist stark von den Laser- und Scanparametern abhängig. Ein zu hoher Energieeintrag, wie in Abbildung 5a dargestellt, kann genauso die Laseraktivierung beeinträchtigen wie ein zu geringer. Dabei können sich in x- und y-Richtung homogene Schichten (5b), aber auch linienförmige Strukturen wie in Abbildung 5c ausbilden.

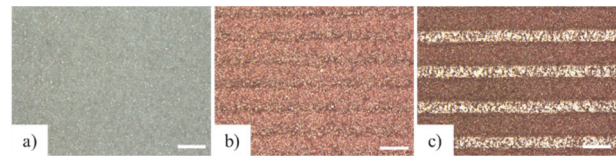


Abbildung 5: Mikroskopaufnahmen bei konstantem Linienabstand 10 µm und Laserfluenz von 21 J·cm⁻² in Abhängigkeit von d_P (20, 40, 60 µm v.l.n.r.)

Das Applizieren eines Fokusdurchmessers von 30 µm hat zur Folge, dass ab einem Puls- bzw. Linienabstand von 40 µm keine Überlappung der Pulse stattfindet. Dadurch ergeben sich Strukturen wie in Abbildung 5c. Trotz der fehlenden Überlappung reicht die Schwelle für eine Aktivierung der Oberfläche jedoch noch aus.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Das Prozessfenster für die Ausbildung von Kupferschichten auf Polykarbonat wurde erfolgreich untersucht. Es konnten Zusammenhänge innerhalb eines großen Bereichs an Laser- und Scanparametern aufgestellt werden. Insbesondere die Anzahl an Pulsen pro Flächen zeigt eine Korrelation zur Erzeugung von homogenen Kupferschichten. Die Auswertung mittels Bildverarbeitungssoftware führt zu einer objektiven Bewertung der Flächen. Weitere Forschungsarbeiten werden sich mit den genauen Mechanismen der Anhaftung von Palladium und der Bewertung der Kupferschichten beschäftigen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung bei der Bildauswertung durch Herrn Samson Frank aus der Arbeitsgruppe von Prof. Bliedtner.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Franke J., Hanser Verlag (2014).
- [2] M. Ozdemir, H. Sadikoglu, Trends in Food Science & Technology (1998), 159-167.
- [3] A Kilian, J. Weinzierl, L. Schmidt, 38th European Microwave Conference (2008), 1-4.
- [4] C. Bonten, Hanser Verlag (2016).
- [5] M. Hüske et al., Proc. of 3rd LANE (2001). 587-598.
- [6] A. Islam et al., International Journal Advanced Manufacturing Technology (2009), 831-841.
- [7] K. Ratautas et al., Applied Surface Science (2019), 405-410.
- [8] K. Ratautas et al., Results in Physics (2020), 102943.
- [9] K. Ratautas et al., Proc. CIRP (2018), 367-370.
- [10] M. Seiler et al., Proc. CIRP (2020), 891-894.
- [11] M. Seiler et al., Materials (2021), eingereicht.