

Rezyklierbare Epoxidharze für die Herstellung nachhaltiger Faserverbundwerkstoffe als Leiterplattensubstrate

Anna Lena Seibel

anna.seibel@uni-bayreuth.de

Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe (LPW)

1. Einleitung und Motivation

Im Zeitalter der Digitalisierung dienen elektronische Geräte als Schlüsseltechnologie und stehen für den Fortschritt unseres Lebensstils.¹ Als einer der am schnellsten wachsenden Industriesektoren stellt der globale Elektronik-Markt aufgrund der meist unkontrollierten Abfallentsorgung jedoch ein massives Problem für unseren Planeten dar.^{2,3} Leiterplatten (LP) als Herz elektronischer Geräte sind dabei eine besondere Herausforderung, da sie aus zahlreichen Materialien bestehen deren vollständige Separation und Recycling derzeit noch nicht möglich ist. So zum Beispiel das Substrat aus glasfaserverstärktem Epoxidharz (EP) das üblicherweise verwendet wird da es herausragende Eigenschaften und eine gute Stabilität gegenüber äußeren Einflüssen aufweist, die sich aus den kovalenten Vernetzungen im Polymernetzwerk ergeben. Diese dauerhaften Vernetzungen sind jedoch der Grund, warum das Duroplast nicht recycelt werden kann. Neue Fortschritte in der Polymerchemie und Materialwissenschaft haben innovative recyclingfähige EP-Systeme hervorgebracht, die auf der Integration von spaltbaren oder dynamischen kovalenten Bindungen im Polymernetzwerk basieren (vgl. Abb. 1). Um die Einsatzfähigkeit recycelbarer EP für LP-Substrate zu evaluieren, wurden das EP-Vitrimersystem Vitrimax T130 (Mallinda Inc.) und das spaltbare EP-System Recyclamine R501 (Aditya Birla Group) miteinander verglichen. Der Fokus der Studien lag auf den Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften.

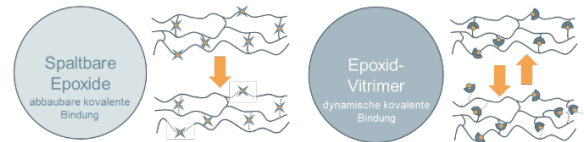


Abb. 1: Schematische Darstellung der durch spaltbare oder dynamische kovalente Bindungen recycelbaren Epoxidharze

2. Methodische Herangehensweise

Um die Eignung der rezyklierbaren EP-Systeme für die Anwendung als LP-Substrat zu untersuchen, wurden die kommerziell erhältlichen Härter Vitrimax T130 und Recyclamine R501 mit dem Standard EP-Novolak D.E.N.438 kombiniert und gemäß der jeweiligen Angaben der Materialdatenblätter ausgehärtet. Für ein möglichst blasenfreies Resultat wurde außerdem das Additiv BYK-A530 hinzugegeben. Als Referenzmaterial wurde eine weitere Mischung mit dem konventionellen Härter DYHARD 100S und dem dazugehörigen Beschleuniger UR500 angefertigt. Es folgte ein umfangreiches Materialscreening, wie es in **Abb. 2** dargestellt ist.

Im ersten Schritt wurden die reinen Harzplatten charakterisiert. Die Analyse umfasste die thermischen (T_g , T_{d5}), thermo-mechanischen (CTE, Netzwerkdichte), mechanischen (3-Punkt-Biegung) und dielektrischen (ϵ_r , $\tan \delta$) Eigenschaften.

Da LP-Substrate aus glasfaser-verstärkten EP bestehen, die über das Prepreg-Verfahren hergestellt werden, war auch die Verarbeitbarkeit ein relevanter Faktor dieser Arbeit. Hierfür wurden die Rheologie, die Latenz und der Tack der recycelbaren EP-Systeme bestimmt um die optimalen Prozessparameter

¹ V. Arroyos, M.L.K. Viitaniemi, N. Keehn, V. Oruganti, W. Saunders, K. Strauss, V. Iyer, B.H.Nguyen (Eds.), A Tale of Two Mice: Sustainable Electronics Design and Prototyping, 2022.

² C. Santato, P.-J. Alarco, The Global Challenge of Electronics: Managing the Present and Preparing the Future, Adv

zu finden. Mit diesen wurden anschließend an der Prepreg Line (Fa. EHA) das E-Glas-Gewebe 2116 (Leinwand, 109 g/m²) getränkt. Anschließend wurden die Lagen von Hand laminiert und in der Hydraulikpresse LZT 100L (Fa. Langzauner) ausgehärtet.

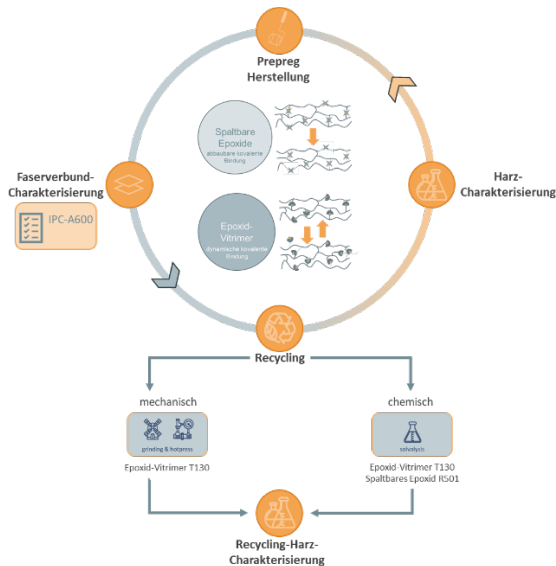


Abb. 2: Übersichtsdarstellung über den Umfang und Plan dieser Arbeit

Die erzeugten Faserverbundwerkstoffe (ϕ_f : 42 %) wurden gemäß den entsprechenden Normen analog zum Reinharz untersucht. Ergänzend wurden für die mechanischen Kennwerte die ILSS und die Cu-Schälfestigkeit und für die dielektrischen Eigenschaften die Durchschlagsfestigkeit U_d ermittelt.

In einem letzten Schritt wurden die Probekörper aus den Reinharz-Systemen und den Kompositen verschiedenen Recycling-Routen zugeführt. So wurde das Vitrimere T130 unter Hitzezufuhr mechanisch und in einer Precursor-Lösung chemisch recycelt. Das spaltbare R501 wurde in Essigsäurelösung chemisch recycelt und als Thermoplast rückgewonnen^{4,5,6,7}.

3. Ergebnisse und Fazit

Wie in Abb. 3 ersichtlich ist, konnte gezeigt werden, dass die Eigenschaften aller EP-Systeme weitgehend den Anforderungen der Elektronikindustrie (IPC-A600) entsprechen. Jedoch wies das Vitrimere T130 einige Schwächen auf, die sich mit der erheblich niedrigeren Netzwerkdicke von 2000 mol/m³ begründen lassen (Vgl. R501: 6500 mol/m³, Ref: 9000 mol/m³). So sind die thermischen Eigenschaften durch eine höhere Beweglichkeit herabgesetzt und auch die mechanischen Kennwerte nehmen ab.

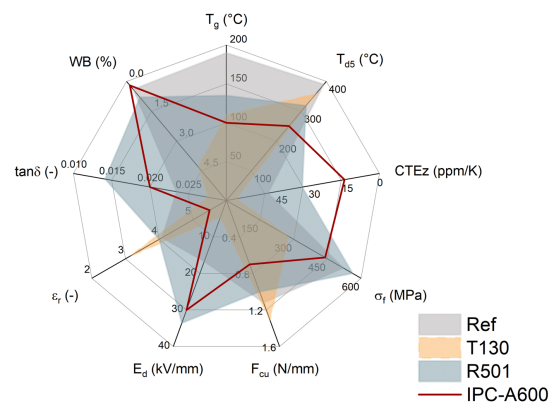


Abb. 3: Übersicht der wichtigsten Ergebnisse für die drei glasfaserverstärkten Harzsysteme und die gemäß IPC-A600 definierten Zielgrößen

Andererseits zeigt das Vitrimere für das Recycling das höchste Potenzial, da es vollständig rückgewonnen werden und wieder als Harz in einer vergleichbaren Anwendung eingesetzt werden kann. Das spaltbare EP R501 hingegen wird als Thermoplast rückgewonnen und kann damit nicht vollständig im Kreislauf geführt werden. Beide Systeme leisten jedoch einen wertvollen Beitrag zur Ressourcenschonung und bieten ein großes Potenzial für mehr Nachhaltigkeit in der Elektronikindustrie.

⁴ P. K. Dubey, S. M. Mahanth, D. Amit (Ed.), Recyclamine® - Novel Amine Building Blocks for a Sustainable World, 2021.

⁵ G. Cicala, S. Mannino, A.D. La Rosa, D.R. Banatao, S.J. Pastine, S.T. Kosinski, F. Scarpa, Hybrid biobased recyclable epoxy composites for mass production, Polym. Compos. 39 2018 E2217-E2225. <https://doi.org/10.1002/pc.24582>.

⁶ G. Cicala, D. La Rosa, M. Musarra, G. Saccullo, R. Banatao, S. Pastine, Recyclable epoxy resins: An example of green

approach for advanced composite applications, AIP Conference Proceedings 2016 1–4. <https://doi.org/10.1063/1.4949602>.

⁷ L. Saitta, V. Prasad, C. Tosto, N. Murphy, A. Ivankovic, G. Cicala, G. Scarselli, Characterization of biobased epoxy resins to manufacture eco-composites showing recycling properties, Polymer Composites 43 2022 9179–9192. <https://doi.org/10.1002/pc.27095>.