



Die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

## Nachhaltigkeit in der Elektronik und Sensorik

Bericht aus Dresden von Dr. Rolf Biedorf

*Die Erschließung nachhaltiger Konzepte für Elektronik-Produkte und -Recycling gilt es für eine industrielle Umsetzung noch weiter auszubauen. Forscher der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW Dresden) können hierzu ihre im Rahmen des Projektes ‚bioESens‘ gewonnenen Erkenntnisse mit alternativen Biopolymeren für biobasierte und biologisch abbaubaren Träger- und Sensorschichten vorstellen. Eigentlich sollte das Inhalt einer Veranstaltung an der HTW Dresden im Frühjahr 2020 werden, die aber wegen Corona-Einschränkungen ausfallen musste.*

Elektro- und Elektronikgeräte oder -baugruppen werden in der Regel aus wertvollen Rohstoffen hergestellt. Ihre Verwendung und Rückgewinnung verdient daher besondere Aufmerksamkeit. Heute ist die Suche nach neuen und wieder- bzw. weiterverwertbaren Materialien, nachhaltigen Technologien und Recyclingverfahren wichtig, weil sich allein die Leiterplatten, die in nahezu allen technischen Geräten stecken, beim Elektroschrott zu 50 Mio. Tonnen pro Jahr summieren – bei einer jährlichen Steigerungsrate von fast 9 %. Seit Jahrzehnten beschäftigen sich deshalb mit zunehmender Intensität Forscher, Ent-

wickler und Anwender mit nachhaltigen technologischen Lösungen.

### **Metal- und Kunststoffrecycling**

Dauerthema ist die Herauslösung der kostbaren Edelmetalle und weiterer Metalle aus dem Schrott. Dazu wurden seit Ende des 19. Jahrhunderts Blausäureverbindungen (Cyanide) benutzt. Nicht erst seit dem Verbot der EU vor 10 Jahren werden selektive ertragreiche Rückgewinnungsverfahren ohne diese Umweltgifte gesucht. Vor kurzem berichteten Forscher vom Korea Advanced Institute of Science and Technology

in Daejeon im Fachjournal Proceedings of the National Academy of Sciences über ein neu entwickeltes Recyclingverfahren auf Basis eines hochporösen Polymers aus sogenannten Porphyrinen, mit dem sich aus Elektroschrott bevorzugt Edelmetalle gewinnen lassen. Die Methode funktioniert auch dann, wenn mehr als 60 Metalle in einer Lösung vorhanden sind. Klaus Opwis, der am Deutschen Textilforschungszentrum Nord-West in Krefeld an ähnlichen Metallgewinnungsverfahren mit Hilfe spezieller Textilien forscht, bezeichnet diese Porphyrin-Recyclingmethode als „sehr vielversprechenden Ansatz“. Jedoch hält Daniel Goldmann von der TU Clausthal-Zellerfeld die Methode zwar für wissenschaftlich „nicht uninteressant“, erkennt aber keinen Ansatz für eine Umsetzung im großen Maßstab, da dabei der komplette E-Schrott in Königswasser aufgelöst werden muss. Auch Katrin Bokelmann von Fraunhofer-IWKS sieht hier kein Standardverfahren, weil die Prozessschritte mit Säuren und Basen zu aufwendig sind. Zudem bleiben diese am Ende als Abfall übrig. „Dafür sind Schmelzprozesse etabliert.“

*„... in der Hoffnung, dass sich unser Leben bis dahin wieder normalisiert hat.“*

Um die Wiederverwertung von Plastik hat sich längst ein ganzer Wirtschaftszweig entwickelt. Der Anteil von recycelten Kunststoffen in Industrieprodukten und Verpackungen lag 2017 bei rund 12 %. Derzeit allerdings hat die Branche große Probleme. „Aufgrund der Corona-Krise sinkt die Nachfrage aus der kunststoff-verarbeitenden Industrie weiter mit dem Ergebnis fallender Preise sowohl für Neuware als auch für Recyclate“, betonte Herbert Snell, Vizepräsident des Bundesverbands Sekundärrohstoffe und Entsorgung. Einige Recyclinganlagen seien bereits abgestellt oder produzierten mit geringerer Leistung. Notwendig sind deshalb unbedingt kostengünstigere, produktivere Verfahren und nachhaltige Lösungen.

### **Nachhaltigkeit stärker in die Diskussion bringen**

In einer gemeinsamen Veranstaltung des Sächsischen Arbeitskreises Elektronik-Technologie VDE/VDI (SAET) und des VDE-Arbeitskreises Mess- und

Automatisierungstechnik sollte die Thematik ‚Nachhaltigkeit in der Elektronik und Sensorik‘ diskutiert werden. Entstanden war diese Idee aus der interdisziplinären Zusammenarbeit in dem Nachwuchsforscher-Projekt ‚bioESens‘ an der HTW Dresden, in dem die beiden Obleute der Arbeitskreise Prof. Reinhard Bauer und Prof. Gunther Naumann mit ihren Mitarbeitern beteiligt waren.

Wie so Vieles in Zeiten von Covid-19 scheiterte dieses für April geplante Vorhaben und auch der Versuch zur Verlegung in den Juni „in der Hoffnung, dass sich unser Leben bis dahin wieder normalisiert hat“ (SAET-Organisator Dr. Martin Oppermann vom IAVT der TU Dresden). So wurde diese Veranstaltung schließlich ein ‚Corona-Opfer!‘

„Nachfragen, nicht nur aus den Arbeitskreisen zu der Thematik Nachhaltigkeit, zeigen, dass das Interesse der Fachkollegen daran hoch und sehr aktuell ist,“ betonte Prof. Bauer. Deshalb haben sich die Organisatoren entschlossen, gemeinsam mit dem Autor, der bisher fast regelmäßig über die SAET-Treffen in der PLUS berichtete, dieses Thema im Rahmen des ‚Berichtes aus Dresden‘ aufzugreifen und damit dem Interessentenkreis zugänglich zu machen. Nachfolgend wird über das Projekt bioESens informiert und auf der Basis von Zuarbeiten der Projektmitarbeiter ein Überblick zu ausgewählten Schwerpunkten gegeben.

### **Das Projekt bioESens**

Die Anwendung von Biopolymeren in elektronischen Bauteilen stellt besonders hohe Anforderungen an die Compoundierung und Modifizierung, um die benötigten Eigenschaftsprofile erreichen zu können. Trotzdem konnten im Rahmen des an der Hochschule für Technik Dresden (HTW Dresden) angebundenes und aus dem Europäischen Sozialfonds (ESF) finanzierten Projektes bioESens praxistaugliche Lösungsansätze für den Einsatz biobasierter Kunststoffe im Anwendungsfeld Elektrotechnik, Elektronik und Sensortechnik gefunden werden, die die komplette Wertschöpfungskette vom Biomaterial, dessen werkstofflicher Modifizierung und Verarbeitung, die Applikation in Sensortechnologien und -funktionen bis zu Fragen der Produktionstechnik, Anwendungsprüfung, Haltbarkeit und Umweltverträglichkeit umfassen.

Die Besonderheit des Projektes, erläuterte Prof. Bauer, ist der starke interdisziplinäre Ansatz zwi-

Im Elektronik-Technologie-Labor der HTW Carolin Henning und Philipp Zink mit ihren Urkunden Excellent PosterAward und Best Paper Award des IEEE for Young Scientists von der ISSE 2020



Foto: HTW

schen den Fakultäten Landbau/Umwelt/Chemie (Prof. Kathrin Harre, Prof. Knut Schmidtke), Elektrotechnik (Prof. Reinhard Bauer) und Maschinenbau (Prof. Gunther Göbel, Prof. Gunther Naumann). Fachübergreifend wurden in einer Nachwuchsforscherguppe Absolventen verschiedener Ingenieurstudiengänge der HTW für Nutzung, Konzeption, Entwicklung und Recycling von Produkten aus biobasierten Kunststoffen in den Bereichen Projektmanagement, Social Skills, eigener Lehrtätigkeit und interdisziplinäres Spezialwissen qualifiziert. Das Projekt sollte zudem einen Beitrag sowohl zum Transfer aktueller Forschungsergebnisse in die Praxis, zum Erschließen neuer Anwendungsfelder für biobasierte Kunststoffe als auch zur interdisziplinären Weiterentwicklung von Lehre und Forschung in Ingenieurstudiengängen leisten.

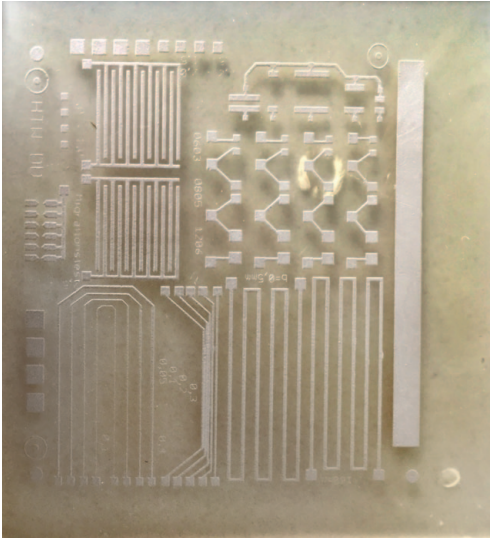
Die Veröffentlichungen zu den Projekt-Ergebnissen z.B. auf dem ‚International Spring Seminar on Electronics Technology‘ (ISSE) fanden 2018 und 2020 international Beachtung und wurden sogar mit dem ‚Excellent Poster‘ und dem ‚Best Paper Award for Young Scientists‘ des IEEE ausgezeichnet.

### **Neue Biopolymere: Eignung für Elektronikbaugruppen**

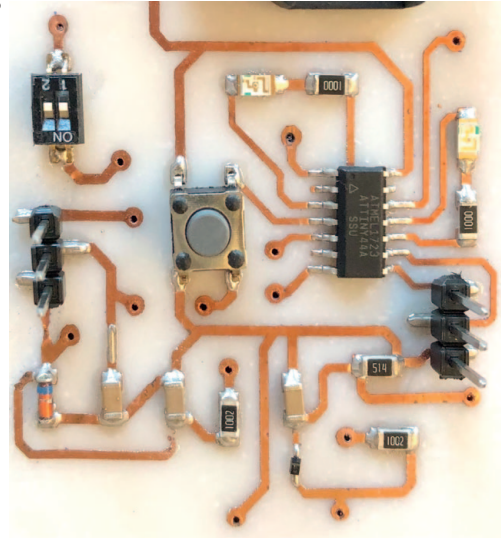
Ein Schwerpunkt des von Anna Schmid und Carolin Henning bearbeiteten Themas lag in der Auswahl und Entwicklung neuer Biopolymere als Substratmaterial für Verdrahtungsträger und der Anpassung an die

funktionalen Anforderungen als auch an die technologischen Prozesse der Aufbau- und Verbindungstechnologien (AVT). Bisherige nachhaltige Produkte besitzen die Nachteile einer meist unzureichenden Temperaturstabilität und eines geringen Brandschutzes. Als geeignet erwiesen sich die Polymilchsäure (PLA) für starre bis leicht biegsame Verdrahtungsträger und das Polyurethan (PU) für flexible und verformbare Substrate. Sie bieten die Möglichkeit zum Recycling, der Verwendung in einer Werkstoffkreislaufwirtschaft oder zum biologischen Abbau. Eine Optimierung der Grundwerkstoffe wurde mittels Additiven hinsichtlich der Verbesserung der elektrischen, mechanischen (Celluloseacetat), brandschutztechnischen (Zinkpyrophosphat) und verarbeitungstechnischen Eigenschaften erzielt. Optimierte wurde das Grundmaterial im Labormaßstab und daraus abgeleitet in Kleinserie mittels Spritzguss Substrate für nachfolgende Untersuchungsschwerpunkte hergestellt. Betrachtet wurden Einsatzfelder mit begrenzten Temperaturanforderungen, eingegrenzten Zuverlässigkeitsansprüchen und Einsatzdauer für einen Einstieg in die Elektronik, wobei die Biokompatibilität beispielsweise für Anwendungen in der Umwelt- und Medizintechnik spricht. Die Eigenschaften der optimierten Substrate kommen bei vergleichenden Untersuchungen dem FR2 nahe bzw. ergaben bei einigen Parametern auch etwas günstigere Werte (z.B. Durchschlagsspannungsfestigkeit  $U_d = 22 \text{ kV/mm}$ , relative Permittivität  $\epsilon_r = 2,5$ ). Gegenüber bisher bekannten





Fotos: Schmid/Henning

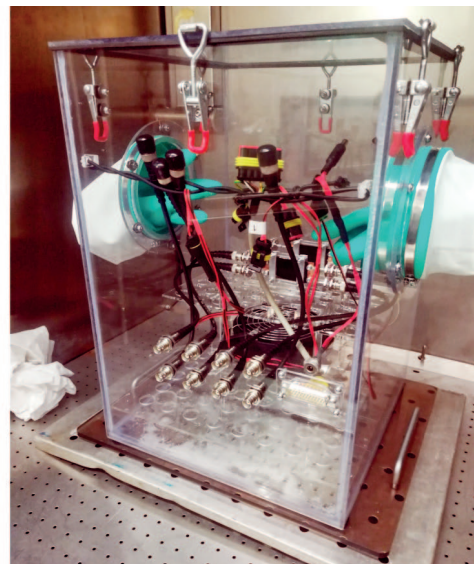
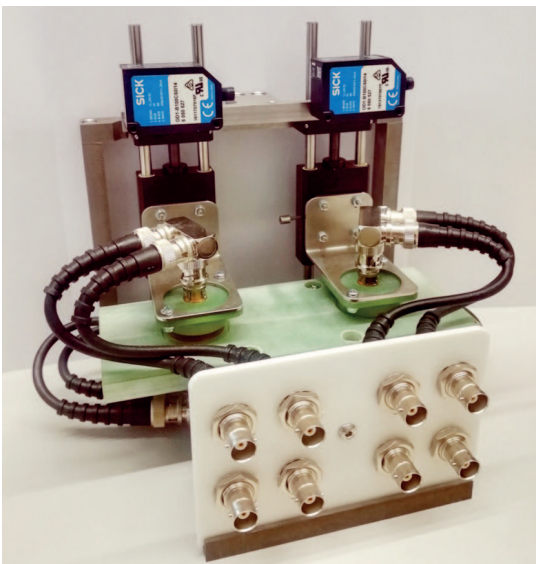


nachhaltigen Trägern konnte auch eine Erhöhung der Temperaturstabilität erzielt werden, die es gilt, in der Weiterentwicklung zu verbessern.

Für die Entwicklung kostengünstiger Sensorik- oder Verdrahtungsträger wurde die Polymer-Dickschichttechnik eingesetzt. Erzielt wurden minimale Strukturbreiten um 200 µm auf beiden Materialsystemen. Die Aushärtung der Polymerpasten musste jedoch aufgrund der Temperaturstabilität teilweise unterhalb der empfohlenen Aushärtetemperaturen mit verän-

Teststrukturen in Polymer-Dickschichttechnik auf PLA-Träger (li.) und PLA-Träger mit Cu-Leiterzügen zur Erprobung der Bauelementemontage (re.) Prüfstände für den Material- und Sensortest (u.)

dertem Temperatur-Zeit-Profil erfolgen. Eine Verbesserung bei der Verformung durch den Wärmeprozess wurde durch Optimierung der Aushärtetemperatur und Anpassung der Zusammensetzung erreicht.



Fotos: Firzlauff/Kettwig

Biopolymer-Verdrahtungsträger mit gut leitfähigen und montagefähigen Strukturen konnten in typischer Leiterplattentechnologie hergestellt werden. Abhängig von der Zusammensetzung des PLA-Trägers wurden die Parameter zum Laminieren der Cu-Folien angepasst. Eine gute Anbindung konnte aufgrund der Schmelzfähigkeit des PLA-Trägers bei erhöhten Temperaturen ohne zusätzliche Kleberschicht erzielt werden. Die Laminierqualität bestimmt die Ergebnisse bei der nachfolgenden Strukturierung wesentlich. Die Prozesse Fotolithographie, Ätzen und Strippen sind unter Laborbedingungen mit den neuen Materialien kompatibel. Erreicht wurden gleichfalls Leiterzugbreiten im Bereich von 200 µm. Untersucht wurden auch Möglichkeiten zur Durchkontaktierung, unter anderem die Black-Hole-Technologie. Damit konnte auch die Anwendung der Galvanik für zweiseitige Leiterplatten auf Biopolymerbasis erschlossen werden.

Zur Untersuchung der SMD-Montagefähigkeit wurden unter Berücksichtigung der begrenzten Temperaturstabilität der Trägermaterialien niedrigschmelzende Lote wie SnBiAg eingesetzt. Im direkten Vergleich mit Baugruppen auf FR4 Substraten ergaben die PLA-Aufbauvarianten bei Schertests an montierten SMD nur geringfügig schlechtere Ergebnisse.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass funktionsfähige elektronische Baugruppen auf Biopolymerbasis unter Laborbedingungen realisierbar und Biopolymersubstrate als Verdrahtungsträger in elektronischen Baugruppen grundsätzlich für nachhaltige Konzeptionen geeignet sind. Ein hohes innovatives Potenzial zur

Anpassung und Optimierung ergibt sich durch Einbringen von Additiven in PLA-Composite. Die dadurch erreichte höhere Temperaturstabilität bietet zwar bessere Voraussetzungen für Einsatz und Montage, jedoch mit FR4 vergleichbare Ergebnisse konnten nicht erzielt werden. Die bisherigen Untersuchungen unter Laborbedingungen sollten auch für eine praktische Überführbarkeit in Nachfolgeprojekten weiter ausgebaut und unteretzt werden.

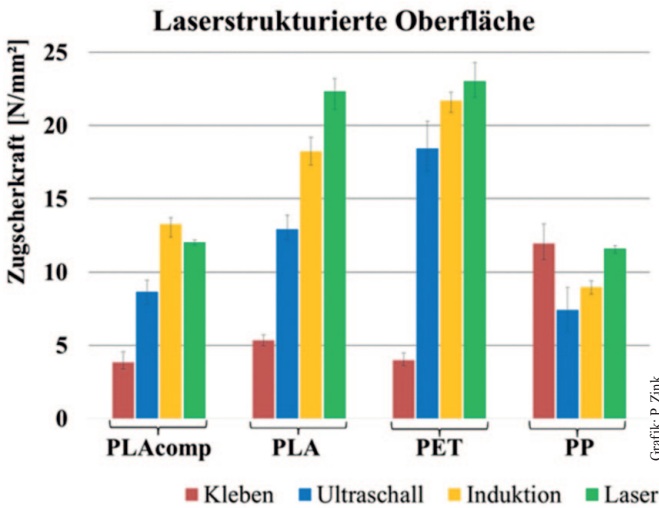
### **Modifikation neuer Biopolymere für Sensorapplikationen**

Die Materialentwicklung für biobasierte und biologisch abbaubare Sensorschichten war im Rahmen des Nachwuchsforscherprojektes Aufgabe von Daniel Firzlaß und Henry Kettwig. Die verwendete Polymerfolie besteht primär aus Gelatine. Um die Folien leitfähig und haltbarer zu machen, wurden unterschiedliche Additive verwendet. Für diese Versuche wurden Biopolymere ausgewählt, die auf Grund der geprüften physikochemischen Eigenschaften einen möglichst breiten Anwendungsbereich abdecken und biobasierte, biologisch abbaubare oder natürlich vorkommende Additive (Plastifizierer, Vernetzer, Leitadditive) enthalten. Mittels Gießens wurden Proben hergestellt, die Zusammensetzung und deren Einfluss auf die Materialeigenschaften getestet. Darauf aufbauend konnten mit Rakel- und Spin-Coating-Verfahren definierte Proben (Größe: 30 x 50 mm) mit Schichtdicken um 0,2 mm mit verschiedenen Messstrukturen realisiert werden. Auch dreidimensionale Strukturen wurden entwickelt. Die elektrische Kontaktierung erfolgte durch Silberlack mit angespressten Kontakten.



#### **Zur Person**

Dr. Rolf Biedorf schreibt seit 1994 für den Leuze-Verlag und berichtet seit 10 Jahren in der *PLUS* über aktuelle Ereignisse der sächsischen Mikroelektronikszene. Nach seinem Chemie-Studium war er in der Elektronikindustrie und vor allem an der TU Dresden in Forschung und Lehre auf den Gebieten der Schicht- bzw. Aufbau- und Verbindungstechnologien der Elektronik tätig.



Mit PLA und laserstrukturiertem Aluminium können ähnliche Festigkeiten wie mit konventionellen Kunststoffen erreicht werden

werden, wurden PLA und die beiden Referenzkunststoffe PET und PP mit Aluminium durch verschiedene Verfahren gefügt. Zur Haftungssteigerung wurde die Aluminiumoberfläche verschiedenen Vorbehandlungsverfahren, wie einfaches Reinigen, Sandstrahlen oder Laserstrukturieren unterzogen. Neben dem Klebverfahren, dem derzeitigen

Verschiedene Aufgabenstellungen, wie die elektrische Charakterisierung (Leitfähigkeit und kapazitive Eigenschaften), die Charakterisierung der sensorischen Eigenschaften gegenüber den physikalischen Größen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Dehnung sowie die Realisierung von reproduzierbaren Messungen unter konstanten klimatischen Bedingungen wurden bearbeitet, Messstände aufgebaut. Veranschaulicht wurden die Ergebnisse mittels Demonstratoren. Der biokompatible Kunststoff weist in Abhängigkeit der verwendeten Additive einen größeren sensorischen Effekt gegenüber der Luftfeuchtigkeit als zur Temperatur auf. Wird die Impedanz betrachtet, beträgt die Änderung circa 55 kOhm bei einer Änderung der absoluten Luftfeuchte von 5,5 g/m<sup>3</sup> zu 15,6 g/m<sup>3</sup>. Der biokompatible Kunststoff stellt eine gute Ausgangsbasis für weitere sensorische Entwicklungen dar, auf welche dieser dann spezifisch auszulegen ist.

### Fügeverfahren mit neuen Biopolymeren

Philipp Zink untersuchte neuartige Fügeverfahren, um hochbelastbare PLA-Aluminium-Verbindungen wirtschaftlich herstellen zu können. Ziel war, das Anwendungsfeld des bisher vor allem als Verpackungskunststoff eingesetzten PLAs zu erweitern, etwa als Konstruktionswerkstoff bei Haushaltsgeräten, Elektronikartikeln oder Dekorelementen für die Automobilindustrie. Da in diesen Bereichen häufig Mischverbindungen – Kunststoff-Metall – verwendet

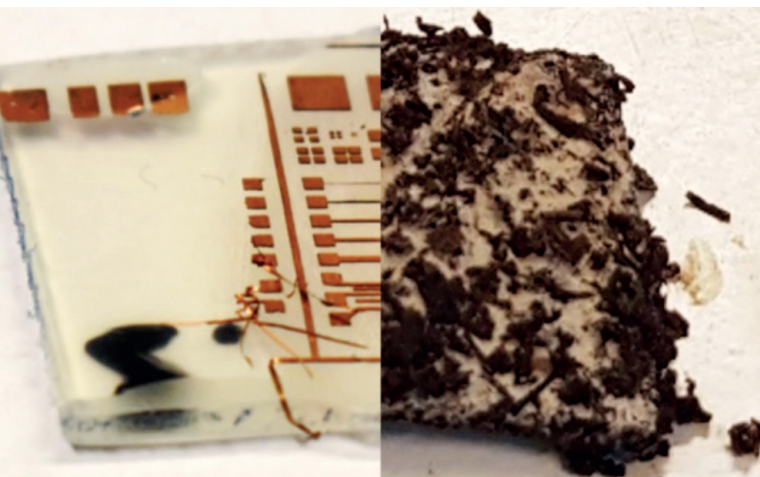
Industriestandard, kamen innovative Fügeverfahren, wie Ultraschallfügen und thermische Direktfügeverfahren durch Induktion und Laser zum Einsatz.

Die Untersuchungen zeigten, dass sich PLA und PET hervorragend durch Ultraschallfügen und thermisches Direktfügen (Induktion oder Lasererwärmung) fügen lassen. Bei entsprechender Vorbehandlung der Oberfläche können hohe Verbindungsfestigkeiten realisiert werden, die Klebverbindungen weit übertreffen. Durch die große Bandbreite der Verfahren und Kunststoffe, die unter gleichen Bedingungen untersucht wurden, ist nun erstmalig ein direkter Vergleich der Belastbarkeiten von Mischverbindungen von PLA und anderen Kunststoffen mit Metall für vier industriell wichtige Fügeverfahren möglich. Der biologische Ursprung des PLA stellt bei diesen Verbindungstechnologien keinen Nachteil dar. Die äußerst kurzen Prozesszeiten erlauben ein schnelles Handling und somit eine sehr gute Produktivität. Durch den Verzicht auf Zusatzwerkstoffe und Chemikalien erreicht man zusätzlich eine höhere Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit.

### Recycling oder Kompostierung?

Um die ökotoxikologischen Effekte der im Projekt entwickelten Kunststoffe auf Gelatine- bzw. Polymilchsäure-Basis zu bewerten, hat Richard Zeumer akute Expositionsstudien mit aquatischen und terrestrischen Organismen durchgeführt, um die unterschiedlichen Eintragswege von Kunststoffen in die





Prüfung der biologischen Abbaubarkeit von PLA-Trägern mit Cu-Leitstrukturen vor und nach einer Kompostierungsetappe

Foto: R.Zauner

Natur abbilden zu können. So wurden sowohl die ausgelaugten Kunststoffe als auch die in den Kunststoffen enthaltenen Additive in Akutstudien mit dem Großen Wasserfloh (*Daphnia magna*) sowie Keimungsstudien mit der Gartenkresse (*Lepidium sativum*) nach OECD- und ISTA-Richtlinien bewertet. Auch wurden Kompostierbarkeit, Zersetzung und biologische Abbaubarkeit der Kunststoffmaterialien bestimmt, indem diese für 60 Tage DIN EN ISO-Richtlinie 20200 kompostiert sowie deren biologische Abbaubarkeit in Respirometerstudien analysiert wurden. Anschließend wurde die Umweltverträglichkeit der resultierenden Komposterden in Gefäßversuchen mit der Sojabohne (*Glycine max*) getestet. Aus diesen Studien ergab sich eine hohe Umweltverträglichkeit der entwickelten Materialien und geringe toxische Effekte auf die untersuchten Organismen. Unter optimalen Kompostbedingungen wurde innerhalb 60 Tagen eine hohe Zersetzungsrate (> 80%) beobachtet. Eine Beeinflussung des Pflanzenwachstums durch die während der Kompostierungsversuche freigesetzten Kupferionen konnte nicht nachgewiesen werden. Zur umfassenden Risikobewertung der getesteten Materialien sind jedoch noch weitere Studien nötig, um eine nachhaltige, umweltverträgliche Verwendung biobasierter Kunststoffe sicherzustellen.

### Erkenntnisse zum Projektabschluss

Zur Erschließung nachhaltiger Konzepte in der Elektronik konnten die Forscher an der HTW wesentliche

Produkte möglich, die dem Anspruch der Nachhaltigkeit gerecht werden.

Die Erfahrungen aus dem Projekt bioESens zeigen, dass im Bereich der Elektronik ein Durchbruch nachhaltiger Produktkonzeptionen eine möglichst große Tiefe der innovativen Entwicklungsarbeit und Zusammenarbeit erfordert, betonte Projektleiterin Prof. Kathrin Harre. Die erzielten positiven Ergebnisse zeigen, dass bei den Herausforderungen zu innovativen und nachhaltigen Lösungen eine sehr gute interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Werkstoffentwicklung, den verschiedenen Ingenieurdisziplinen zur Verarbeitung und applikationsspezifischen konzeptionellen Nutzung bis zum Recycling bzw. zur Entsorgung Voraussetzung für eine erfolgreiche Arbeit sind. Aspekte der Werkstoff-, Produkt- und Fertigungskonzeption sowie der Applikationsbedingungen sind in einem engen Zusammenspiel komplex zu betrachten.

Das Projekt bioESens ist auch ein gutes Beispiel, wie an der HTW Dresden die Profillinie ‚Nachhaltige Lebensführung‘ in Lehre und Forschung an zahlreichen Stellen mit Leben und vielen interessanten Ergebnissen erfüllt wird.

### Weitere Informationen:

Sächsischer Arbeitskreis Elektronik-Technologie:  
[avt.et.tu-dresden.de/saet/arbeitskreis/](http://avt.et.tu-dresden.de/saet/arbeitskreis/)

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden,  
 Fakultät Elektrotechnik: [htw-dresden.de/fe](http://htw-dresden.de/fe)

Projekt BioESens:  
[htw-dresden.de/luc/forschung/nachwuchsforscherguppe-bioesens](http://htw-dresden.de/luc/forschung/nachwuchsforscherguppe-bioesens)