

# ARES – Abfallverminderung durch Recycling epoxidharzbasierter Stoffe

Prof. Dr. Gerd Wehnert  
Dr.-Ing. Dominik Söthje  
Herbert Schlachter, M. Eng.  
Christoph Fritze, B. Sc.  
Fakultät Angewandte Chemie  
Technische Hochschule Nürnberg

Faserverbundkunststoffe finden aufgrund ihrer exzellenten Eigenschaften bereits jetzt vielfältigen Einsatz. Für die Zukunft wird ein weiterer starker Zuwachs erwartet. Ursachen sind die steigenden Produktionszahlen in der Luftfahrt, in der Automobilindustrie in Kombination mit der geforderten Senkung des CO<sub>2</sub>-Flottenausstoßes bis 2020 sowie der Aufschwung beim Einsatz von Windkraftanlagen.

## Wesentliche Projektziele

Bei den mit Carbonfasern verstärkten hochpreisigen Kompositen weisen etwa 72 Prozent eine Matrix aus Epoxidharzen auf. Diese lassen sich als dreidimensional vernetzte Kunststoffe nicht mehr aufschmelzen bzw. lösen und so keinem, den Thermoplasten analogen, Recycling unterwerfen. Eine Lösung bietet jedoch das chemische Recycling: Hier werden die Vernetzungsstellen chemisch mittels eines speziellen Reagenzes gespalten und so das Netzwerk in kleinere, dann lösliche Moleküle zerlegt. Anschließend können die Fasern von der Matrix separiert werden. Das Lösungsmittel wird verdampft und das Polymer und die Fasern werden getrennt voneinander einem neuen Verwendungszweck zugeführt. Bei Epoxidharzen ist es bis jetzt allerdings noch nicht gelungen, dieses Prinzip technisch anwendbar zu gestalten. Ziel des Projekts ist es, ein Reaktionssystem zu finden, mit dem Epoxidharznetzwerke bereits bei geringem Energieaufwand einfach und schnell nahezu vollständig zersetzt werden können.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2017
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Angewandte Chemie
Projektleitung	Prof. Dr. Gerd Wehnert
Kontaktdaten	E-Mail: gerd.wehnert@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Faserverbundkunststoffe (FVK) bilden eine synergetische Kombination der Eigenschaften ihrer Einzelkomponenten: den verstärkenden, kraftaufnehmenden Fasern und der polymeren, formgebenden Matrix, die auch als Schutz vor äußeren Einflüssen dient. Besonders herausragend sind die hohe Festigkeit und Steifigkeit bei vergleichsweise geringer Dichte, was Faserverbundkunststoffe für den Leichtbau geradezu prädestiniert. FVK werden aufgrund ihrer exzellenten Eigenschaften vor allem zur Herstellung von Windkraftanlagen, in der Luftfahrt und im Automobilbau, aber auch in der Elektronik, Sport- und Freizeitindustrie sowie dem Bootsbau eingesetzt. Hier seien beispielsweise der BMW i3 und i8 (vgl. Abbildung 1) mit einer Struktur aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) wie auch der Airbus A350 mit einem FVK-Anteil von über 50 Ma-Prozent genannt [1]-[7]. Abbildung 2 zeigt die Aufteilung der weltweiten CFK-Produktion nach Anwendungsindustrien [5].



Abbildung 1: Automobil mit Karosserie aus epoxidharzbasier-ten CFK-Bau-  
teilen [8].

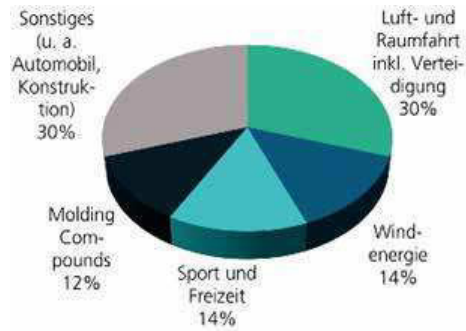


Abbildung 2: Europäische GFK-Produktion 2013 aufgeschlüsselt nach  
Anwendungsindustrien (eigene Darstellung nach [5]).

Da FVK meist starken Belastungen unterworfen sind und Thermoplaste unter Last zum Kriechen neigen, werden in etwa 77 Prozent der ca. 7 Mio. Tonnen global produzierten Komposite Duromere eingesetzt. 23 Prozent der duromeren Matrices aller Komposite (GFK, CFK, etc.) sind Epoxidharze. Bei den mit Carbonfasern verstärkten hochpreisigen Kompositen weisen sogar 72 Prozent eine Matrix aus Epoxidharz auf [9], [10].

Das jährliche Marktvolumen der mit Epoxidharzmatrices ausgestatteten CFK beträgt laut Composites-Marktbericht 2015 der „Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe“ (AVK) etwa 5,9 Mrd. US\$. Der Gesamtumsatz an Epoxidharzen liegt jährlich bei etwa 9,2 Mrd. US\$ [11].

Für die Zukunft wird ein weiterer starker Zuwachs erwartet. Ursachen sind die steigenden Produktionszahlen in der Luftfahrt, in der Automobilindustrie in Kombination mit der geforderten Senkung des CO<sub>2</sub>-Flottenausstoßes bis 2020 auf 95 g·km<sup>-1</sup>, wodurch immer leichtere Bauteile zum Einsatz kommen müssen, sowie der wachsende Markt für Windkraftanlagen [5], [12], [13]. Abbildung 3 zeigt sowohl die globale CFK Produktion der Jahre 2008 bis 2013 als auch den geschätzten Bedarf für die Jahre 2014 bis 2020 [5].

Durch den stetig wachsenden Einsatz von Faserverbundkunststoffen erhöhen sich auch die Ansprüche an deren Nachhaltigkeit, da die Zahl der End-of-Life Teile, also der Bauteile, die am Ende ihres Lebenszyklus entsorgt werden müssen, ansteigt. So liefern vor allem Luftfahrtgesellschaften, aber auch die Automobil- und Windkraftanlagenhersteller solches Material [14]. Ebenso fallen in der Elektronikindustrie jährlich 20 bis 50 Mio. Tonnen Abfall an – darunter auch ein Großteil epoxidharzbasierter Leiterplatten [15].

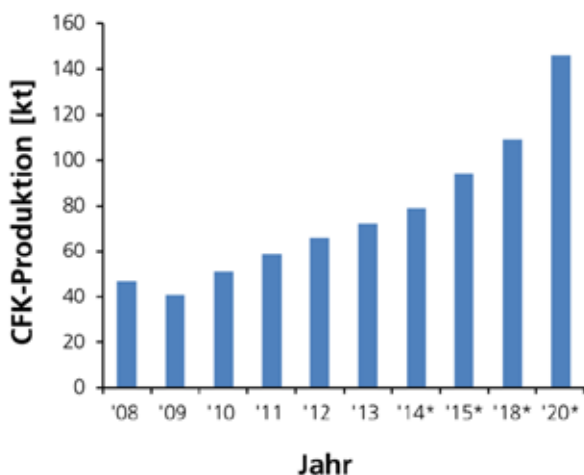


Abbildung 3: Globale CFK-Produktion in Tonnen (\*geschätzt; eigene Darstellung nach [5]).

Nach aktuellem Stand der Technik können gerade die duromerbasierten, im speziellen die mit Aminen gehärteten epoxidharzbasierten Bauteile nur sehr energie- und / oder zeitaufwendig und somit kostenintensiv recycelt werden.

Daher ist das bisher am häufigsten zum Einsatz kommende Verfahren zur (stofflichen) Verwertung duromerer Werkstoffe das Zerkleinern und die anschließende Verwendung als Füllmaterial [16], [17]. Ein Downcycling ist aber nur dann zu verhindern, wenn aus den Recyclingfasern und der polymeren Matrix wieder hochwertige Produkte hergestellt werden können [18]. 1 kg 10 mm langer matrixfreier Carbonkurzfasern besitzt einen Marktwert von ca. 150 €. Dies entspricht – auf die Gesamtproduktion an amingehärteten epoxidharzbasierten CFK gerechnet – einem Marktwert von etwa 3,5 Mrd. € pro Jahr, das alleine die recycelten Fasern aufweisen. Aufgrund dessen ist allen voran das Recycling carbonfaserverstärkter Duromere von wirtschaftlich großem Interesse.

Die in der Vergangenheit gängige Praxis, Verbundkunststoffe auf einer oberirdischen Deponie preiswert, einfach und ohne Vorbehandlung zu entsorgen, ist aufgrund der zum 1. Juni 2005 in Kraft getretenen Änderung zur Siedlungsabfallentsorgung und der Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) vom 2. Mai 2013 zumindest in Deutschland nicht länger möglich [19] - [24]. Die gängigste Vorbehandlung solcher Materialien, die Verbrennung, wird aufgrund der im § 5 der 17. BImSchV (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen) vom 2. Mai 2013 definierten Auflagen besonders erschwert: Eine Abfallverbrennungsanlage ist so zu errichten und zu betreiben, dass in der Schlacke und in der Rostasche ein Gehalt an organisch gebundenem Gesamtkohlenstoff von drei Prozent oder ein Glühverlust von weniger als fünf Prozent des Trockengewichtes eingehalten wird [25]. Diese Grenzwerte werden oftmals nicht eingehalten, so dass nach aktuellem Stand meist nur die Ablagerung in einer Untertagedeponie bleibt [24].

Aufgrund begrenzter Kapazitäten und der eventuellen Einführung einer Deponiesteuer – wie in einigen Ländern bereits erfolgt – stellt die Untertagedeponierung keine langfristig akzeptable Lösung dar [26], [27].

Wegen der beschränkten Möglichkeit zur Deponierung und den bisher nur unzureichenden Recyclinglösungen muss der Industrie und der Forschung daran gelegen sein, für duromerbasierte Faserverbundkunststoffe bereits jetzt entsprechende effiziente Recycling- und Wiederverwertungskonzepte zu entwickeln und zu evaluieren. Schlussendlich sollte der Standard-Hierarchie für den Umgang mit Abfallstoffen, entsprechend der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG Artikel 4 der Europäischen Gemeinschaft vom 19. November 2008, gefolgt werden (vgl. Abbildung 4) [28].



Abbildung 4: Hierarchie für den Umgang mit Abfallstoffen nach der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG der Europäischen Gemeinschaft (eigene Darstellung nach [28]).

Grundsätzlich lassen sich Duromere als dreidimensional vernetzte Kunststoffe nicht mehr aufschmelzen bzw. lösen und so keinem den Thermoplasten analogen Recyclingverfahren unterziehen: Bei thermoplastischen FVK kann die Polymermatrix beispielsweise durch den Einsatz eines geeigneten Solvens gelöst und anschließend die Fasern von der Matrix separiert werden. Das Lösungsmittel kann verdampft und das Polymer und die Fasern getrennt voneinander einem neuen Verwendungszweck zugeführt werden. Bei Duromeren ist dieser Weg aufgrund der Vernetzung nicht möglich; eine Alternative bietet jedoch das chemische Recycling: Hier werden die Vernetzungsstellen chemisch mittels eines speziellen Reagenzes gespalten und so das Duromer in kleinere, dann lösliche Moleküle (sog. Oligomere) zerlegt. Ist der Vorgang der chemischen Spaltung abgeschlossen, kann wie bei Thermoplasten verfahren werden. Folgende Abbildung 5 zeigt das Recyclingvermögen von Thermoplasten im Vergleich zu Duromeren.

Bei Epoxidharzen ist es – im Gegensatz zu anderen Duromeren, bspw. den recht selten verwendeten Polycyanuraten – noch nicht gelungen, dieses Prinzip technisch anwendbar zu gestalten.

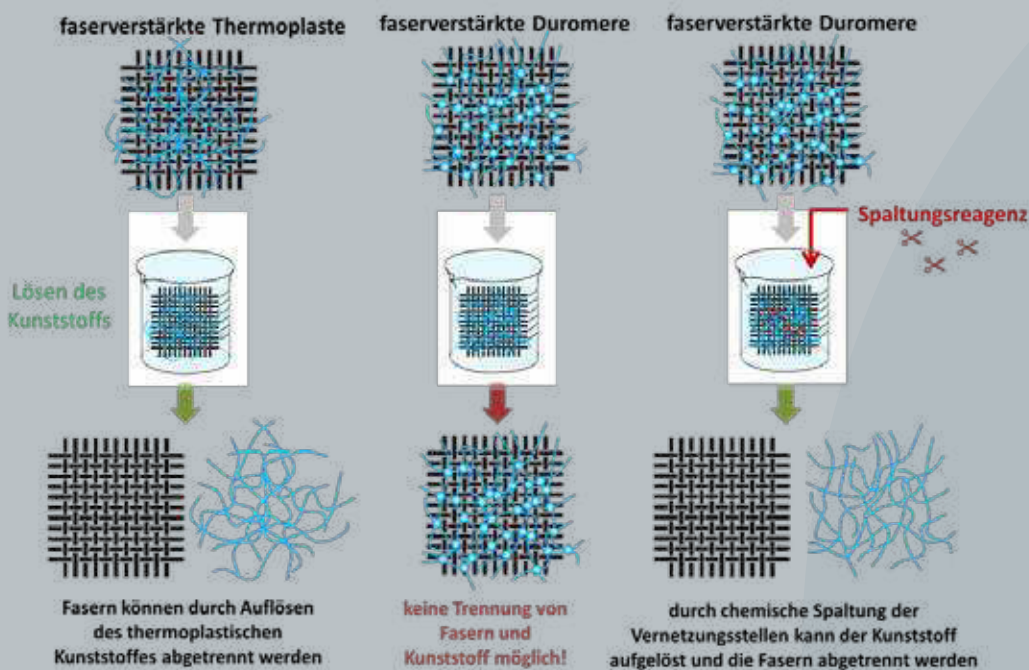


Abbildung 5: Während Thermoplaste direkt gelöst und so von den Fasern getrennt werden können, müssen Duromere zunächst chemisch zersetzt werden, um aus dem unlöslichen Polymernetzwerk lösliche, kleinere oligomere Bestandteile zu generieren. Diese sind dann analog den Thermoplasten löslich und können so von den Fasern separiert zurückgewonnen werden.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Auch nach vielen Fortschritten und der Entwicklung neuer Prozesse im Bereich des Recyclings von Kompositen haben bis heute nur wenige Methoden die Industriereife erreicht. Die Gründe hierfür sind zahlreich, im Vordergrund stehen jedoch immer die Wirtschaftlichkeit und die Frage, für welche Verwendungen die wiedergewonnenen Rohstoffe einsetzbar sind. Dieses Vorlaufforschungsprojekt fokussiert darauf, ein Recyclingreagenz zu finden, das die Solvolyse amingehärteter Epoxidharzmatrizes von CFK ermöglicht, ohne die Faser zu schädigen. Somit wäre die direkte Wiederverwertung der oftmals sehr kostbaren Fasern als Kurzschnittfasern möglich. Es ist das Ziel, bis zum Ende der Gesamtentwicklung einen, wie in Abbildung 6 dargestellten, analogen Recyclingkreislauf zu entwickeln:

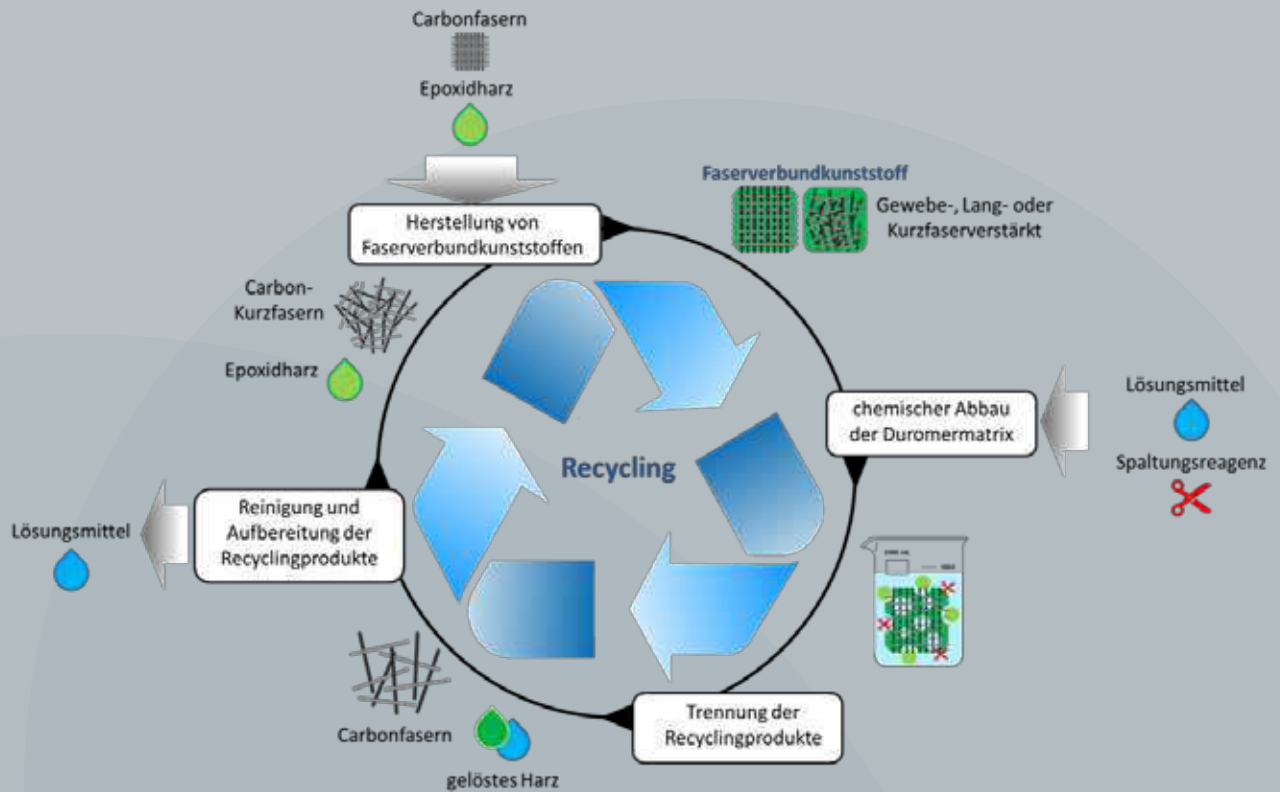


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines idealen Recyclingkreislaufes für CFK-basierte Faserverbundkunststoffe.

Das Ziel des Vorhabens ist es, ein Reaktionssystem zu finden, mit dem Epoxidharznetzwerke bereits bei geringem Energieaufwand einfach und schnell (nahezu) vollständig zersetzt werden können.

Dies soll durch einen neuen Ansatz verwirklicht werden, bei dem eine Lewis-Säure als Katalysator dient. Das Kohlenstoffatom der C-N-Bindung in Epoxidharznetzwerken wird in der Folge der Zugabe der Lewis-Säure partiell positiv geladen, das erleichtert einen Angriff durch ein Nukleophil. Als Nukleophil für die Substitutionsreaktion dient das Lösungsmittel. Einen ähnlichen Ansatz verfolgte bereits die Arbeitsgruppe um Yuqi Wang et al., jedoch kann mit der von ihm vorgestellten Methode lediglich im Autoklaven gearbeitet werden, wodurch das Verfahren bisher nicht wirtschaftlich ist [29].

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Für das Recycling duromerbasierter (epoxidharzbasierter) FVK ist der Schritt der chemischen Spaltung am Wichtigsten und daher zentrales Augenmerk im Vorlaufforschungsprojekt ARES. Nach ausführlicher Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Technik und Wissenschaft und einem darauffolgenden Vergleich der unterschiedlichen Möglichkeiten zum Recycling von Faserverbundkunststoffen, fokussierte sich das Forschungsteam aufgrund der Wirtschaftlichkeit auf eine Solvolyse bei niedriger Temperatur und niedrigem Druck. Sie zielten darauf ab, die milden Reaktionsbedingungen durch den Einsatz von Lewis-Säuren als Reaktionsbeschleuniger zu erreichen. Als Reaktionsgemisch zur Spaltung amingehärteter Epoxidharznetzwerke zog das Team in den durchgeführten Arbeiten eine Vielzahl an verschiedenen Lösungsmitteln und Lewis-Säuren als Katalysatoren in Betracht. Ausgangslage hierfür war die Publikation von Wang et al., nach der Epoxidharznetzwerke im Autoklaven durch Essigsäure und Zugabe einer Lewis-Säure gespalten werden können. Als möglicher Reaktionsmechanismus wurde das in Abbildung 7 dargestellte Reaktionsschema postuliert.

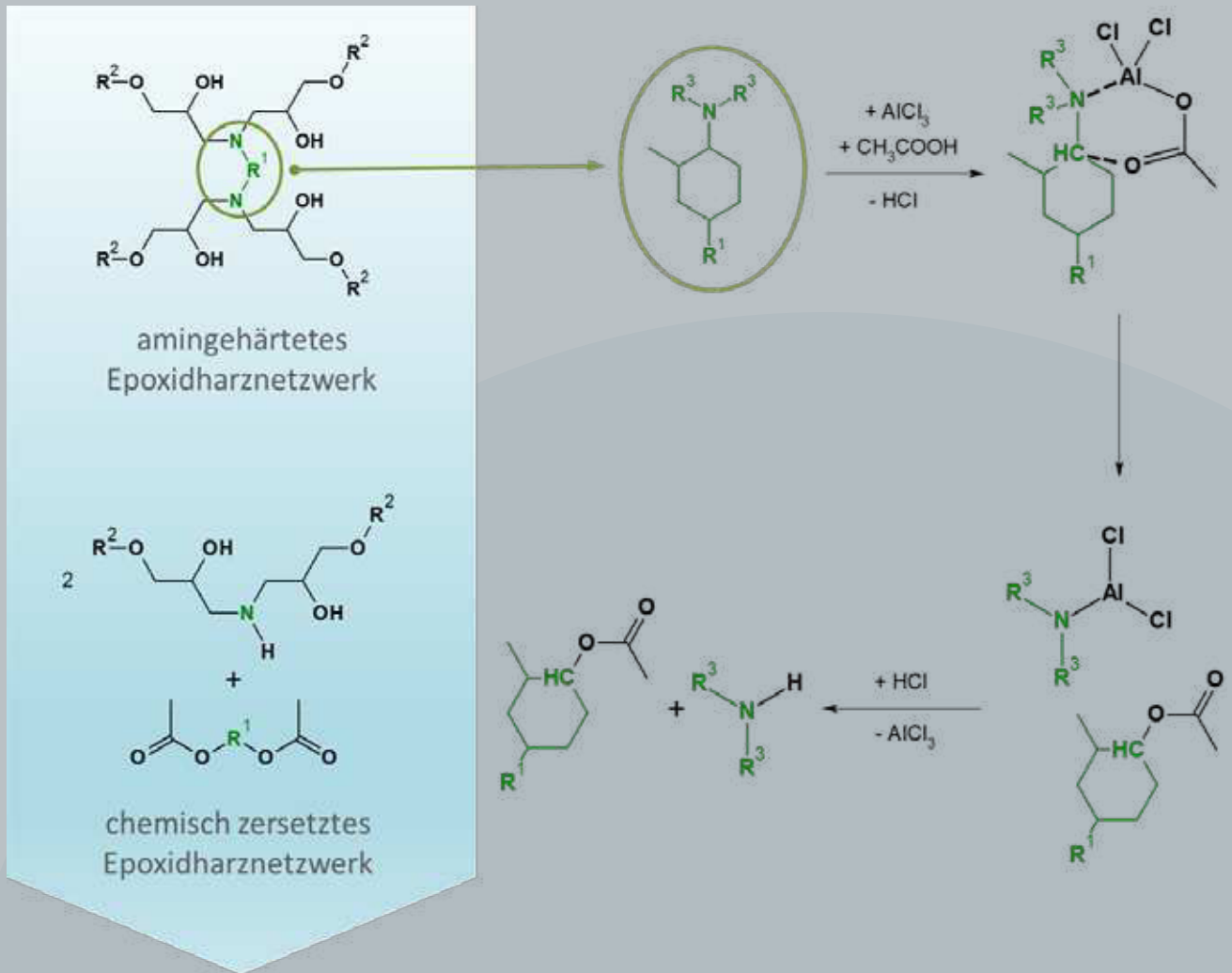


Abbildung 7: Von Wang et al. postulierter Reaktionsmechanismus zum Abbau von mit Aminen gehärteten Epoxidharznetzwerken mittels Essigsäure und der Lewisäure AlCl<sub>3</sub> als Katalysator (eigene Darstellung nach [29]). Die Reaktion erfolgt im Autoklav.

Als Epoxidharzmodellnetzwerke kam bei den im Lehrgebiet Makromolekulare Chemie durchgeführten Versuchen mit Isophorondiamin oder 2-Methyl-1,5-diaminopentan gehärtetes DGEBA (Diglycidylether von Bisphenol A) zum Einsatz.



Abbildung 8: Probekörper der Epoxidharze mit Maßen von ca. 10 x 10 x 6 mm gehärtet mit Isophorondiamin (links) und 2-Methyl-1,5-diaminopentan (rechts).

Zunächst stellte das Forschungsteam das in der Literatur beschriebene Recyclingverfahren unter Verwendung von Aluminiumchlorid und Essigsäure in einem Autoklav (vgl. Abbildung 9) nach. Der sechste Versuch führte zum erhofften Ergebnis, dem vollständigen Abbau eines unlöslichen, mit Isophorondiamin gehärteten Epoxidharznetzwerkes zu löslichen oligomeren Bestandteilen. Mittels Gelpermeationschromatographie konnten die Wissenschaftler um Prof. Dr. Gerd Wehnert die Molekulargewichtsverteilung der erhaltenen Abbauprodukte bestimmen (vgl. Abbildung 10).



Abbildung 9: Versuchsaufbau mit Autoklav und Kontrolleinheit zur Nachstellung der Versuche von Wang et al.

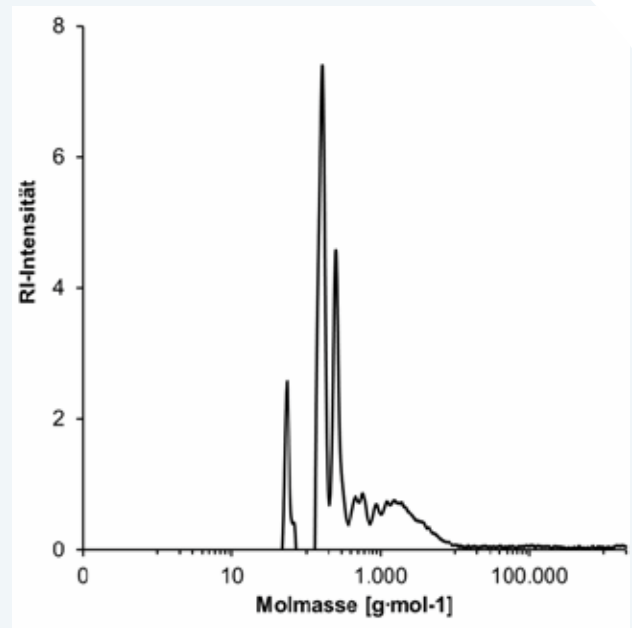


Abbildung 10: Molekulargewichtsverteilung des Produktgemisches nach der vollständigen Zersetzung eines mit Isophorondiamin gehärteten Epoxidharzes mit  $\text{AlCl}_3$  und Essigsäure im Autoklav.

Es folgten Experimente zur Optimierung des Recyclinggemisches, um die Zersetzung bei Normalbedingung ohne Einsatz eines Autoklavs wirtschaftlich durchführen zu können. Zum Einsatz kamen mehrere vielversprechende Lösungsmittel und Lewis-Säuren.

Da einige ausgesuchte Lösungsmittel durch Zugabe von Lewis-Säuren zur Vergelung neigen, führte das Team in einem ersten Schritt Vorversuche durch. Abbildung 11 zeigt ein Lösungsmittel, welches durch Zugabe der entsprechenden Lewis-Säure polymerisiert. Abbildung 12 zeigt ein Lösungsmittel, das auch nach Zugabe einer Lewis-Säure nicht vergelt.





Abbildung 11: Polymerisiertes Lösungsmittel kurz nach Zugabe der Lewis-Säure.



Abbildung 12: Nicht vergelltes Lösungsmittel mit Lewis-Säure (schwarz).

Als Resultat konnte das Forschungsteam mit einem der ausgewählten Systeme einen Zersetzungsgrad von bis zu 40 % unter Normalbedingungen ohne Verwendung eines Autoklavs erreichen. Eine Vorbehandlung des Probekörpers in Essigsäure, was ein Aufquellen bewirkt, führt zur Verbesserung der chemischen Zersetzung.

Es kann festgehalten werden, dass das Forschungsteam in diesem Projekt einen vielversprechenden Ansatz zur Verwertung von Epoxidharz-Kompositen entwickelte, der aber durch die Variation von Temperatur, Lösungsmitteln und Katalysatorkonzentration zunächst noch weiter optimiert werden muss.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Im ersten Schritt untersuchten die Wissenschaftler unterschiedliche Reagenzien zur Spaltung zuvor hergestellter Epoxidharzmodellnetzwerke und bewerteten sie hinsichtlich ihrer Eignung für die großtechnische Anwendung. Das Team um Prof. Dr. Gerd Wehnert entwickelte im Rahmen der Vorlaufforschung einen vielversprechenden Ansatz, der aber noch weiter zu optimieren ist.

In weiteren Schritten ist geplant, den vielversprechendsten Weg auf epoxidharzbasierte Faserverbundkunststoffe zu übertragen: Hierzu wird die Matrix eines epoxidharzbasierten CFK-Bauteils chemisch zersetzt und anschließend von den Fasern, durch Lösen der kleineren oligomeren Moleküle, gewaschen. Im Anschluss daran werden aus den löslichen Oligomeren nach Verdampfen des Lösungsmittels und einer umfangreichen Analytik zur chemischen Struktur neue Duromere, bspw. Polyurethane, synthetisiert und im Hinblick auf ihre Eigenschaften charakterisiert. Die von der Matrix separierten Verstärkungsfasern werden nach Abdampfen des Lösungsmittels mit Kunststoffgranulat zu kurzfaserverstärkten thermoplastischen Prüfkörpern verarbeitet. Diese werden mittels unterschiedlicher mechanischer Prüfmethode charakterisiert und, mit Probekörpern hergestellt, mit Recyclingfasern sowie mit neuen Kurzfasern verglichen.

Der geplante Fortgang der Arbeiten ist in folgender Abbildung 13 dargestellt:

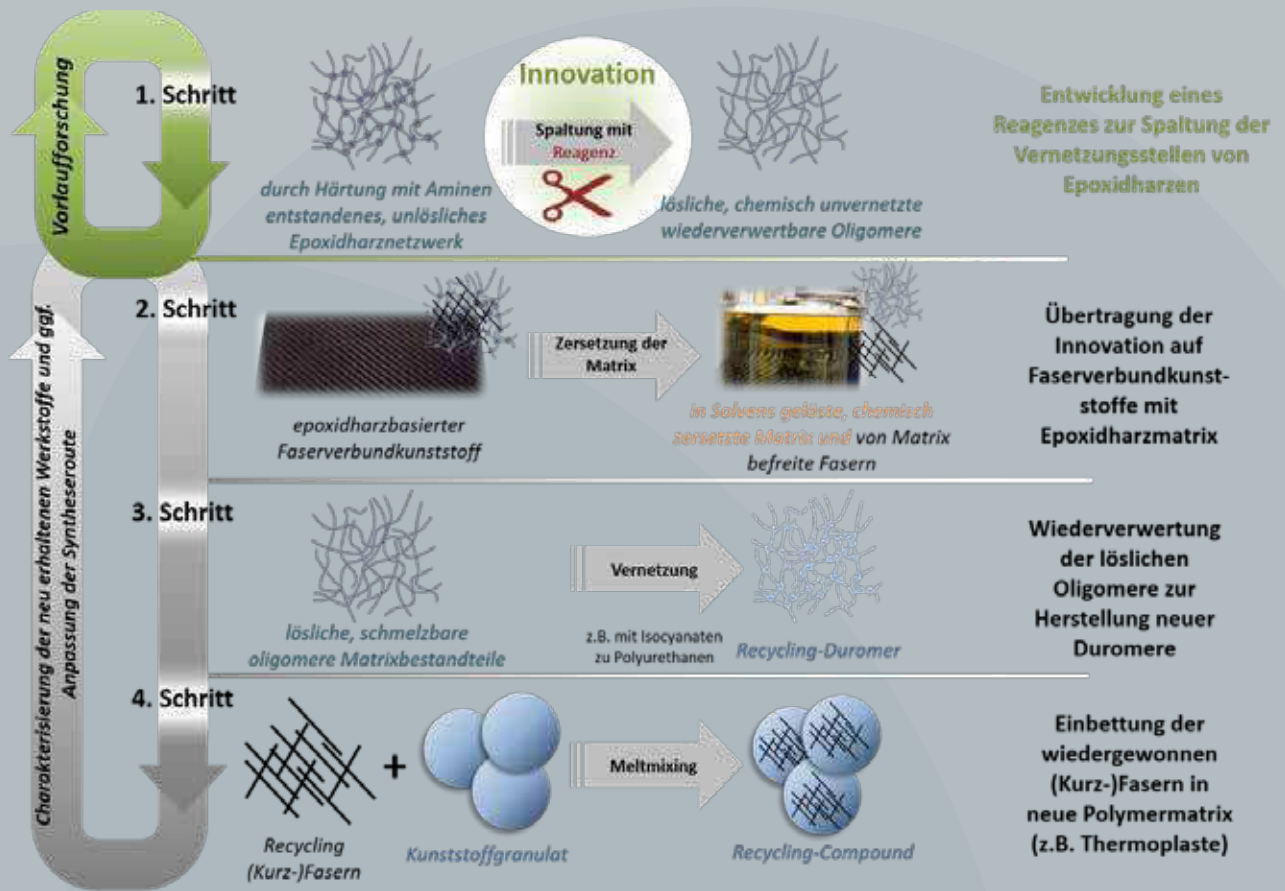


Abbildung 13: Schritte des Gesamtvorhabens zur Entwicklung eines Recyclingverfahrens für epoxidharzbasierte FVK.

Neben anschließenden Entwicklungskooperationen und Auftragsforschung wird angestrebt, die Ergebnisse – nach erfolgter Optimierung der Prozessführung – in Form einer Veröffentlichung in einer entsprechenden branchenrelevanten Zeitschrift zu platzieren, um dadurch die Expertise des Labors für Makromolekulare Chemie der TH Nürnberg bekannter zu machen.

## 6. Literatur

- [1] SCHLOTT, S.: BMW-Werk Landshut startet Carbonproduktion, ATZproduktion, 5 (Nr. 2), 2012, S. 84-87.
- [2] DIRSCHMID, F.: Die CFK-Karosserie des BMW i8 und deren Auslegung, In: Tecklenburg, G.: Karosseriebautage Hamburg – 13. ATZ-Fachtagung, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014, S. 217-231.
- [3] COMPOSITES EUROPE: BMW i3 beflügelt Verbundwerkstoff-Industrie, 2014, <http://www.composites-europe.com/Pressemitteilung/BMW-i3-befluegelt-Verbundwerkstoff-Industrie/n60/>, abgerufen am 12.02.2017.
- [4] MARSH, G.: Wing worker for the world, Reinforced Plastics, 54 (Nr. 3), 2010, S. 24-28.
- [5] WITTEN, E.; KRAUS, T.; KÜHNEL, M.: Composites-Marktbericht 2014. Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen, 2014, [http://www.avk-tv.de/files/20141023\\_20141008\\_marktbericht\\_gfkcfk.pdf](http://www.avk-tv.de/files/20141023_20141008_marktbericht_gfkcfk.pdf), abgerufen am 01.02.2017.
- [6] HENNING, F.; MOELLER, E.: Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2011, S. 309-336; S. 341-392.
- [7] MICHAELI, W.; WEGENER, M.: Einführung in die Technologie der Faserverbundkunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1989, S. 1-2.
- [8] EIGENE AUFNAHME: BMWi8, 2015.
- [9] EICKENBUSCH, H.; KRAUSS, O.: Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2014, S. 66.
- [10] MAZUMDAR, S.: Opportunities for thermoset resins in the composites industry, 2008, [http://www.trfa.org/erc/docretrieval/uploadedfiles/Technical%20Papers/2008%20Meeting/Mazumdar-Lucintel\\_ppt-Composites\\_industry.pdf](http://www.trfa.org/erc/docretrieval/uploadedfiles/Technical%20Papers/2008%20Meeting/Mazumdar-Lucintel_ppt-Composites_industry.pdf), abgerufen am 01.10.2017.
- [11] MARKETANDMARKETS.COM: Presse Mitteilung 2016, Report Code: CH 1218.
- [12] GUILLOT, J. D.: CO2-Emissionen von Neuwagen sollen 2020 auf 95 g/km CO2 sinken, 2014, <http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20140222STO36702/html/CO2-Emissionen-von-Neuwagen-sollen-bis-2020-auf-95-gkm-CO2-sinken>, abgerufen am 11.12.2016.
- [13] GUILLOT, J. D.: Begrenzung der CO2-Emissionen von PKW, 2014, <http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20140221pr36626/html/Begrenzung-der-CO2-Emissionen-von-Pkw>, abgerufen am 11.12.2016.
- [14] HARTBRICH, I.: Recycling-Carbon stützt neue Technologien, 2012, <http://www.ingenieur.de/Themen/Werkstoffe/Recycling-Carbon-stuetzt-neue-Technologien>, abgerufen am 12.12.2016.
- [15] GUO, J.; GUO, J.; XU, Z.: Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review, Journal of Hazardous Materials, 168 (Nr. 2), 2009, S. 567-590.
- [16] ASMATULU, E.; TWOMEY, J.; OVERCASH, M.: Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept, Journal of Composite Materials, 48 (Nr. 5), 2014, S. 593-608.
- [17] HAUTMANN, D.: Die Entsorgung von Windkraftanlagen bereitet Probleme, 2004, <http://www.welt.de/print-welt/article290038/Die-Entsorgung-von-Windkraftanlagen-bereitet-Probleme.html>, abgerufen am 12.12.2014.
- [18] KARL, D.; OTTO, C.: CFK Recycling in Forschung und Praxis, 2012, <http://www.automobil-industrie.vogel.de/leichtbau-technologie/kunststoff/articles/380963/>, abgerufen am 01.10.2017.
- [19] PICKERING, S. J.: Recycling technologies for thermoset composite materials – current status, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37 (Nr. 8), 2006, S. 1206-1215.
- [20] HARBERS, F.: GfK-Recycling: Das „European Composite Recycling Concept“, 2003, <http://plasticker.de/news/showartikel.php?id=10>, abgerufen am 12.12.2016.
- [21] CORREIA, J. R.; ALMEIDA, N. M.; FIGUEIRA, J. R.: Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures, Journal of Cleaner Production, 19 (Nr. 15), 2011, S. 1745-1753.
- [22] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT: Siedlungsab-fallentsorgung 2005: Stand – Handlungsbedarf – Perspektiven, 2005, [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-im-port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht\\_siedlungsabfallentsorgung\\_2005.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-im-port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_siedlungsabfallentsorgung_2005.pdf), abgerufen am 03.02.2015.
- [23] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: Verordnung über Deponien und Langzeit-lager (Deponieverordnung - DepV), 2013, [http://www.gesetze-im-inter-net.de/bundesrecht/depv\\_2009/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-inter-net.de/bundesrecht/depv_2009/gesamt.pdf), abgerufen am 03.02.2017.
- [24] FEIGEL UMWELT SERVICE GMBH (HR. FEIGEL): Entsorgung von Verbundwerkstoffen, Telefongespräch, Söthje, D. (Adressat).
- [25] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV), 2013, [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimsv\\_17\\_2013/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimsv_17_2013/gesamt.pdf), abgerufen am 01.10.2017.
- [26] DIEWITZ, M.-M.: Branche kompakt - Recycling- und Entsorgungswirtschaft - Niederlande, 2014, <http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/maerkte,did=1085026.html>, abgerufen am 03.02.2017.
- [27] RIBEIRO, M. C. S.; MEIRA-CASTRO, A. C.; SILVA, F. G.; SANTOS, J.; MEIXEDO, J. P.; FIÚZA, A.; DINIS, M. L.; ALVIM, M. R.: Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete-polymer composite materials: A case study regarding GFRP pultrusion wastes, Re-sources, Conservation and Recycling, Im Druck, online verfügbar seit 2013 auf [https://www.google.de/search?q=Re-use+assessment+of+thermoset+composite+wastes+as+aggregate+and+filler+re+placement+for+concrete+poly+mer+composite+materials:+A+case+study+regarding+GFRP+pultrusion+waste&ie=utf-8&oe=utf-8&gws\\_rd=cr&ie=kKcCVb7C](https://www.google.de/search?q=Re-use+assessment+of+thermoset+composite+wastes+as+aggregate+and+filler+re+placement+for+concrete+poly+mer+composite+materials:+A+case+study+regarding+GFRP+pultrusion+waste&ie=utf-8&oe=utf-8&gws_rd=cr&ie=kKcCVb7C) MobQygP1roCQBQ, abgerufen am 13.02.2017.

- [28] EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, 2008, [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-im-port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/richtlinie\\_2008\\_98\\_eg.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-im-port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/richtlinie_2008_98_eg.pdf), abgerufen am 09.12.2016.
- [29] WANG, Y.; CUI, X.; GE, H.; YANG, Y.; WANG, Y.; ZHANG, C; LI, L.; DENG, T.; QIN, Z.; HOU, X.: Chemical Re-cycling of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites via Selective Cleavage of the Carbon-Nitrogen Bond, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3, 2015, S. 3332-3337.