

Rheologie von elektrisch leitfähigen Zinnpulvercompounds Teil 2

Joshua Voll, Hochschule Schmalkalden, j.voll@hs-sm.de, Stefan Roth, Hochschule Schmalkalden, s.roth@hs-sm.de

Zusammenfassung

In dieser Studie wurden die rheologischen Eigenschaften von PE-HD-Zinn-Compounds oberhalb des Schmelzpunktes von Zinn untersucht. Die Ergebnisse zeigen einen Anstieg des Speichermoduls G' für alle Füllstoffkonzentrationen, der durch die hohe Oberflächenspannung des Zinns verursacht wird. Im Hochfrequenzbereich zeigt sich ein perkolationsabhängiges Verhalten des G' , mit einem Maximum bei 24 Vol.-%. Im niederfrequenten Bereich ist ein direkter Einfluss des Füllstoffvolumens auf den G' erkennbar.

Stichworte

Rheologie, Zinnpulvercompounds, niedrigschmelzende Metalle, Amplitudensweep, Frequenzsweep

1 Einleitung

Elektrisch leitfähige Kunststoffe (ELK) finden zunehmend Anwendung im Fused Filament Fabrication (FFF) zur Herstellung elektrischer Bauteile, wie beispielsweise Sensoren oder Smart Textiles [1-3]. Ein ELK setzt sich aus einem elektrisch isolierenden Kunststoff und elektrisch leitfähigen Füllstoffen zusammen. An der Hochschule Schmalkalden konnte ein ELK auf Basis von Zinnpulver und High-Density-Polyethylen (PE-HD) mit einer hohen elektrischen Leitfähigkeit entwickelt werden [4]. Für die Verarbeitung dieses Compounds im FFF-Verfahren ist sowohl eine Düsentemperatur unterhalb als auch oberhalb des Schmelzpunkts (Smp) des Zinnpulvers denkbar. Aus rheologischer Sicht verhält sich das Compound unterhalb des Smp vermutlich wie ein pulvergefüllter Kunststoff, während oberhalb des Smp, bei einer Viskosität des Zinns von ca. 1,8 mPas [5], eine deutliche Änderung der rheologischen Eigenschaften des Compounds zu erwarten ist. Bisher wurde eine umfassende rheologische Charakterisierung solcher Materialkombinationen noch nicht wissenschaftlich durchgeführt. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, die rheologischen Eigenschaften zinngefüllter Compounds sowohl unterhalb als auch oberhalb des Schmelzpunktes des Zinnpulvers zu analysieren. Besonderes Augenmerk wird dabei auf den Einfluss der Füllstoffkonzentration des Zinnpulvers in der Kunststoffmatrix auf die rheologischen Eigenschaften gelegt. In diesem Beitrag wird die Untersuchung der rheologischen Eigenschaften oberhalb des Schmelzpunktes des Zinnpulvers fokussiert; die Analyse unterhalb des Schmelzpunktes ist in [6] beschrieben.

2 Material und Methoden

2.1 Verwendete Compounds

Zur Herstellung der Compounds wird High Density Polyethylen (PE-HD) mit einem MFR (190 °C/2,16 kg) von 4 g/10 min als Matrixkunststoff und Zinnpulver mit einem Schmelzpunkt von 232 °C und einer Korngröße von 30 bis 57 µm verwendet. Die Compounds werden mit dem gleichläufigen Doppelschneckenextruder DSE 20/40, Hersteller Brabender, mit einem Schneckendurchmesser von 20 mm zu Filament verarbeitet, welches anschließend granuliert wird. Die genaue Herstellung der Compounds ist in [4] beschrieben. Es wurden Compounds mit 10, 20 und 30 Vol.-% Anteil Zinn hergestellt. Bei der Herstellung fällt auf, das mit Erhöhung der Füllstoffkonzentration vom Zinnpulver sich zunehmend größerer Agglomerate bilden (siehe Abbildung 1).

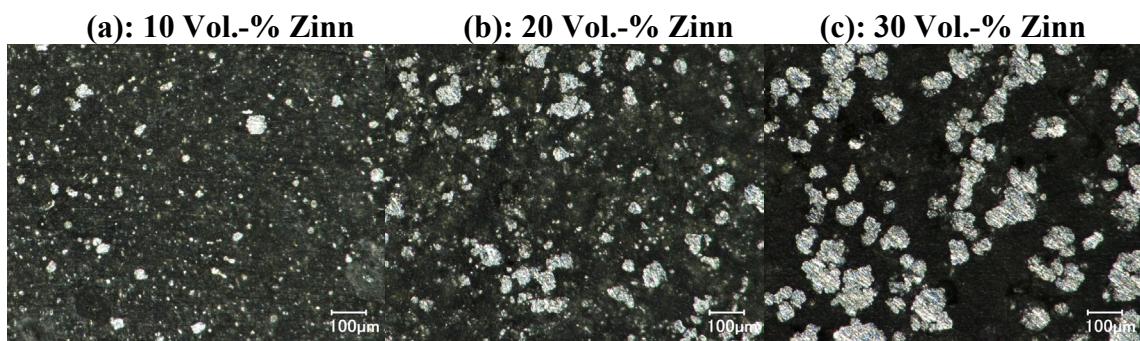


Abbildung 1: lichtmikroskopische Aufnahme der Compounds für (a) 10 Vol.-% Zinn, (b) 20 Vol.-% Zinn und (c) 30 Vol.-% Zinn

2.2 Rheologische Charakterisierung

Die rheologische Charakterisierung der Compounds wurde mit dem Rotationsrheometer MCR 702e, Hersteller Anton Paar, durchgeführt. Es wurde eine Platte-Platte-Konfiguration mit einem Durchmesser von 25 mm und einem Spaltabstand von 1 mm gewählt. Zur rheologischen Charakterisierung wurden Amplituden-, Frequenz- und Temperaturversuche unter Stickstoffatmosphäre durchgeführt, um Oxidation zu vermeiden. Zur Bestimmung des linear viskoelastischen Bereichs (LVE) wurden Amplitudenversuche mit steigender Scherdeformation von 0,01 bis 100 % bei einer Temperatur von 240 °C und einer Kreisfrequenz von 62,8 rad/s durchgeführt. Basierend auf den ermittelten LVE wurden anschließend Frequenzversuche im Bereich von 0,0628 bis 628 rad/s bei gleicher Temperatur gemessen.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Amplitudensweep

Der Einfluss des Füllstoffvolumens auf den Speichermodul G' als Funktion der Scherdeformation ist in Abbildung 2 dargestellt.

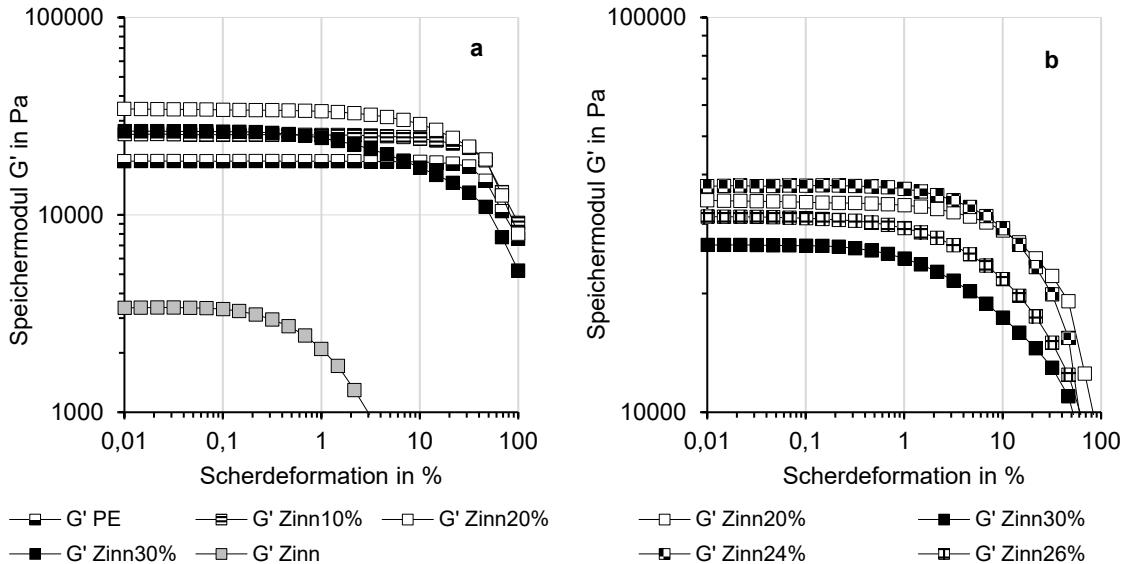


Abbildung 2: Einfluss des Füllstoffvolumens auf den Speichermodul G' als Funktion der Scherdeformation bei 240°C und $\omega = 62,8$ rad/s. Abbildung a zeigt die G' -Kurven des ungefüllten PE, des reinen Zinns und der Compounds mit 10, 20 und 30 Vol.-% Zinnanteil. Abbildung b zeigt die G' -Kurven der Compounds mit 20, 24, 26 und 30 Vol.-% Zinnanteil.

Das Aufschmelzen der Zinnpartikel führt bei allen untersuchten Füllstoffkonzentrationen zu einer Erhöhung des Speichermoduls G' . Ein Vergleich der Compounds zeigt jedoch, dass das Compound Zinn30% entgegen den Erwartungen einen niedrigeren Speichermodul aufweist als das Compound Zinn20%. Dieses Phänomen könnte durch den Füllgrad und die damit verbundenen Abstände der Zinnpartikel zueinander erklärt werden. In [4] wurden die elektrischen Eigenschaften von Zinnpulvercompounds untersucht. Dabei konnte ab einem Füllgrad von ca. 24 Vol.-% Zinnpulver die Perkolationsschwelle überschritten werden. Die Perkolationsschwelle bezeichnet den Füllstoffanteil, ab dem das Polymer ein ausreichendes, elektrisch leitfähiges Füllstoffnetzwerk aufweist. Das Compound Zinn20% weist einen Füllstoffanteil unterhalb der Perkolationsschwelle auf, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die meisten Zinnpartikel isoliert in der Kunststoffmatrix vorliegen. Im Gegensatz dazu weist das Compound Zinn30% ein stark ausgeprägtes Zinn-Netzwerk auf. Dadurch wird die eingebrachte Deformation teilweise direkt über das Zinnnetzwerk übertragen. Zinn zeigt mit einem G' von ca. 3300 Pa deutlich geringere Werte als der Matrixkunststoff (siehe Abbildung 2 (a)), was die Abnahme des G' von Zinn30% zu Zinn20% erklärt. Der allgemeine Anstieg vom G' ist auf die isolierten Zinnpartikel zurückzuführen. Nach dieser Annahme führt eine Erhöhung des Füllstoffgrads bis zu Perkolationsschwelle zu einer Steigerung des G' . Füllgrade oberhalb der Perkolationsschwelle (>24 Vol.-%) führen zu einer Abnahme des Speichermoduls (ausgehend vom G' bei 24 Vol. %). Um diese Theorie zu verifizieren, wurden Compounds mit 24 und 26 Vol.-% Zinn hergestellt und untersucht (siehe Abbildung 2 (b)). Das Compound mit 24 Vol.-% zeigt aufgrund der höheren Anzahl an isolierter Zinnpartikel einen höheren G' als das Compound mit 20 Vol.-%. Beim Compound mit 26 Vol.-% hat sich bereits ein durchgehendes Zinnnetzwerk im Polymer gebildet, was zu einer deutlichen Abnahme des G' führt und die aufgestellte Theorie bestätigt. Weiterhin ist zu beobachten, dass der linear-viskoelastischer Bereich (LVE) mit zunehmender Füllstoffkonzentration abnimmt. Für die Abnahme des G' mit zunehmender Deformation gibt es bei gefüllten

Kunststoffen zwei Gründe. Der erste Grund ist die Entknäuelung der Polymerketten. Dies tritt normalerweise nur bei hohen Scherdeformationen auf, wie in Abbildung 2 (a) für PE gezeigt. Der zweite Grund für die Abnahme des G' kann auf den Zusammenbruch der Oberflächenspannung des Zinns zurückgeführt werden [9,10]. Bei hoher Scherdeformation werden die intermolekularen Kräfte der Oberflächenspannung überwunden, was zu einem Fließen des Zinns und damit zu einer Abnahme des elastischen Anteils (G') führt. Die Abnahme des LVE mit zunehmender Füllstoffkonzentration kann durch die Größe und Größenverteilung der Zinnagglomerate der Compounds erklärt werden (siehe Abbildung 1). Die Partikelgröße hat einen signifikanten Einfluss auf die Fließspannung [11]. Kleinere Partikel führen im Allgemeinen zu höheren Fließspannungen, da ihre Oberfläche im Verhältnis zu ihrem Volumen größer ist, wodurch Wechselwirkungen wie die van der Waals-Kräfte verstärkt werden. Größere Partikel haben ein kleineres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, was ebenfalls zu niedrigeren Fließspannungen führt. Da die Größe der Zinnagglomerate mit steigendem Füllstoffgehalt zunimmt, sinkt der LVE. Die Amplitudenversuche wurden in erster Linie zur Bestimmung des LVEs durchgeführt. Dabei zeigten alle Füllstoffkonzentrationen bei einer Scherdeformation von 0,1 % einen linear viskoelastischen Bereich. Für die weiteren Untersuchungen wurde jedoch eine Scherdeformation von 0,05 % gewählt, um das Material auch in einer Temperaturrampe von 200 bis 240 °C untersuchen zu können, da die Compounds bei 200 °C eine LVE von 0,05 % Scherdeformation aufweisen [6]. Abbildung 3 zeigt die Werte von G' , G'' und den Verlustfaktor $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei einer konstanten Scherdeformation von 0,05%.

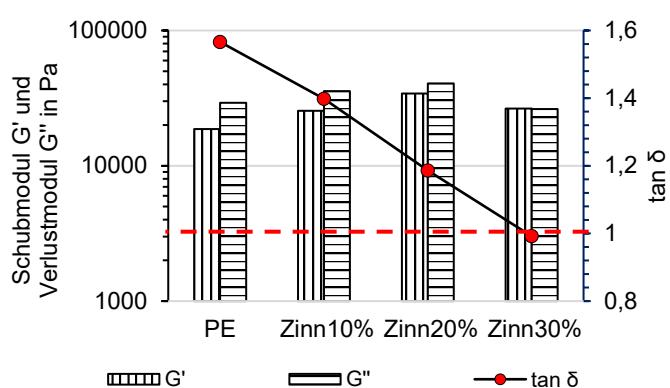


Abbildung 3: Speichermodul G' , Verlustmodul G'' und Verlustfaktor $\tan \delta$ bei Scherdeformation von $\gamma = 0,05 \%$, 240 °C, $\omega = 62,8$ rad/s für die Füllstoffkonzentrationen

Abbildung 3 zeigt, dass mit zunehmender Füllstoffkonzentration eine Abnahme vom $\tan \delta$ zu beobachten ist. Die rote gestrichelte Linie markiert den Verlustfaktor $\tan \delta = 1$ ($G' = G''$), der den Übergang vom flüssigen zum festen Materialverhalten anzeigen. Die Abnahme vom $\tan \delta$ mit steigender Füllstoffkonzentration ist auf das rheologische Verhalten niedrigschmelzender Metalle zurückzuführen. Bei schmelzflüssigem Zinn erfolgt die Deformationsübertragung über die Oberflächenspannung.

Aufgrund der hohen Oberflächenspannung von 598 mN/m [7] wird die Verformung hauptsächlich elastisch übertragen ($G' >> G''$). Dieses Phänomen wurde bereits in früheren Studien nachgewiesen, in denen niedrig schmelzende Metalle auf Galliumbasis rheologisch untersucht wurden [8]. Dabei zeigte das Metall im aufgeschmolzenen Zustand ein stark elastisches Verhalten bei Amplituden- und Frequenzuntersuchungen. Ein analoges Verhalten konnte auch für Zinn mit einem $\tan \delta$ von ca. 0,05 nachgewiesen werden. Neben der Oberflächenspannung könnte auch die Bildung von Zinnoxid (SnO_2) zu diesem Effekt führen. Zinnoxid bildet sich an der Oberfläche und könnte teilweise beim Compoundieren oder bei rheologischen Untersuchungen entstanden sein. Im Allgemeinen verhalten sich

Oxidschichten steifer und spröder als flüssige Metalle, wodurch auch die eingebrachte Verformung elastisch übertragen wird und das G' des Compounds erhöht wird [9,10]. Um eine Oxidation des Zinns zu vermeiden, wurden die rheologischen Versuche unter Stickstoffatmosphäre durchgeführt. Eine vollständige Vermeidung der Oxidation kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

3.2 Frequenzversuche

Abbildung 4 zeigt den Einfluss des Füllstoffvolumens auf den Speichermodul G' in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz ω . Die Messungen wurden bei einer Scherdeformation γ von 0,05 % und einer Temperatur von 240 °C durchgeführt.

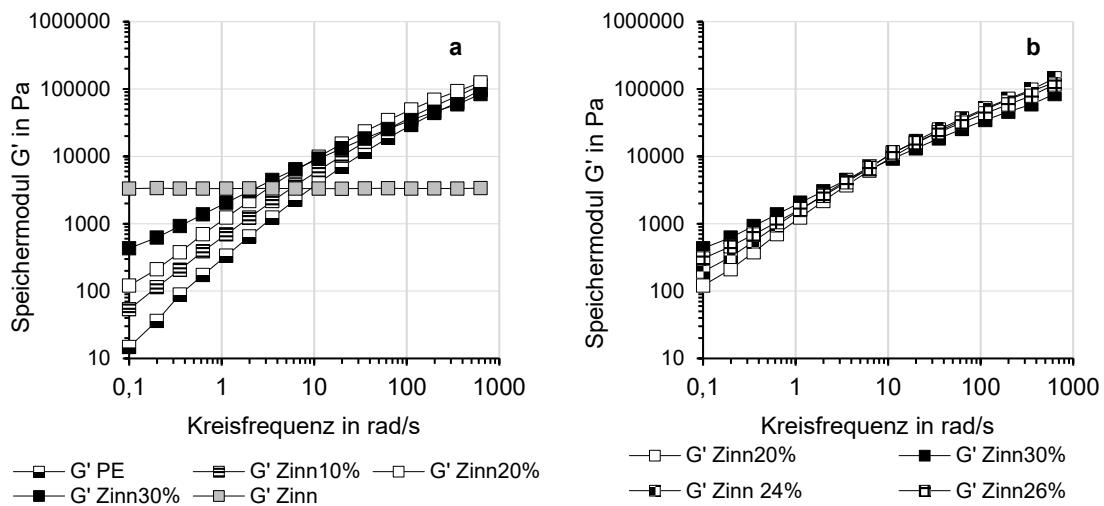


Abbildung 4: Einfluss des Füllstoffvolumens auf das Speichermodul G' als Funktion der Kreisfrequenz ω bei 240°C und einer Scherdeformation γ von 0,05%. Abbildung a zeigt die G' -Kurven des ungefüllten PE, des reinen Zinns und der Compounds mit 10, 20 und 30 Vol.-% Zinnanteil. Abbildung b zeigt die G' -Kurven der Compounds mit 20, 24, 26 und 30 Vol.-% Zinnanteil.

Abbildung 4 zeigt, dass alle Compounds ein frequenzabhängiges Verhalten des G' aufweisen. Dabei sind zwei Frequenzbereiche zu erkennen, in denen sich die Compounds unterschiedlich verhalten. Im unteren Frequenzbereich (< 10 rad/s) ist ein zu erwartendes füllstoffabhängiges Verhalten der Compounds zu beobachten. Hier führt eine Erhöhung des Füllgrades zu einer Erhöhung des G' . Zinn hingegen zeigt ein frequenzunabhängiges Verhalten des G' , das im niedrigen Frequenzbereich oberhalb und im hohen Frequenzbereich unterhalb des Matrixkunststoffes liegt. Daher führt eine Erhöhung der Füllstoffkonzentration zu einem Anstieg der Module, was bereits in früheren Untersuchungen nachgewiesen wurde [12, 13]. Weiterhin ist beim Zinn30-Compound eine leichte Abflachung der G' -Kurve zu beobachten. Diese Abflachung signalisiert ein frequenzunabhängiges Verhalten, was darauf hindeutet, dass in diesem Frequenzbereich die Partikel-Partikel-Wechselwirkungen des Zinns dominanter werden [6, 10]. Im hohen Frequenzbereich zeigt sich, wie bereits in Abbildung 2 zu erkennen ist, ein perkolationsabhängiges rheologisches Verhalten. Dabei führt die Erhöhung des Zinnfüllgrades bis zur Perkolationschwelle (ca. 24 Vol.-%) zu einem Anstieg vom G' , der bei diesem Füllgrad sein Maximum hat. Eine weitere Erhöhung des Füllgrades führt ausgehend vom G' bei 24 Vol.-% Zinn zu einer Verringerung des Speichermoduls (siehe Abbildung 4 (b)). Bis zu einem

Füllgrad unterhalb der Perkolationsschwelle liegen die Zinnpartikel nahezu isoliert in der Kunststoffmatrix vor und verhalten sich rheologisch wie ein Festkörper. Füllstoffgehalte oberhalb der Perkolationsschwelle führen durch die Ausbildung eines Zinnnetzwerkes im Gefüge der Compounds zu einer Verringerung vom G' (ausgehend vom G' bei 24 Vol-%). Eine detaillierte Beschreibung des Phänomens wurde im vorhergehenden Kapitel durchgeführt.

3.3 Untersuchung Temperaturrampe

Zur Beurteilung des Phasenübergangs des Zinns von fest nach flüssig wurde die komplexe Viskosität η^* als Funktion der Temperatur untersucht (siehe Abbildung 5). Die Messungen wurden bei einer Scherdeformation von 0,05 %, einer Kreisfrequenz von 314 rad/s und einer Heizrate von 5 K/min durchgeführt. Die ermittelte Kreisfrequenz entspricht in etwa der Scherrate beim MVR (240 °C) und ist damit vergleichbar. Zur Verifizierung dieser Ergebnisse wurde auch die Schmelze-Volumenfließrate (MVR) der Compounds bei 200 und 240 °C untersucht (siehe Abbildung 6).

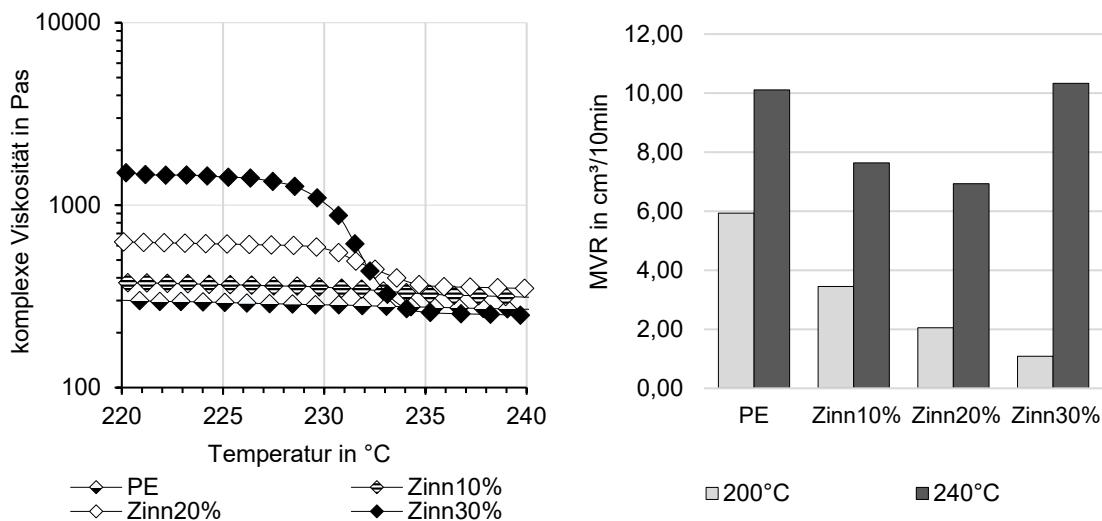


Abbildung 5: Einfluss des Füllstoffvolumens auf die komplexe Viskosität η^* in Abhängigkeit von der Temperatur bei einer Scherdeformation von 0,05 %, einer Kreisfrequenz von 314 rad/s und einer Heizrate von 5 K/min

Abbildung 6: Einfluss des Füllstoffvolumens auf die MVR bei 200 °C und 240 °C, Messung mit 2,16 kg

Abbildung 5 zeigt eine Abnahme der komplexen Viskosität η^* aller untersuchten Compounds mit steigender Temperatur. Die Viskositätsabnahme bis zu einer Temperatur von ca. 228 °C ist auf die Polymermatrix zurückzuführen. In diesem Temperaturbereich ist die Viskositätsabnahme auf die erhöhte Beweglichkeit der Polymerketten zurückzuführen. Die thermische Energie erhöht die Segmentbeweglichkeit der Polymere, wodurch die Ketten leichter fließen und die Viskosität sinkt. Das Verhalten von Compounds unterhalb des Schmelzpunktes von Zinn ist in [6] ausführlich beschrieben. Im Temperaturbereich zwischen 228 und 233 °C nimmt die η^* der Compounds mit 20 und 30% Füllgrad sprunghaft ab. Das Compound mit 10% Zinn zeigt hier keine signifikante Abnahme. Die schlagartige Verringerung kann durch das Aufschmelzen der Zinnpartikel erklärt werden. Beim Erreichen der Schmelztemperatur verlieren die Partikel ihre festen Bindungen innerhalb der Matrix, wodurch die Viskosität der Compounds sinkt. Je ausgeprägter das Zinnnetzwerk ist, desto stärker ist der Viskositätsabfall. Nach dem vollständigen Aufschmelzen

des Zinns nimmt die Viskosität bei weiterer Temperaturerhöhung analog zum ersten Bereich wieder ab. Dieser kontinuierliche Viskositätsabfall ist wiederum auf die mit steigender Temperatur zunehmende Beweglichkeit der Polymerketten zurückzuführen.

Zur Verifizierung der Ergebnisse wurde die Schmelze-Volumenfließrate (MVR) bei Temperaturen von 200 °C und 240 °C untersucht. Die MVR-Messungen bestätigen die in Abbildung 5 dargestellten Ergebnisse und verdeutlichen den Einfluss der Füllstoffkonzentration auf die Fließeigenschaften der Compounds. Bei 200 °C ist ein kontinuierlicher Rückgang der MVR mit steigender Füllstoffkonzentration zu beobachten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei höheren Füllstoffkonzentrationen die Fließfähigkeit des Polymers durch die Feststoffpartikel abnimmt. Dieses Verhalten steht im Einklang mit den zuvor ermittelten Viskositätsdaten, die zeigen, dass ein höherer Füllstoffgehalt zu einem Anstieg der komplexen Viskosität führt. Bei 240 °C hingegen steigt die MVR aller Compounds an. Dabei zeigen die Compounds mit 10 und 20 % Füllstoffanteil Werte unterhalb des Matrixkunststoffs, während das 30 % Zinn-Compound ein vergleichbares Niveau wie das Polymer erreicht. Die Ergebnisse zeigen die gleiche Größenordnung wie Abbildung 5 und bestätigen damit die Aussagekraft der komplexen Viskosität und der Perkolations-theorie.

4 Zusammenfassung

In dieser Studie wurden die rheologischen Eigenschaften von Polyethylen-Zinnpulver-Compounds oberhalb des Schmelzpunktes von Zinn untersucht. Die Untersuchungen zeigten, dass Zinn im geschmolzenen Zustand zu einer Erhöhung des Speichermoduls G' aller Compounds führt. Das reine Zinn zeigte in den Untersuchungen einen $\tan\delta$ von ca. 0,05, was für eine starke elastische Übertragung spricht. Dies ist vor allem auf die hohe Oberflächenspannung des Zinns zurückzuführen, wodurch die Deformationsübertragung überwiegend elastisch erfolgt. Die Compounds zeigten beim Amplituden- und Frequenz-sweep im Hochfrequenzbereich ein von der Perkolation abhängiges rheologisches Verhalten. Dabei führt die Erhöhung des Zinngfüllgrades bis zur Perkolationsschwelle (ca. 24 Vol.-%) zu einem Anstieg des G' , der hier sein Maximum hat. Eine weitere Erhöhung des Füllgrades führt ausgehend vom G' bei 24 Vol.-% Zinn zu einer Verringerung des Speichermoduls. Bis zu einem Füllgrad unterhalb der Perkolationsschwelle liegen die Zinnpartikel nahezu isoliert in der Kunststoffmatrix vor und verhalten sich rheologisch wie ein Festkörper. Füllgrade oberhalb der Perkolationsschwelle führen durch die Ausbildung eines Zinnnetzwerkes im Gefüge der Compounds zu einer Verringerung des G' (ausgehend vom G' -Wert bei 24 Vol.-%), da die eingebrachte Deformation teilweise direkt über das Zinnnetzwerk übertragen wird. Ein direkter Einfluss des Füllstoffanteils auf die rheologischen Eigenschaften kann im $\tan\delta$ und im linear-elastischen Bereich (LVE) des Amplitudensweeps sowie im niederfrequenten Bereich des Frequenzsweeps beobachtet werden. Dabei führt eine Erhöhung der Füllstoffkonzentration zu einer Verringerung von $\tan\delta$ und LVE. Im niederfrequenten Bereich ist eine Zunahme des Speichermoduls mit steigendem Füllstoffanteil zu beobachten. Der Einfluss des Aufschmelzverhaltens von Zinn auf die komplexe Viskosität wurde mit einer Temperaturrempfe untersucht. Dabei zeigte sich, dass mit steigendem Füllstoffanteil die Viskosität beim Aufschmelzen der Zinnpartikel stärker abnimmt. Zur Überprüfung der Aussagekraft der Ergebnisse wurde der MVR der Compounds untersucht. Hierbei zeigten sich die Ergebnisse der MVR in Übereinstimmung mit den Untersuchungen zur komplexen Viskosität.

Literatus

- [1] Joshi, A.; Goh, J. K.; Goh, K. E. J.; Processes, Applications, and Challenges, in: 3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials, Elsevier, s. 45–83, Amsterdam, 2019.
- [2] Kwok, S.W.; Goh, K.H.H.; Tan, Z.D.; Tan, S.T.M.; Tjiu, W.W.; Soh, J.Y.; Goh, K.E.J.; et al.; Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors, in Appl. Mater. Today 9, 167–175, 2017.
- [3] Leigh, S.J.; Bradley, R.J.; Purssell, C.P.; Billson, D.R.; Hutchins, D.A.; A simple low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors, in: PLoS One 7, 1–6, 2012.
- [4] Voll, J.; Entwicklung eines elektrisch leitfähigen Filaments für das FFF-Verfahren auf Basis eines niedrigschmelzen-den Metalls. Zeitschrift für Angewandte Kunststofftechnik, 1(2), 2024, <https://doi.org/10.60673/zak.2024.64>
- [5] Rozhitsina, E.V.; Gruner, S.; Kaban, I.; Hoyer, W.; Sidorov, V.E.; Dynamic viscosities of pure tin and Sn-Ag, Sn-Cu, and Sn-Ag-Cu eutectic melts. Russ. Metall. 2011, 118–121 (2011). <https://doi.org/10.1134/S0036029511020108>
- [6] Voll, J.; Roth, S.; Rheologie Von Elektrisch leitfähigen Zinnpulvercompounds Teil 1: Rheologische Untersuchung Von zinngefülltem Kunststoff. ZAK 2025. DOI: <https://doi.org/10.60673/zak.2025.79>
- [7] Tocci, M.; Zang, C.; Cadorniga Zueco, I.; Pola, A.; Modigell, M.; Rheological Properties of Liquid Metals and Semisolid Materials at Low Solid Fraction. SSP. 2016. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.256.133>
- [8] Shentu, J.; Pan, J.; Chen, H.; He, C.; Wang, Y.; Dodbiba, G.; Fujita, T. Characteristics for Gallium-Based Liquid Alloys of Low Melting Temperature. Metals 2023, 13, 615. <https://doi.org/10.3390/met13030615>
- [9] Zamora, R.; Martínez-Pastor, J.; Faura, F. Thermal, Viscoelastic and Surface Properties of Oxidized Field's Metal for Additive Microfabrication. Materials 2021, 14, 7392. <https://doi.org/10.3390/ma14237392>
- [10] Modigell, M.; Pola, A.; Tocci, M. Rheological Characterization of Semi-Solid Metals: A Review. Metals 2018, 8, 245. <https://doi.org/10.3390/met8040245>
- [11] Ancey, C.; Jorrot, H.; Yield stress for particle suspensions within a clay dispersion. J. Rheol. 1 March 2001; 45 (2): 297–319. <https://doi.org/10.1122/1.1343879>
- [12] Amoabeng, D.; Velankar, S. A Review of Conductive Polymer Composites Filled with Low Melting Point Metal Alloys. Polym. Eng. Sci. 2017, 58, 1010-1019. <https://doi.org/10.1002/pen.24774>
- [13] Zhang, X., Pan, Y., Cheng, J. et al. The influence of low-melting-point alloy on

the rheological properties of a polystyrene melt. Journal of Materials Science 35, 4573–4581 (2000). <https://doi.org/10.1023/A:1004845426786>