

Additive Herstellung leitfähiger Strukturen auf Basis niedrigschmelzender Metalle mittels FDM-Verfahren

Joshua Voll, Stefan Roth

Hochschule Schmalkalden, Fakultät Maschinenbau, Blechhammer 4-9, 98574 Schmalkalden

Abstract

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Bewertung eines Filaments auf Basis niedrigschmelzender Metalle und Kupferfasern. Es konnte ein Filament auf Basis einer Polyethylenmatrix in Kombination mit Kupferfasern und Zinn entwickelt werden. Das Filament besteht zu etwa 82 Vol.-% aus Polyethylen, 11 Vol.-% aus Kupferfasern und 7 Vol.-% aus Zinn und wurde mit einem Durchmesser von 3 mm hergestellt. Anschließend wurde das Filament mit dem 3D-Drucker Ultimaker S5 verarbeitet und zu einfachen Bahnen gedruckt. An diesen Bahnen wurde die elektrische Leitfähigkeit mittels 4-Leiter-Technik gemessen, wobei spezifische Leitfähigkeiten von 2241 S/m erreicht wurden. Weiterhin wurden Untersuchungen der sich ausbildenden Morphologie mittels Computertomographie durchgeführt. Dabei konnte eine Vorzugsorientierung der Kupferfasern in Verarbeitungsrichtung des Druckers bestätigt werden. Das Zinn ummantelt die Kupferfasern und verbindet somit die Kupferfasern miteinander. Die prinzipielle Verarbeitbarkeit von Filamenten auf Basis niedrig schmelzender Metalle und Kupferfasern im FDM-Verfahren konnte anhand erster Untersuchungen bereits nachgewiesen werden.

1. Einleitung

Die aktuelle Entwicklung hin zur Elektromobilität erweitert den Bedarf und erhöht im gleichen Maße die Anforderungen an zukünftige elektrische und elektronische Anwendungen. In diesem Zusammenhang erweisen sich elektrisch modifizierte Kunststoffe (EMK) aufgrund ihrer relativ geringen Dichte und niedrigen Verarbeitungstemperaturen als äußerst vorteilhaft. EMK bestehen aus einem elektrisch nicht leitfähigen Kunststoff und elektrisch leitfähigen Füllstoffen. Dadurch ist es möglich, das Material mit den üblichen Kunststoffherstellungsverfahren zu verarbeiten und gleichzeitig eine elektrische Leitfähigkeit zu erreichen. In zahlreichen Publikationen wurden bereits verschiedene EMK hinsichtlich ihrer maximalen Leitfähigkeit und Verarbeitbarkeit im Spritzgießprozess untersucht (Pfefferkorn, 2009; Fragner, 2014). Die vielversprechendste Rezeptur konnte dabei auf Basis niedrigschmelzender Metalle in Kombination mit Kupferfasern erzielt werden. Das so hergestellte EMK erreicht Leitfähigkeiten von $8,7 \cdot 10^5$ S/m (Pfefferkorn, 2009). Die hohe elektrische Leitfähigkeit ist auf die geringe Grenzflächenspannung zwischen den Kupferfasern und dem niedrigschmelzenden Metall zurückzuführen. Während des Verarbeitungsprozesses lagert sich ein Großteil des Metalls an die Kupferfasern an und umhüllt diese (Hopmann et al., 2011). Dies führt zu einer Verbesserung der Kontaktierung zwischen den Fasern und zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit im Kunststoff. Aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit dieser Füllstoffkombination eignet sich diese Rezeptur auch für die Herstellung elektrisch leitfähiger Bauteile mittels additiver Fertigungsverfahren

(AM). Diese gewinnen im Bereich elektrischer und elektronischer Anwendungen aufgrund der Möglichkeit, kundenspezifische Änderungen zeitnah in Prototypen umzusetzen sowie der wirtschaftlichen Herstellung von Einzelteilen zunehmend an Bedeutung (Kaiser, 2020). In diesem Zusammenhang erweist sich das kostengünstige und effiziente additive Fertigungsverfahren Fused Deposition Modeling (FDM) als vielversprechend. Bei diesem Verfahren wird ein vorgefertigter Kunststoffstrang (Filament) durch eine beheizte Düse extrudiert, dort aufgeschmolzen und anschließend entsprechend der eingelesenen Geometrie in X- und Y-Richtung auf der Bauplattform abgelegt. Anschließend wird die Bauplattform um eine Schichtdicke in Z-Richtung verfahren und das Bauteil so sukzessive aufgebaut. Die Untersuchung von EMK auf Basis niedrigschmelzender Metalle und Kupferfasern im FDM-Verfahren ist bisher noch nicht Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen gewesen. Daher wird im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit die prinzipielle Verarbeitbarkeit einer solchen Materialrezeptur für den FDM-Prozess untersucht und der Einfluss des FDM-Prozesses auf die Morphologie und die elektrische Leitfähigkeit analysiert.

2. Eingesetzte Materialien und Methoden

Die Kombination von Kupferfaser und niedrigschmelzendem Metall zeigte bereits die höchste elektrische Leitfähigkeit von EMK im Spritzgießprozess. Daher werden diese Komponenten auch für die Filamentherstellung gewählt. Dazu wurden Kupferfasern mit einem Aspektverhältnis von 20 (Länge 0,8 mm, Durchmesser 40 µm) und Zinn in Granulatform mit einem Schmelzpunkt von 237 °C verwendet. Als Matrixkunststoff wurde Polyethylen (PE) mit hoher Dichte (MFI von 4 g/10min) verwendet.

Die Materialien wurden mit dem gleichläufigen Doppelschneckenextruder DSE 20/40 der Firma Brabender GmbH mit einem Schneckendurchmesser von 20 mm zu Filament verarbeitet. Abbildung 1 zeigt die Schneckenkonfiguration und die Materialdosierung.

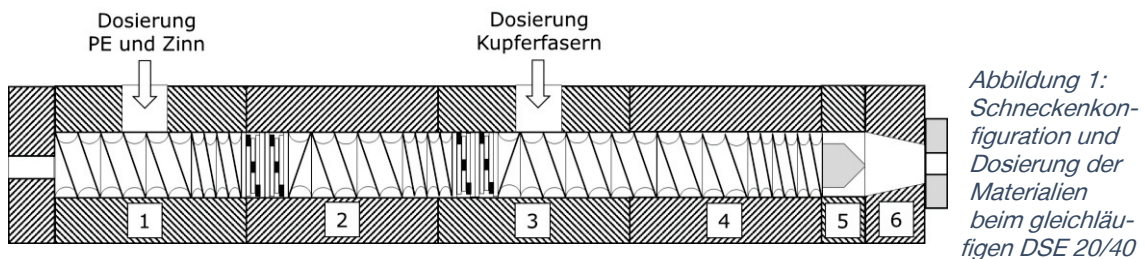


Abbildung 1: Schneckenkonfiguration und Dosierung der Materialien beim gleichläufigen DSE 20/40

Die Matrix (82 Vol.-%) und das Zinn (7 Vol.-%) werden zu Beginn über den Haupttrichter dosiert. Diese durchlaufen zwei Knetblöcke. Dabei werden die Kunststoffmatrix und das Zinn aufgeschmolzen. Die Kupferfasern (11 Vol.-%) werden erst in Zone drei nach den Knetblöcken zugegeben, um einen Faserlängenabbau zu vermeiden. Alle Füllstoffe werden gravimetrisch dosiert. Abschließend wird die Mischung zu einem Strang mit einem Durchmesser von 3 mm extrudiert. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Parameter des DSE 20/40

Drehzahl in 1/min	Temperatur in °C der Heizzonen					
	1	2	3	4	5	6
200	200	210	220	230	240	240

Das hergestellte Filament wurde anschließend mit dem FDM-Drucker Ultima-

ker S5 zu einfachen Bahnen ($100 \times 1,5 \times 0,6 \text{ mm}^3$) verarbeitet (siehe Abbildung 2). Dabei wurde ein Düsendurchmesser von 1,5 mm verwendet. Zur Definition der Prozessparameter wurde die Software Ultimaker Cura verwendet. Folgende Prozessparameter wurden eingestellt: Schichthöhe 0,6 mm, Düsentemperatur 250 °C, Bauplattentemperatur 110 °C, Verarbeitungsgeschwindigkeit 10 mm/s.



Abbildung 2: Lichtmikroskopische Aufnahme der gedruckten Bahn

An den hergestellten Probekörpern wurde anschließend die elektrische Leitfähigkeit in Druckrichtung gemessen. Dazu

wurde der in Abbildung 3 dargestellte Versuchsaufbau verwendet. Hierbei wird die Probe in eine Vorrichtung eingelegt und mit zwei Kupferelektroden kontaktiert. Die Elektroden haben einen Abstand von $L = 80 \text{ mm}$ zueinander und werden mit einer Prüfkraft von $F_E = 10 \text{ N}$ auf die Probe gedrückt. Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit erfolge anschließend mittels Vielleitertechnik, die in Abbildung 4 schematisch dargestellt ist. Dabei wird ein konstanter Strom von $I = 0,1 \text{ A}$ auf den Versuchsaufbau geleitet und die Spannung (U) zwischen den Elektroden gemessen.

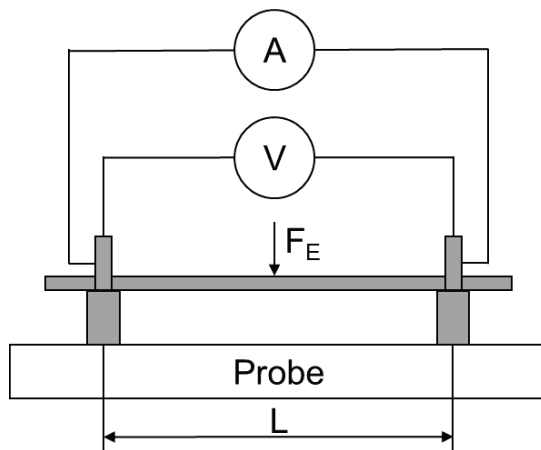


Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Charakterisierung der elektrischen Leitfähigkeit

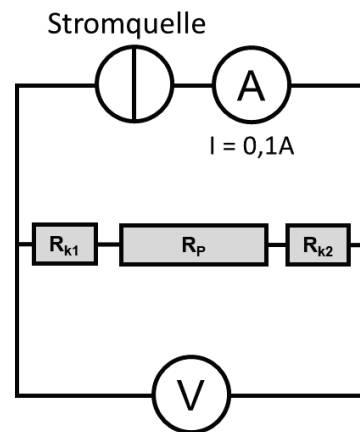


Abbildung 4: Schaltbild zur Charakterisierung der elektrischen Leitfähigkeit

Anschließend wird der Gesamtwiderstand (R_m) des Prüfaufbaus mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes berechnet (1). Im nächsten Schritt werden die beiden Elektrodenwiderstände (R_{k1} , R_{k2}) von R_m subtrahiert (2), um den Prüfkörperwiderstand (R_p) zu ermitteln. Zur Bestimmung der spezifischen Leitfähigkeit (3) wird im letzten Schritt der Kehrwert von R_p gebildet und mit dem Probenquerschnitt A und dem Elektrodenabstand L verrechnet.

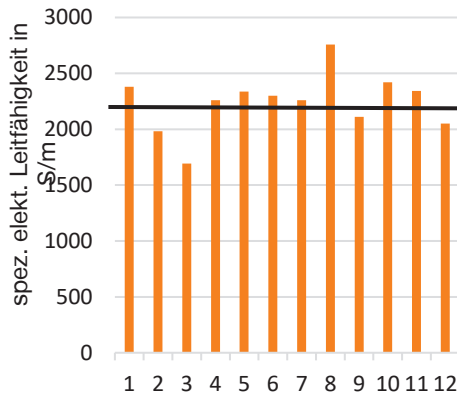
$$R_m = \frac{U}{I} [\Omega] \quad (1)$$

$$R_p = R_M - R_{k1} - R_{k2} [\Omega] \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{1}{R_p \cdot \frac{A}{L}} \left[\frac{S}{m} \right] \quad (3)$$

Zur Beurteilung der Morphologie wurden mit dem Zeiss Metrotom 800 Computertomographen (CT) aufnahmen der additiv gefertigten Bahnen angefertigt. Die Kupferfasern sind in der Aufnahme orange und das Zinn grau dargestellt (vgl. Abbildung 6).

3. Ergebnisse



Die Messungen der elektrischen Leitfähigkeit wurden an 12 Proben durchgeführt. Die Ergebnisse der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit sind in Abbildung 5 zusammengefasst. Im Mittel wurde eine spezifische elektrische Leitfähigkeit von 2241 S/m erreicht. Die Ergebnisse liegen in einem für EMK typischen Toleranzbereich und zeigen bereits bei relativ geringen Füllstoffgehalten eine hohe elektrische Leitfähigkeit.

Abbildung 5: Spezifische elektrische Leitfähigkeit der gedruckten Bahnen in Druckrichtung

Abbildung 6 zeigt eine CT-Aufnahme der gedruckten Bahn. Es ist eine bevorzugte Orientierung der Kupferfasern in Druckrichtung zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass die Faserorientierung durch den FDM-Prozess beeinflusst werden kann. Des Weiteren werden die Kupferfasern mit Zinn ummantelt, wodurch zusätzliche Kontaktstellen in der Leitstruktur entstehen. Dieser Effekt führte bereits in Spritzgießversuchen zu einer signifikanten Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit und konnte nun auch für das FDM-Verfahren nachgewiesen werden.

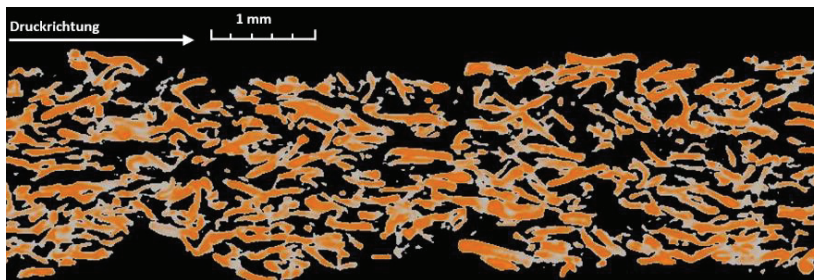


Abbildung 6: CT-Aufnahme der gedruckten Bahn; Kupferfasern orange, Zinn grau

4. Fazit und Ausblick

Mit den Untersuchungen konnte bereits die prinzipielle Verarbeitbarkeit von Filamenten auf Basis niedrigschmelzender Metalle und Kupferfasern im FDM-Verfahren nachgewiesen werden. Die Untersuchungen zeigen bereits ein großes Potential hinsichtlich der erreichbaren elektrischen Leitfähigkeit der gedruckten Bauteile. Dies ist vor allem auf die Orientierung der Kupferfasern in Druckrichtung und die zusätzlichen Kontaktstellen durch das Zinn zurückzuführen. Um die elektrische Leitfähigkeit der hergestellten Bauteile weiter zu steigern, muss im nächsten Schritt der Füllstoffanteil von Kupferfasern und Zinn erhöht werden.

Die Untersuchungen zeigen bereits ein großes Potential hinsichtlich der erreichbaren elektrischen Leitfähigkeit der gedruckten Bauteile. Dies ist vor allem auf die Orientierung der Kupferfasern in Druckrichtung und die zusätzlichen Kontaktstellen durch das Zinn zurückzuführen. Um die elektrische Leitfähigkeit der hergestellten Bauteile weiter zu steigern, muss im nächsten Schritt der Füllstoffanteil von Kupferfasern und Zinn erhöht werden.

Quellen

Fragner, J. (2014). Elektrisch leitfähige Kunststoffcompounds auf Basis von Füllstoffkombinationen. Dissertation.

Hopmann, C.; Michaeli, W.; Fragner, J. (2011). Analyse und Optimierung der Werkzeug- und Verfahrenstechnik zum Spritzgießen hoch gefüllter Thermoplast-Compounds auf Basis niedrig schmelzender Metalle. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, IGF-Vorhaben Nr. 15259 N.

Kaiser, V. (2020). Additive Fertigung in der elektrischen Verbindungstechnik: Potenziale und Anforderungen. Leitfaden. Zentralverband Elektrotechnik und Elektroindustrie e.V. Frankfurt.

Pfefferkorn, T. (2009). Analyse der Verarbeitungs- und Materialeigenschaften elektrisch leitfähiger Kunststoffe auf Basis niedrig schmelzender Metalllegierungen. Dissertation.