

# SPECIAL:

## Automotive

Kunststoffe erfolgreich zurück in Automobile bringen

# Closed-Loop-Rezyklate für Elektrofahrzeuge

Bauteile mit Glasfaseranteilen von bis zu 50 % stellen die Kreislaufwirtschaft vor Herausforderungen. Wie sich bei diesen dennoch Werkstoffkreisläufe schließen lassen, hat ein Projekt untersucht. Zwei Recyclingansätze ermöglichen die Wiederverwendung von hochverstärkten Kunststoffen in Batteriegehäusen für Elektrofahrzeuge.



Die untersuchten Pentatonic-Batteriegehäuse von Kautex Textron wurden für den Einsatz in Elektrofahrzeugen entwickelt. Im vergangenen Jahr gab das Unternehmen dazu eine weitere Kooperation mit einem großen Automobilhersteller bekannt. © Kautex Textron

Im Kontext der viel diskutierten Überarbeitung der EU-Altautoverordnung (End-of-Life Vehicles Directive, ELV) gewinnt der Closed-Loop-Einsatz von Post-Consumer-Kunststoffrezyklaten (PCR) zunehmend an Bedeutung. Leichtbaubatteriegehäuse mit einem Kunststoffanteil von bis zu 40 kg bieten dafür ein großes Potenzial. Aufgrund der hohen mechanischen, sowohl statischen als auch dynamischen, Anforderungen stellen sie jedoch ein besonders komplexes Anwendungsfeld dar.

Im Verbundprojekt Gabriela wurden Recyclingpfade für anspruchsvolle Kunststoffe in der Automobilindustrie erschlossen. Im Fokus stand die Entwick-

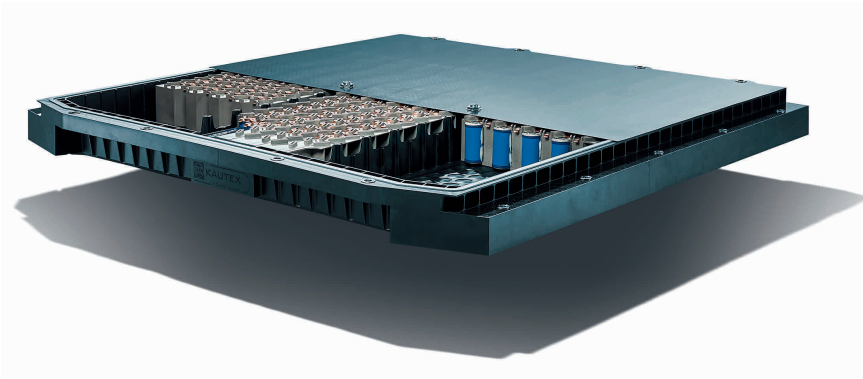
lung einer angepassten Closed-Loop-Recyclingstrategie für das Hochvolt-Batteriegehäuse „Pentatonic“ des Automobilzulieferers Kautex Textron (**Bild 1**). Dieses besteht entweder aus glasfaserverstärktem Polyamid 6 (PA6-GF) oder Polypropylen (PP-GF). Dabei wurden die Verfahren Spritzgießen und Fließpressen berücksichtigt und der gesamte Produktlebenszyklus einbezogen.

Um das Recyclingpotenzial von strukturell relevanten Leichtbauteilen umfassend zu untersuchen, wurden zwei Recyclingszenarien analysiert: das mechanische Recycling und ein physikalischer Löseprozess. Ausgangspunkt war die Herstellung von mit bis zu 50 %

Glasfasern verstärkten Batteriegehäusen für Elektrofahrzeuge im Großserienmaßstab. Produziert wurden eine kompakte Variante mit ca. 5 kg Schussgewicht im Spritzgießen und eine größere Version mit ca. 15 kg im Fließpressverfahren mit In-line-Compoundierung. Insgesamt verarbeitete Kautex Textron etwa 6 t glasfaserverstärkten Kunststoffen zu Bauteilen der beiden Versionen.

### Analyse des gesamten Lebenszyklus

Der Lebenszyklus der Bauteile wurde dann am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden durch Klimawechseltests nach der Auto-



**Bild 1.** Batteriegehäuse Pentatonic des Automobilzulieferers Kautex Textron © Kautex Textron

verwertbarem Feinmaterial und strebt einen möglichst geringen Energieaufwand an. Dazu wurden die Batteriegehäuse für beide Recyclingrouten nicht nur auf unterschiedlichen Zerkleinerungssystemen, sondern auch mit verschiedenen Schneidwerken getestet. Mittels Siebanalysen am Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingssystemtechnik (IART) der Universität Freiberg wurde die Korngrößenverteilung bestimmt. Das erlaubte eine systematische Bewertung der erzeugten Granulatqualität in Form von Partikelverteilung, Partikelgeometrie und Anteil an Feinmaterial.

Auf dieser Grundlage spezifizierte Vecoplan zwei exakt auf die mechanische bzw. lösemittelbasierte Recyclingroute abgestimmte Zerkleinerungssysteme. Für die Versuchsreihen wurden eigens entwickelte Zerkleinerungsmaschinen verwendet, die in ihrer Leistungsfähigkeit direkt den späteren Anforderungen in der Recyclingpraxis entsprechen (**Bild 3**). Im Unterschied zum Lösemittelprozess erfordert das mechanische Recycling der Spritzgießwerkstoffe eine Vor- und Nachzerkleinerung, um eine homogene Korngrößenverteilung zu erzielen. Die Kombination aus Zerkleinerer und Schneidmühle erhöht zwar den Aufwand beim mechanischen Recycling, ermöglicht aber eine direkte Wiederverarbeitung der Werkstoffe auf der Spritzgießmaschine.

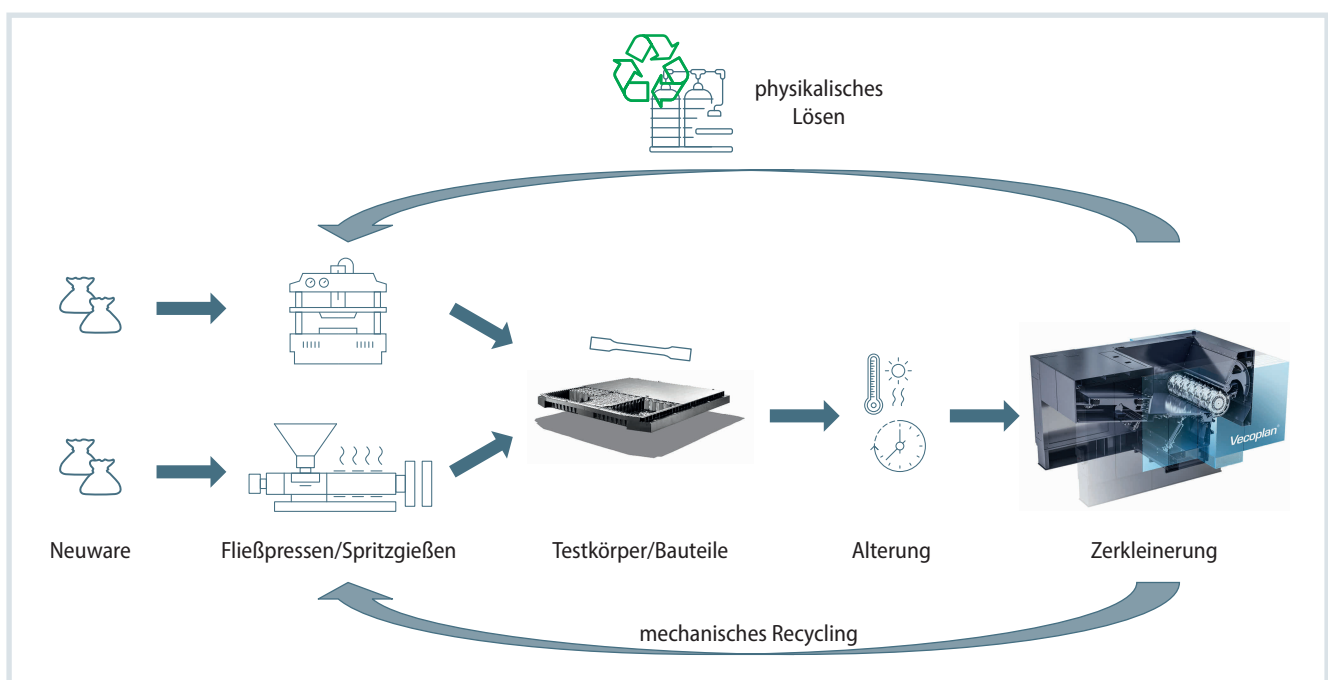
mobilvorschrift PV1200 künstlich nachgestellt. Die beschleunigt gealterten Bauteile wurden durch den Recyclinganlagenhersteller Vecoplan zerkleinert und sortiert. Für die kurzfaserverstärkten Werkstoffe erfolgte anschließend eine direkte Wiederverarbeitung mittels Spritzgießen zu neuen Batteriegehäusen. Das physikalische lösemittelbasierte Recycling erfolgte durch einen vom Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV entwickelten Prozess. In diesem werden die Glasfasern abgeschieden. Die Basispolymere wurden anschließend erneut für das In-line-Compounding aufbereitet und von Kautex Textron zu Bauteilen im zweiten Lebenszyklus verarbeitet.

Prüfkörper aus allen Stufen der Kreislaufführung wurden eingehenden werkstoffmechanischen und -physikalischen

Untersuchungen unterzogen und das Wiedereinsatzpotenzial glasfaserverstärkter Kunststoffe in sicherheitsrelevanten Bauteilen bei Rezyklatanteilen von bis zu 100 % bewertet (**Bild 2**). Detaillierte ökobilanzielle und ökonomische Analysen zeigen die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit der entwickelten Verfahren.

**Maßgeschneiderte Zerkleinerung faserverstärkter Kunststoffe**

Die Herausforderung für Vecoplan bestand in der Entwicklung von Zerkleinerungslösungen für die Weiterverarbeitung von faserverstärkten Kunststoffgranulaten. So erfordert die mechanische Recyclingroute neben einer möglichst gleichmäßigen Partikelverteilung eine Minimierung des Anteils an nicht



**Bild 2.** Nachgestellter Lebenszyklus eines Batteriegehäuses im Projekt Gabriela Quellen: Kautex Textron, Vecoplan; Grafik: © Hanser

## Info

### Text

**Maximilian Wende** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV.

**Dr. Martin Schlummer** ist Geschäftsfeldmanager Recycling und Umwelt am Fraunhofer IVV.

**Dipl. Ing. Markus Hützen** ist seit 2003 als Projektleiter im Bereich Innovation für Kautex Textron tätig.

**Dipl. Ing. Jürgen Pfaff** ist seit 2003 als Senior Manager im Bereich Innovation für Kautex Textron tätig.

**Dipl. Wi.-Ing. Paul Schulz** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden.

**Dr. Robert Kupfer** ist leitender Wissenschaftler mit Schwerpunkt Kreislaufwirtschaft am ILK.

**Stefan Stehle** ist Projektleiter im Verbundprojekt Gabriela und arbeitet seit 2007 für Vecoplan, aktuell in der Funktion als Senior Application Engineer mit dem Schwerpunkt Kunststoffrecycling.

**Cathrine Rekett** ist seit über 16 Jahren bei Vecoplan beschäftigt und leitet dort als Director Recycling den Bereich Anwendungstechnik.

**Niklas Nied** ist seit über neun Jahren bei Vecoplan beschäftigt und aktuell als Application Engineer im Geschäftsbereich Recycling tätig.

**Sebastian Weise** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig in der Professur Nachhaltige Produktion und Life Cycle Engineering.

**Dr. Thomas Krampitz** ist seit 2017 am Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingsystemtechnik (IART) der Universität Freiberg Leiter der Arbeitsgruppe Recycling.

**Julius Eik Grimmenstein** ist seit 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IART.

### Dank

Das Forschungsvorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung.



**Bild 3.** Beschickung eines leistungsfähigen Zerkleinerers im Technologiezentrum von Vecoplan. © Vecoplan

Für beide Recyclingpfade gilt, dass eine Absenkung der Schnittgeschwindigkeiten gegenüber nicht faserverstärkten Kunststoffen den Anteil an Feinmaterial deutlich reduzieren kann.

### *Physikalisches Lösen: Hochreine Rezyklate aus Batteriegehäusen*

Die durch Fließpressen hergestellten langfaserverstärkten Batteriegehäuse wurden zunächst ebenfalls mechanisch zerkleinert und am Fraunhofer IVV durch physikalisches Lösen aufgeschlossen. In diesem Prozess wird die Polymermatrix in einem Lösemittel gelöst und die Glasfasern als feste Bestandteile mittels Filtration abgetrennt. Die erhaltene Polymerlösung wird anschließend gereinigt und getrocknet, um das Lösemittel zurückzugewinnen und in den geschlossenen Kreislauf zurückzuführen. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist ein hochreines Kunststoffrezyklat, das erneut in den Produktionsprozess eingespeist werden kann. Dieses Verfahren wurde bis in den Pilotmaßstab zur Produktion von einer Tonne Rezyklat übertragen (**Bild 4**). Da auch Verunreinigungen wie Klebstoffe, Harze, Metalle und andere Fremdpolymere während des Prozesses abgetrennt werden, ist das physikalische Lösen besonders dazu geeignet, heterogene Abfallströme zu behandeln.

Die Produkte aus beiden Recyclingrouten wurden mit einem Anteil von 30

bis 100 % Sekundärmaterial auf Prüfkörper- und Bauteilebene mit Neumaterial verglichen. Dabei zeigte das mechanisch aufbereitete langfaserverstärkte Polypropylen (PP) noch ca. 40 % der ursprünglichen gewichtsgemittelten Faserlänge. Das kurzfaserverstärkte Polyamid 6 (PA6) verliert hingegen nur etwa 6 % der Faserlänge im Modellkreislauf. An den Rezyklaten wurden die mechanischen Grundkennwerte aus Zug- und Biegeversuchen sowie Schlagbiege- und Durchstoßversuchenermittelt. **Bild 5** zeigt beispielhaft die Ergebnisse der 0°-Richtung für PP-GF im Spritzgießen sowie für das Fließpressen.

### *Kaum Degradation auch bei hohen Rezyklatanteilen*

Für beide Prozessrouten zeigt sich ein sehr hohes Eigenschaftsniveau der Rezyklate. Bei der Verarbeitung im Spritzgießprozess wurden trotz der reduzierten Faserlängen bis zu 95 % der Neuware-Eigenschaften erreicht. In der Fließpressroute mit In-Line-Compounding konnten durch den Direkteinzug neuer Glasfasern sogar die Werte des Primärwerkstoffes erzielt werden. In beiden Fällen war kein signifikanter Abbau des Molekulargewichtes der Kunststoffmatrix feststellbar.

Auf Bauteilebene ist der quasistatische Crush-Test ein entscheidendes Auslegungsziel, da er sowohl konstruktiv-technologische als auch werkstoffspezifische Aspekte berücksichtigt. In den Versuchen zeigt sich eine leichte Reduzierung der maximalen Intrusionskraft um 7 % bei unverändertem Weg, was auf die verminderte Festigkeit und Steifigkeit der Rezyklate zurückzuführen ist. Sollen hohe Anteile an Sekundärmaterial im Bauteil realisiert werden, müssen diese moderaten Performanceverluste zukünftig durch gezielte Anpassungen beim Produktdesign oder durch weiter optimierte Verarbeitungsstrategien kompensiert werden.

### *Nicht nur CO<sub>2</sub>, sondern auch Kosten einsparen*

Die Verbesserung der Umweltauswirkungen durch den Einsatz der Rezyklate wurden mithilfe modellbasierter Lebenszyklusanalysen beim Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik



**Bild 4.** Im Großtechnikum des Fraunhofer IVV wurden mehrere 100 kg Rezyklat durch physikalisches lösemittelbasiertes Recycling produziert. © Fraunhofer IVV

weisen aber eine leichte Degradation auf. Durch die Mischung mit Neumaterial können jedoch auch bei Rezyklatanteilen von deutlich über 50 % die Werkstoffeigenschaften weitgehend erhalten werden, wodurch eine sichere Anwendung in diesem Fall ebenfalls gegeben ist.

**Die Wahl des Recyclingverfahrens**

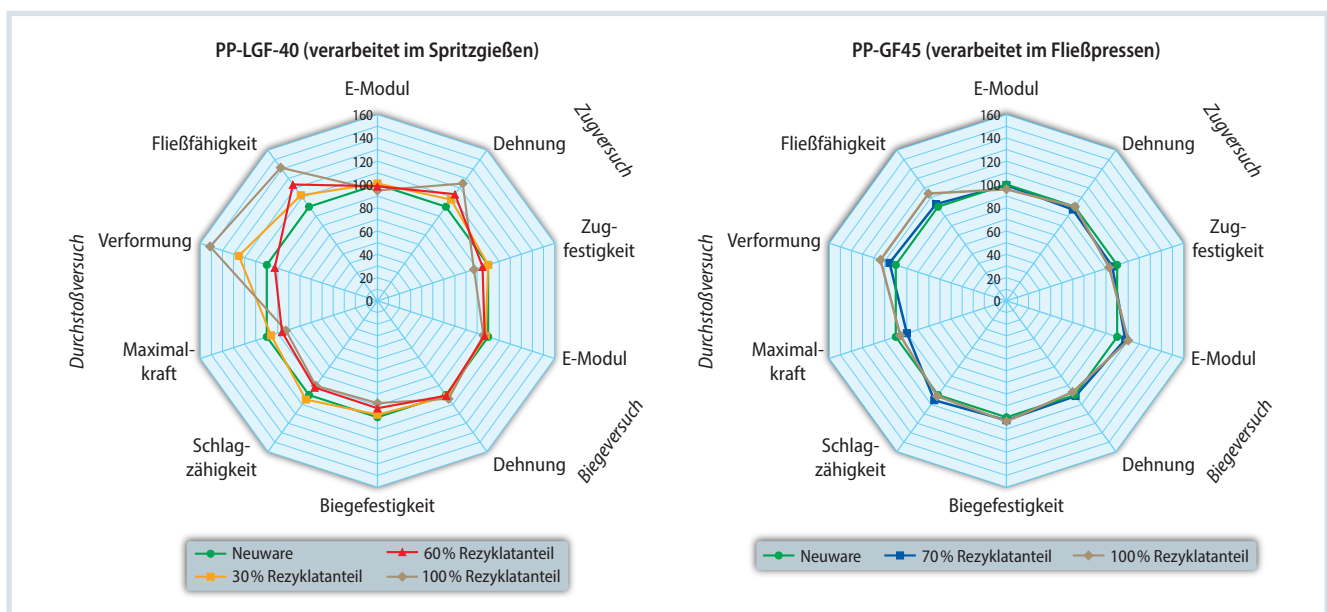
Damit eignen sich beide Closed-Loop-Rezyklate zur Herstellung sicherheitsrelevanter Batteriegehäuse aus Kunststoffen für Elektrofahrzeuge. Bauteiltests bestätigten die hohe Leistungsfähigkeit der Werkstoffe, die sich gleichermaßen durch eine positive Umwelt- und Kostenbilanz auszeichnen. Die konkrete Wahl des Recyclingverfahrens hängt in der Praxis maßgeblich von den jeweiligen Wertschöpfungsketten der Batteriegehäuse ab, die in dem dynamischen technologischen Umfeld batterieelektrischer Fahrzeuge einer kontinuierlichen Optimierung und Anpassung unterliegen.

Erste Untersuchungen im Forschungsprojekt zeigen zudem, dass auch Multimaterialaufbauten bzw. bestückte Batteriegehäuse zerkleinert und unter Verwendung geeigneter Separierungstechnologien in reine Materialfraktionen aufgeteilt werden können. Diese Fragestellungen sollen in bereits geplanten Folgeprojekten weiter vertieft werden. ■

(IWF) der TU Braunschweig quantifiziert. Untersucht wurden alle Prozesse in den Systemgrenzen Cradle-to-Grave (Fließpressen) und Cradle-to-Cradle (Spritzgießen) für faserverstärkte PA und PP. Dabei kamen überwiegend selbst erhobene Primärdaten zum Einsatz, die aus dem Labor- und Pilotmaßstab auf industrielle Bedingungen übertragen wurden. Das Einsparpotenzial für CO<sub>2</sub>-Äquivalente liegt demnach bei bis zu 55 %, abhängig vom genutzten Strommix und weiteren Parametern. Durch die geschlossene Kreislaufführung können aber nicht nur

die Umweltauswirkungen reduziert werden, auch die Materialkosten der Matrixsysteme verringern sich in ähnlicher Größenordnung.

Die Arbeiten im Projekt Gabriela zeigen, dass lösemittelbasiert recycelte Kunststoffe bei nachfolgender Verarbeitung mittels In-line-Compoundierung eine kaum messbare Eigenschaftsdegradation aufweisen und folglich auch bei sehr hohen Rezyklatanteilen von bis zu 100 % sicher eingesetzt werden können. Mechanisch recycelte Werkstoffe, die spritzgegossen werden,



**Bild 5.** Ergebnisse der mechanischen Prüfung für PP-GF verarbeitet im Spritzgießen (links) und Fließpressen (rechts) für die 0°-Richtung: Der Rezyklatanteil bezieht sich beim Spritzgießen auf den Gesamtverbund, beim Fließpressen auf den Kunststoffanteil. Quelle: TU Dresden; Grafik: © Hanser