



Gewinner-Teams und Juroren des ChemPlant-Wettbewerbs 2025 mit dem Gewinnerteam EcoSolve, Max Uth, Alina Wolter, Lennert Bruns, Vincent Wache, Tim Redlich (Studierende der TU Dresden).

# Verbundwerkstoffe wirtschaftlich recyceln

## ChemPlant-Gewinner EcoSolve stellen Verfahren zum GFK-Recycling vor



### Keywords

- ChemPlant
- Nachwuchsförderung
- GFK-Recycling

Mit dem jährlich stattfindenden VDI-Wettbewerb ChemPlant fördert die VDI-Fachgesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) den ingenieurwissenschaftlichen Nachwuchs und fordert Studierende heraus, nachhaltige und wirtschaftlich tragfähige verfahrenstechnische Gesamtkonzepte zu entwickeln. In dieser kreativen Umgebung entstehen regelmäßig praxisnahe Lösungen für aktuelle Industrie- und Umweltprobleme. Einen besonders wegweisenden Ansatz präsentiert in diesem Jahr das Team EcoSolve der TU Dresden: Ihr innovatives Recyclingverfahren nutzt Mikrowellen-Solvolyse, um GFK-Rotorblätter ausgedienter Windkraftanlagen hochwertig zu verwerten. Damit zeigt das Projekt eindrucksvoll, wie studentische Ideen Impulse für eine zirkuläre Verbundwerkstoffwirtschaft setzen können.

Während der Zubau an Windkraftanlagen im letzten Jahrzehnt global an Schwung gewonnen hat, erreichen die ersten Generationen der Windkraftanlagen das Ende ihrer Lebensdauer. Dies konfrontiert die Entsorgungswirtschaft mit einer massiven Herausforderung: Tausende Tonnen Rotorblätter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) müssen verwertet werden. Die heutigen Nutzungsmöglichkeiten, wie die thermische Verwertung oder die Verwendung als Füllstoff im Straßenbau, werden dem Materialwert und den Ansprüchen an eine echte Kreislaufwirtschaft nicht gerecht. Das Team EcoSolve der TU Dresden entwickelte im Rah-

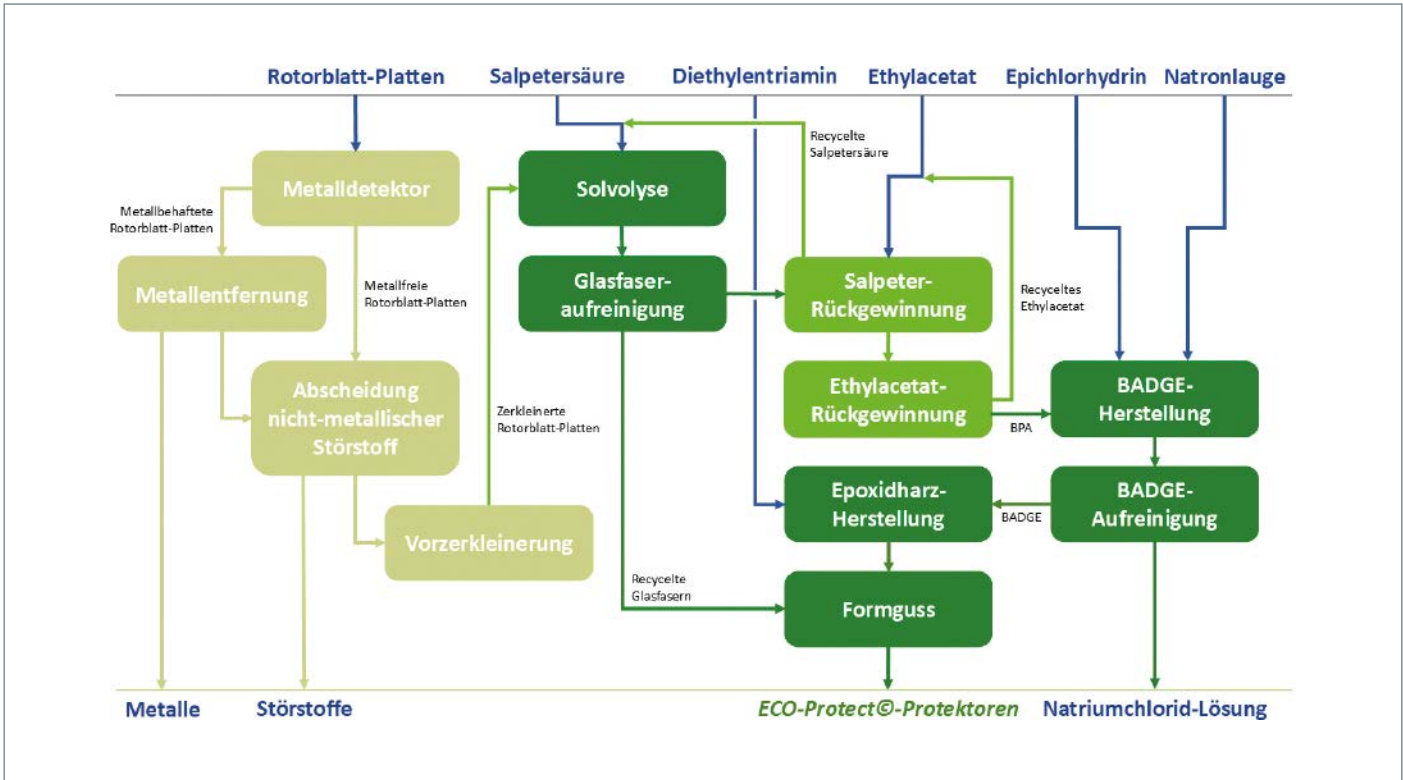
men des ChemPlant-Wettbewerbs 2025 ein nachhaltiges Verfahrenskonzept, das mittels Mikrowellen-Solvolyse nicht nur Glasfasern in hoher Qualität zurückgewinnt, sondern auch die Epoxidharz-Matrix chemisch recycelt. Damit bleiben die Materialeigenschaften weitestgehend erhalten und die Herstellung leistungsfähiger Produkte, wie bspw. Sport-Protektoren, wird ermöglicht.

Allein in Deutschland wird der Rückbau von 500 bis 750 Windrädern pro Jahr erwartet. Diese bestehen primär aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK), einem Verbundwerkstoff, dessen Komponenten Glasfasern und eine ausge-

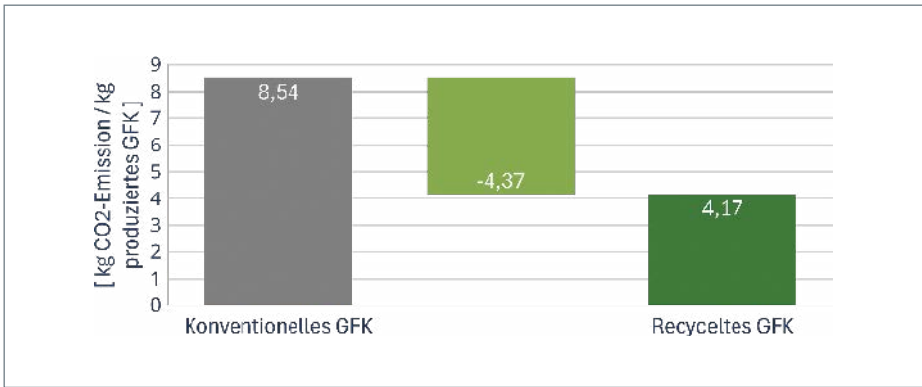
härtete Polymermatrix extrem stabil miteinander verbunden sind, so dass eine Auftrennung technisch anspruchsvoll ist. Das EcoSolve-Verfahren fokussiert sich auf GFK-Materialien mit Epoxidharzmatrix. Dabei wird die selektive Erwärmung durch Mikrowellenstrahlung genutzt, um den Solvolyseprozess zu intensivieren. Darüber hinaus kann der vorgesehene Solvolyseprozess vollständig mit erneuerbarer Energie betrieben werden und ermöglicht eine kostensparende Kreislaufführung der Lösungsmittel.

### Der EcoSolve-Prozess

Das Anlagenkonzept ist auf eine Jahreskapazität von 5.000 Tonnen epoxidharzbasierten GFK ausgelegt. Der Prozess gliedert sich in vier Phasen: Vorbehandlung, Mikrowellen-Solvolyse, Matrixaufbereitung und Produkterstellung. Die Vorbehandlung trennt Störstoffe wie z. B. Metalle und Holz ab und realisiert eine Partikelgröße von 50 mm. Die Auftrennung der GFK-Materialien erfolgt in der nachgeschalteten Mikrowellen-Solvolyse, in der das Epoxidharz in Salpetersäure gelöst und so von den Glasfasern abgetrennt wird. In der nachfolgenden Aufbereitung wird die gelöste Matrix in ein lagerfähiges Epoxid-Monomer überführt. Dieses wird anschließend mit den zurückgewonnenen Glasfasern für die Herstellung neuartiger EcoProtect Sport-Protektoren verwendet. Zusätzlich können rezyklierte Wertstoffe wie Glasfasern, Epoxid-Monomere und Metalle, im Direktvertrieb angeboten werden.



▲ Verfahrensschritte für das GFK-Recycling im EcoSolve-Prozess



◀ CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Produktion von GFK-Neuware und von rezykliertem GFK.

**Der EcoSolve-Reaktor**

Um stabile chemische Verbindungen aufzubrechen, wird eine Kombination aus punktuelltem Energieeintrag mittels Mikrowellen und Salpetersäure als stark oxidatives Lösungsmittel angewendet. Die Effizienz von Mikrowellen wird dabei über die Eindringtiefe und den Verlustfaktor der Permittivität definiert. Hierfür wurde eine Frequenz von 434 MHz gewählt, die eine Eindringtiefe von 490 mm im Material gewährleistet. Die Permittivität ist abhängig vom Material und kann nur limitiert durch die Temperatur beeinflusst werden.

Das modulare, zweistufige Reaktorkonzept kann durch Numbering Up flexibel an die anfallenden Abfallströme (oder GFK-Mengen) angepasst werden. In der ersten Stufe kommt ein Single-Mode-Mikrowellenreaktor (EcoSolve-S) zum Einsatz, der eine gezielte Erwärmung der Epoxidharzpartikel, durch gleichgerichtete Mikrowellen erlaubt. Eine kontinuierliche Durchmischung der Suspension ist für eine effiziente

Reaktionsführung relevant, allerdings sind metallische Einbauten, wie etwa Rührer, in diesem Modus nicht zulässig. Dieser technischen Herausforderung wird begegnet, indem der EcoSolve-S Reaktor rotierend gelagert ist. Nach einer Verweilzeit von 44 Minuten im EcoSolve-S erfolgt die vollständige Überführung des Reaktorinhalts in den Multi-Mode-Reaktor (EcoSolve-M).

In dieser zweiten Stufe sorgt ein metallischer Rührer für eine Streuung der Mikrowellen, sodass eine homogene Erwärmung des gesamten Reaktionsvolumens erzielt wird. In dieser Stufe wird die Temperatur für die gesamte Verweilzeit von 12 h konstant gehalten. Unter den Reaktionsbedingungen nimmt das Epoxidharz aufgrund seiner Permittivität ca. 10 % der Energie der Mikrowellen auf. Die nicht im Prozess aufgenommene Strahlung wird zur Erzeugung von Warmwasser genutzt, das wiederum zur Temperierung der nachfolgenden Reaktionsschritte dient, sodass die Energieverluste auf ein Minimum begrenzt sind.

**Der Weg zurück zum Harz**

Nach der Solvolyse folgt die Phasentrennung. Ein Hydrozyklon separiert ungelöste GFK-Partikel und leitet sie zurück in den Reaktor, bevor die Glasfasern in einer Zentrifuge filtriert, gewaschen und bis zu einer Restfeuchte von 5 % getrocknet werden. Die zurückgewonnenen Fasern behalten aufgrund der schonenden Prozessführung einen Großteil ihrer mechanischen Eigenschaften.

Eine weitere verfahrenstechnische Herausforderung ergibt sich bei der Aufbereitung der flüssigen Phase. Anstatt das gelöste Harz als Reststoff zu entsorgen, ermöglicht der EcoSolve-Prozess die Rückgewinnung wertvoller Monomerfraktionen. In einer Mixer-Settler-Apparatur wird das Bisphenol-A-(BPA)-Monomer mittels Ethylacetat selektiv aus der Salpetersäure extrahiert. Die Aufbereitung erfolgt über eine zweistufige Fallfilmverdampfung: Das Ethylacetat wird bei 77 °C abgedampft und im Kreislauf geführt. Durch gezielte Überschreitung der Löslichkeitsgrenze fällt BPA als Feststoff aus. Dieses wird nachfolgend mit Epichlorhydrin und im zweiten Reaktionsschritt mit Natronlauge zu Bisphenol-A-diglycidylether (BADGE) umgesetzt. Nach der Extraktion liegt ein reines, wiederverwendbares Epoxid-Monomer vor, welches mit einem entsprechenden Härter und den zurückgewonnenen Glasfasern wieder zu GFK-Komponenten verarbeitet werden kann.

### CO<sub>2</sub>-Einsparung und wirtschaftliches Potenzial

Das primäre Zielprodukt sind Formguss-Sportprotektoren als ökologisch nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Protektoren. Aufgrund des kosteneffizienten Prozessdesigns mit konsequenter Kreislaufführung der Lösungsmittel und Nutzung der Abwärme des Mikrowellenreaktors, weist der EcoSolve-Prozess ein vielversprechendes wirtschaftliches Potenzial auf. So beträgt die prognostizierte dynamische Amortisationsdauer lediglich 3,6 Jahre. Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Einsparungen werden mit 4,2 t pro produzierte Tonne GFK abgeschätzt. Statt der Verbrennung der Rotorblätter und durch die Substitution von Primärmaterialien (Neuharz und Neufasern) leistet das Verfahren einen positiven Beitrag zur Dekarbonisierung der Verbundwerkstoffindustrie.

### Fazit und Danksagung

Der EcoSolve-Prozess veranschaulicht ein innovatives Konzept für die nachhaltige Verwertung

von End-of-Life-GFK-Materialien auf Basis der Mikrowellen-Solvolyse. Durch die gezielte Kombination der Reaktionsführung mit einer abgestimmten Aufbereitungskette können nahezu alle Bestandteile eines Rotorblatts wieder in den Materialkreislauf überführt werden. Die bisherige Recherche belegt sowohl die ökologische als auch die ökonomische Leistungsfähigkeit des Ansatzes und zeigt das Potenzial, skalierbare Recyclingprozesse für großvolumige GFK-Anwendungen zu etablieren. Weiteres Optimierungspotenzial besteht in der Weiterentwicklung der Reaktorgeometrie sowie in der auf industrielle Maßstäbe ausgelegten Skalierbarkeit des Gesamtprozesses.

Die Bearbeitung des Projekts im Zuge des ChemPlant-Wettbewerbs stellte für das gesamte Team eine bereichernde Erfahrung dar. Wir möchten uns bei der VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen und insbesondere bei den VDI-kjVI bedanken. Ohne die Unterstützung der Professur für Chemische Verfahrenstechnik der

TU Dresden, wäre die Bearbeitung nicht so erfolgreich verlaufen, weshalb wir uns bei unserer Betreuerin Carolin Deuter und bei Prof. Dr.-Ing. Markus Schubert herzlich bedanken möchten. Für die Antworten auf Fachfragen und Unterstützung beim Verständnis der Themen möchten wir uns außerdem bei Dr.-Ing. Jesus Nain Chamcho Hernandez (KIT) und Magdalena Milek (TUBAF) bedanken.

**Max Uth,**  
Student, TU Dresden

Wiley Online Library



VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik  
und Chemieingenieurwesen, Düsseldorf  
chemplant@vdi.de · www.vdi.de/gvc