



## Kompostierbarkeit und ökotoxikologische Bewertung biobasierter Kunststoffe

R. Zeumer ([richard.zeumer@htw-dresden.de](mailto:richard.zeumer@htw-dresden.de)), A. Griebisch ([anne.griebisch@htw-dresden.de](mailto:anne.griebisch@htw-dresden.de)),  
F. Pötzsch ([frank.poetzsch@htw-dresden.de](mailto:frank.poetzsch@htw-dresden.de)), A. Schmid ([anna.schmid@htw-dresden.de](mailto:anna.schmid@htw-dresden.de)),  
D. Firzlaff ([daniel.firzlaff@htw-dresden.de](mailto:daniel.firzlaff@htw-dresden.de)), K. Harre ([kathrin.harre@htw-dresden.de](mailto:kathrin.harre@htw-dresden.de)),  
K. Schmidtke ([knut.schmidtke@htw-dresden.de](mailto:knut.schmidtke@htw-dresden.de))

Fakultät Landbau, Umwelt, Chemie, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Dresden

### Zusammenfassung

Biobasierte Kunststoffe finden Einzug in immer weitere Industriebereiche. In der Elektrotechnik werden diese neuartigen Werkstoffe bisher jedoch kaum verwendet, was mitunter an den hohen Materialanforderungen liegt. Die vorgestellte Studie beschäftigte sich daher sowohl mit der Entwicklung und Charakterisierung biobasierter Kunststoffmaterialien für Sensor- und Leiterplattenmaterialien als auch mit deren ökotoxikologischer Bewertung. Hierbei wurden die compoundingierten Kunststoffe sowie die enthaltenen Additive auf Umweltverträglichkeit und Kompostierbarkeit untersucht. Mit Ausnahme von Tannin zeigten die getesteten Additive keinen signifikanten Effekt auf *Daphnia magna* und *Lepidium sativum*. Insgesamt wiesen die untersuchten Kunststoffe eine sehr hohe Zersetzung in den Kompostern im Labormaßstab auf.

### Hintergrund

Aufgrund ihrer vielfältigen Materialeigenschaften und der vergleichsweise kostengünstigen Produktion haben Kunststoffe mittlerweile einen wichtigen Bestandteil in vielen Industriebereichen wie beispielweise Verpackungen, Landwirtschaft, Textilien, Leiterplatten, sowie im täglichen Leben der Bevölkerung eingenommen. Dementsprechend stark ist die globale Produktion von Plastikprodukten bis 2018 auf 359 Millionen Tonnen angestiegen (Plastics Europe, 2019). Auch wenn ein immer größerer Teil der damit einhergehenden Plastikmüllmengen recycelt wird oder zur Stromerzeugung genutzt wird, kann ein Eintrag langlebiger Kunststoffverbindungen in die Umwelt nicht verhindert werden. Aktuelle Schätzungen gehen davon aus, dass bereits 2015 60 bis 99 Millionen Tonnen Plastikmüll in die Umwelt eingetragen wurden und sich diese Zahlen in den nächsten Jahrzehnten verdreifachen könnten (Lebreton und Andrady 2019). Einen wesentlichen Anteil daran hat der in den letzten Jahren rapide wachsende Markt für elektronische Produkte wie Smartphones oder PCs, welcher im Jahr 2018 Elektroschrott im Umfang von 50 Millionen Tonnen produzierte (Tansel 2017). Leiterplatten als zentraler Bestandteil elektronischer Produkte stellen gleichzeitig auch den Hauptanteil des aufkommenden Elektroschrotts und basieren nach wie vor hauptsächlich auf Kunststoffen mit einer hohen Persistenz, wie beispielsweise Epoxidharze. Als mögliche Alternative zu herkömmlichen Kunststoffen hat sich in den letzten Jahren ein stetig wachsender Markt von neuartigen Biokunststoffen entwickelt, welcher 2018 ein Produktionsvolumen von 2,6 Millionen Tonnen aufwies (IfBB, 2019). Hierbei gilt es zwischen biobasierten (auf erneuerbaren Ressourcen beruhenden) und biologisch abbaubaren Kunststoffen zu un-

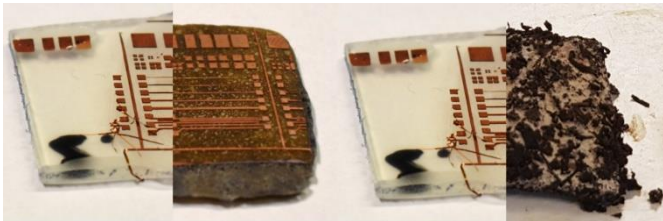
terscheiden, da beide Gruppen nicht zwangsläufig deckungsgleich sein müssen. Doch auch bei Letzteren gibt es starke Unterschiede, da die Abbauraten biologisch abbaubarer Kunststoffe von mehreren Faktoren abhängig ist. So hat insbesondere das umgebende Milieu (Salzwasser, Boden, Kompost, etc.) einen großen Einfluss auf die Geschwindigkeit des biologischen Abbaus der untersuchten Kunststoffe (Napper et al. 2019). Innerhalb eines Milieus, wie beispielsweise Boden, spielen neben der chemischen Zusammensetzung des Kunststoffes und seiner zugesetzten Additive auch Umweltfaktoren wie die bakterielle Aktivität und die Umgebungstemperatur eine entscheidende Rolle (Pischedda et al. 2019). Bei der Bewertung der *End-of-Life*-Phase bio-abbaubarer Kunststoffe sollten daher die wahrscheinlichsten Haupteintrittspfade (Deponien, Industriekomposter, landwirtschaftliche Nutzfläche, etc.) in die Umwelt nicht außer acht gelassen werden.

Ziel des interdisziplinären Forschungsprojektes BioESens ist die Entwicklung und Charakterisierung biobasierter Kunststoffe für den Einsatz als Sensor- und Leiterplattenmaterialien. Die im Rahmen des Projektes durchgeführte Studie beschäftigte sich mit der Bewertung des Abbau- und Zersetzungsverhaltens neuartiger biobasierter Kunststoffmaterialien sowie deren potenzieller ökotoxikologischer Effekte. Insbesondere der Einfluss von Additiven auf die Umweltverträglichkeit der Materialien stand im Mittelpunkt der Studie.

### Material und Methoden

Die Studien wurden mit zwei unterschiedlichen Polymeren durchgeführt: Als Ausgangsmaterial für Leiterplatten wurde Polymilchsäure (polylactic acid, PLA) verwendet, wohingegen Gelatine als Grundstoff für Feuchtesensoren gewählt wurde. Letztere wurden so konzipiert, dass das Sensormaterial die Feuchtigkeit aufnimmt und es zu einer Veränderung des elektrischen Widerstandes kommt. Die Materialien wurden gewählt, da sie bioabbaubar sind und bereits als Leiterplatten- bzw. Sensormaterial eingesetzt worden sind (Géczy et al., 2015; Hamidi-Asl et al., 2015). Die beiden Kunststoffe wurden mit Celluloseacetat und Zinkpyrophosphat bzw. Glycerin, Tannin und Tween 20® zur Verbesserung ihrer Materialeigenschaften additiviert. Im Fall des Gelatinematerials, verbindet sich das Additiv Tannin mit den Seitenketten der Gelatine, was in Kombination mit Glycerin und Tween 20® zu einer Erhöhung von Stabilität und Haltbarkeit des Materials führt. Kupferleitbahnen wurden auf reine und compoundingierte PLA-Platten (30 x 30 x 2 mm) aufgebracht. Zur Bewertung der ökotoxikologischen Effekte der in den Gelatineproben enthaltenen

Additive auf aquatische und terrestrische Organismen wurden akute Expositionsstudien mit dem Großen Wasserfloh (*Daphnia magna*) sowie Keimungsstudien mit der Gartenkresse (*Lepidium sativum*) nach OECD-Richtlinie 202 und ISTA-Richtlinien durchgeführt (OECD, 2004; ISTA, 1999). Zur Bewertung des Gesamteffekts der Kunststoffkomposite wurden diese für sieben Tage in Reinstwasser ausgelaugt und das erhaltene Medium ebenfalls in Keimungsstudien mit *L. sativum* eingesetzt. Zur Bewertung der Kompostierbarkeit der Kunststoffmaterialien wurden diese für 60 Tage in Kompostern im Labormaßstab unter kontrollierten Bedingungen nach DIN EN ISO-Richtlinie 20200 kompostiert (DIN EN ISO, 2015). Entsprechend der Richtlinie wurden Temperatur (>50 °C), pH, Feuchtegehalt sowie Zusammensetzung des Kompostsubstrates kontrolliert und der Zersetzungsgrad der Kunststoffe nach Testende bestimmt. Zusätzlich wurden im Verlauf der Studie die thermischen Eigenschaften mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (*differential scanning calorimetry*, DSC) untersucht.



**Abb. 1:** Additivierung und Kompostierung von Leiterplatten auf PLA-Basis

## Bisherige Ergebnisse

In den durchgeführten akuten Studien mit *D. magna* zeigten alle Gelatineadditive einen immobilisierenden Effekt auf die Testorganismen mit der niedrigsten Effektkonzentration nach Exposition mit Tannin (EC50 nach 48h bei 80 mg/L). Glycerin hingegen führte erst in einem Konzentrationsbereich > 1 g/L zu einem signifikanten Effekt. Eine ähnliche Tendenz zeigte sich in den Keimungsstudien mit *L. sativum*: Während Tannin bereits ab einer Konzentration von 800 mg/L zu einer signifikanten Reduktion (49%) des Keimungserfolges führte, zeigten Glycerin und Tween 20® bis zur höchsten getesteten Konzentration von 40 g/L keinen keimungshemmenden Effekt. Entsprechend der Effekte der Additive zeigte sich auch nach Auslaugung des Gelatinekomposits ein signifikanter keimungshemmender Effekt. Weder PLA, compoundiertes PLA noch PLA mit Leiterbahnen auf Kupferbasis zeigten einen vergleichbaren Effekt nach einwöchiger Auslaugung in Reinstwasser.

In der Kompostierungsstudie konnten innerhalb der 60-tägigen Testdauer deutliche Veränderungen an allen eingesetzten Kunststoffproben festgestellt werden. Sowohl das reine PLA-Material als auch die compoundierten PLA-Proben zeigten eine erhöhte Sprödigkeit, welche in Zusammenhang mit mechanischen Belastungen während der Durchführung der Studie zu einer Zersetzung der Materialien führte. Dies ist insofern von Bedeutung, da in Vorstudien ohne äußere Wärmezufuhr

keinerlei Veränderungen des PLA-Materials auftraten, was insbesondere die Rolle der Temperatur während der thermophilen Kompostierungsphase für die Zersetzung bioabbaubarer Kunststoffe unterstreicht. Neben der Zersetzung veränderten sich auch die thermischen Eigenschaften der PLA-Proben. So konnte in allen Proben (reines und compoundiertes PLA) bereits nach 30 Tagen ein signifikantes Absinken von Glasübergangstemperatur und Schmelztemperatur festgestellt werden. Im Gegensatz zu den vergleichsweise persistenten PLA-Materialien zersetzten sich die Gelatine-basierten Proben erwartungsgemäß wesentlich schneller. So konnten bereits 12 Stunden nach Testbeginn keine Restprobenstücke der reinen Gelatine gefunden werden. Die Zersetzungsdauer des Materials konnte durch die Additivierung mit Tannin, Glycerin und Tween 20® signifikant erhöht werden, da bei den compoundierten Proben erst nach 8 Tagen eine komplette Zersetzung eintrat. In ersten Ergebnissen von parallel durchgeführten Studien zur Bewertung des biologischen Sauerstoffbedarfs zeigte sich, dass diese Verzögerung nicht nur die Zersetzungsrate, sondern ebenfalls die Abbaugeschwindigkeit der Kunststoffe betrifft und diese sich um ca. 50% absenkt, was vermutlich auf die toxische Wirkung von Tanninen auf die umgebenden Mikroorganismen zurückzuführen ist (Field und Lettinga, 1992).

## Fazit

Die bisherigen Ergebnisse zeigen eine hohe Umweltverträglichkeit der entwickelten Kunststoffmaterialien unter Berücksichtigung der geringen toxischen Effekte in aquatischen und terrestrischen Expositionsstudien mit Ausnahme des Additivs Tannin. Unter optimalen Kompostbedingungen konnte innerhalb 60 Tagen eine hohe Zersetzungsrate (> 80%) beobachtet werden. Zu einer umfangreichen Bewertung des Umweltrisikos sind jedoch noch weitere Studien notwendig. So ist es beispielsweise möglich, dass es bei einem Absinken der Temperatur in industriellen Kompostern zu einer nicht vollständigen Zersetzung der Kunststoffe kommt, wodurch der Komposter als Quelle von Mikroplastikpartikeln fungieren könnte. Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass die aus der Kompostierung der Kunststoffe resultierenden Erden keinen negativen Effekt auf das Pflanzenwachstum zeigen. Ebenso ist für eine umfassende Bewertung des Gefährdungspotenzials der Kunststoffe eine detaillierte Bewertung der biologischen Abbaubarkeit nötig sowie eine Analyse der unter realen Bedingungen freigesetzten Additive zwingend notwendig.

Die hier dargestellten Studien werden ausführlich auf der SETAC Europe 2020 in Dublin vorgestellt als „Zeumer, R., Griebisch, A., Hecht, S., Schmid, A., Henning, C., Firzlaff, D., Zink, P., Harre, K., Bauer, R., Göbel, G., Dornack, C., Schmidtke, K., 2020. Impact of Additives and Composite Materials on Disintegration and Biodegradability of Bio-based Polymers“.

## Danksagung

Die vorgestellte Studie wurde im Rahmen des ESF-geförderten Projektes BioESens durchgeführt. Die Autoren bedanken sich beim Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft sowie dem Institut für Hydrobiologie der Technischen Universität Dresden für die erfolgreiche Kooperation.

## Literatur

- DIN EN ISO 20200:2015, 2015. Kunststoffe – Bestimmung des Zersetzungsgrades von Kunststoffmaterialien unter nachgebildeten Kompostierungsbedingungen mittels einer Prüfung im Labormaßstab (ISO 20200:2015)
- Field, J.A., Lettinga, G., 1992. Toxicity of tannic compounds to microorganisms. In Plant polyphenols (pp. 673-692). Springer, Boston, MA.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3476-1\\_39](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3476-1_39)
- Géczy, A., Nagy, D., Hajdu, I., Kmetty, A., Szolnoki, B., 2015. Investigating mechanical performance of PLA and CA biodegradable printed circuit boards. 2015 IEEE 21st International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Brasov, 2015, pp. 45-49.
- Hamidi-Asl, E., Dardenne, F., Blust, R., De Wael, K., 2015. An improved electrochemical aptasensor for chloramphenicol detection based on aptamer incorporated gelatine. Sensors 15.4: 7605-7618.  
<https://doi.org/10.3390/s150407605>
- ISTA, 1999. International rules for seed testing. International Seed Testing Association (ISTA), Seed Science and Technology, 27, Supplement.
- IfBB, 2019. Biopolymers – facts and statistics.  
<https://www.ifbb-hannover.de/de/facts-and-statistics.html> (aufgerufen 08.02.2020)
- Lebreton, L., Andrady, A., 2019. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. Palgrave Commun. 5(1), 1-11. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>
- Napper, I.E., Thompson, R.C., 2019. Environmental deterioration of biodegradable, oxo-biodegradable, compostable, and conventional plastic carrier bags in the sea, soil, and open-air over a 3-year period. Environ. Sci. Technol. 53(9), 4775-4783.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06984>
- OECD, 2004. Test No. 202: Daphnia sp. Acute Immobilisation Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris,  
<https://doi.org/10.1787/9789264069947-en>
- Plastics Europe, 2019. Plastics – The facts. Plastics Europe.  
<https://www.plasticseurope.org/de/resources/publications/2154-plastics-facts-2019> (aufgerufen 08.02.2020)
- Tansel, B., 2017. From electronic consumer products to e-wastes: Global outlook, waste quantities, recycling challenges. Environ. Int. 98, 35-45.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.002>

## Korrespondenzadresse

Richard Zeumer  
Fakultät Landbau, Umwelt, Chemie  
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden  
Friedrich-List-Platz 1  
01069 Dresden  
Tel.: 0351/462 2027  
E-Mail: [richard.zeumer@htw-dresden.de](mailto:richard.zeumer@htw-dresden.de)  
Internet: [www.htw-dresden.de/bioesens](http://www.htw-dresden.de/bioesens)