

# Kontinuierliches Chemisches Recycling von Polyurethan

**KraussMaffei**  
Pioneering Plastics

Die Polyurethan (PU)-Recycling-Technologie ermöglicht die kontinuierliche Depolymerisation von End-of-Life-Polyurethanen und wandelt komplexe PU-Abfallströme in Rezyklat-Polyole um. Diese können erneut in industriellen Anwendungen eingesetzt werden und tragen zur Schließung von Stoffkreisläufen im Sinne der Kreislaufwirtschaft bei.

## Einführung

Die PU-Recycling-Technologie wurde im Rahmen eines industriellen Gemeinschaftsprojekts unter Beteiligung von KraussMaffei Extrusion, KraussMaffei Technologies, BASF, Rampf und Remondis entwickelt. Im Zuge eines Machbarkeits- und Kommerzialisierungsprojekts wird derzeit das technische und wirtschaftliche Potenzial dieses kontinuierlichen Glykolyseprozesses untersucht. Das kontinuierliche chemische Recycling von Polyurethan (PU) stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Schließung von Stoffkreisläufen dar, insbesondere für komplexe End-of-Life-Abfallströme, die neben PU auch bis zu 30% Fremdstoffe enthalten können.

Dieses Whitepaper beschreibt einen kontinuierlichen Glykolyseprozess in einem gleichlaufenden Doppelschneckenextruder, der am Beispiel von PU-Hartschaum aus ausgedienten Kühlgeräten demonstriert wird. Die PU-Recycling-Technologie ermöglicht die Umwandlung dieser Abfallströme in ein Rezyklat-Polyol (rPolyol), das erneut in Polyurethansystemen eingesetzt werden kann. Dadurch werden sowohl Anforderungen der Kreislaufwirtschaft als auch der industriellen Skalierbarkeit adressiert.

## Recyclingbedarf für Polyurethan

Polyurethan ist ein Werkstoff mit einzigartigen Eigenschaftsprofilen und daher in zahlreichen Anwendungen unverzichtbar. Dazu zählen unter anderem die Isolierung von Kühlgeräten, die Polsterung von Fahrzeugsitzen und Matratzen sowie vielfältige industrielle Anwendungen.

Diese Eigenschaften resultieren aus der vernetzten Polymerstruktur von PU, die ein Recycling im Vergleich zu Thermoplasten erheblich erschwert.



Abbildung 1: Recycling-Kreislauf von Polyurethan aus Kühlschränken

Gleichzeitig treiben gesellschaftliche Erwartungen, regulatorische Rahmenbedingungen sowie Nachhaltigkeitsstrategien in der Industrie die Nachfrage nach einer zirkulären Nutzung von Kunststoffen voran. Für Polyurethan ergeben sich daraus insbesondere folgende Herausforderungen:

- Entwicklung weitgehend geschlossener Recyclingkreisläufe
- Nachweis einer nachhaltigen und wirtschaftlichen PU-Verarbeitung
- Erhalt von Werkstoffen mit ihren spezifischen Eigenschaftsprofilen für etablierte Anwendungen

### Der aktuelle Stand im PU-Recycling

Der überwiegende Anteil von Polyurethan-Abfällen wird derzeit energetisch verwertet, beispielsweise durch Mitverbrennung in der Zementindustrie. Mechanische Recyclingansätze existieren, etwa die Nutzung als Ölbindemittel oder als Füllstoff. Diese Verfahren sind jedoch hinsichtlich Wertschöpfung, Materialqualität und Anwendungsbreite begrenzt. In der Europäischen Union besteht aktuell im Wesentlichen nur für PU aus End-of-Life-Kühlgeräten eine etablierte Rücknahme- und Recyclingstruktur.

### Herausforderungen von Polyurethan

Zukünftige Recyclingkonzepte für Polyurethan müssen mehrere strukturelle Herausforderungen adressieren. End-of-Life-PU-Abfallströme enthalten häufig relevante Fremdstoffanteile, die entfernt oder reduziert werden müssen, um negative Auswirkungen auf nachgelagerte Prozesse sowie auf die Qualität der Rezyklate zu vermeiden. Gleichzeitig sind die zu erwartenden Abfallmengen hoch und werden voraussichtlich weiter steigen. Dies erfordert kontinuierliche Verfahren, die große Materialströme effizient, stabil und industriell skalierbar verarbeiten können.



Abbildung 2: Mit Fremdstoffen verunreinigtes Rezyklat-Polyol

### Verfahrensbeschreibung

Im Rahmen des chemischen Recyclings von End-of-Life-Kühlschrank-Hartschaum wird das vorliegende Polyurethan in pulverisierter Form über ein gravimetrisches Dosiersystem im Bereich der Einfüllzone des gleichläufig drehenden Zweischnellenextruders (ZE BluePower) zugeführt. Das PU-Pulver kann dabei mit organischen und anorganischen Fremdstoffen mit einem Anteil von bis zu 30% verunreinigt sein.

Unmittelbar nach der Feststoffzugabe wird das flüssige Depolymerisationsmittel ebenfalls über ein gravimetrisches Dosiersystem mittels geeigneter Einspritzvorrichtungen in den Extruder eingebracht. Da es sich um ein kontinuierliches reaktives Verfahren handelt, ist eine präzise und gleichmäßige Dosierung der Komponenten im definierten Mischungsverhältnis entscheidend für die Prozessstabilität und Produktqualität.

Im Anschluss an die Einfüllzone werden beide Komponenten durch spezielle Knet- und Mischelemente homogenisiert und in die Reaktionszone des Extruders gefördert. Dort führt der Eintrag von Scherenergie sowie zusätzlicher externer Wärme zu einer Erhöhung der Materialtemperatur auf Reaktionsbedingungen zwischen 200 °C und 300 °C. Bei Erreichen dieser Temperatur werden die dreidimensional vernetzten Polymerstrukturen des Polyurethans durch das Depolymerisationsmittel schrittweise chemisch aufgebrochen. Es entsteht ein mit Fremdstoffen belastetes Rezyklat-Polyol (rPolyol).



Abbildung 3: gleichläufiger Doppelschneckenextruder als Verfahrensraum für die Depolymerisation

### Reaktionsführung und Verweilzeit

Ein wesentlicher Einflussparameter auf die Qualität der Depolymerisation ist die mittlere Verweilzeit im Extruder. Eine längere Verweilzeit ermöglicht eine weitergehende Umsetzung der Solvolyse. Im Vergleich zu diskontinuierlichen Batch-Verfahren liegt die Verweilzeit im Zweischnellenextruder typischerweise zwischen 30 und 120 Sekunden und damit etwa eine Größenordnung unter der von klassischen Batch-Reaktoren. Die Verweilzeit kann durch eine Extruderlänge von bis zu 64D, eine geeignete Schneckenkonfiguration sowie eine angepasste Prozessführung, beispielsweise reduzierte Schneckendrehzahlen im Bereich von 100 bis 200  $\text{min}^{-1}$ , gezielt beeinflusst werden.

Potenzielle Nebenprodukte der Reaktion können durch geeignete Prozessführung kontrolliert werden. Das enge Verweilzeitspektrum des gleichläufigen Zweischnellenextruders wirkt dabei vorteilhaft, da einzelne Materialanteile nicht übermäßig lange thermisch belastet werden und somit die Bildung unerwünschter Nebenprodukte reduziert wird.

Zur Abtrennung der im flüssigen rPolyol enthaltenen Fremdstoffe werden – abhängig von Art und Partikelgröße – geeignete Filtrationsverfahren eingesetzt. Hierzu wird das heiße Produkt zunächst auf eine definierte Filtrationstemperatur gekühlt. Nach der Filtration erfolgt eine weitere Abkühlung sowie die Abfüllung in IBC-Behälter oder Tanklager zur Weiterverarbeitung.



Abbildung 4: von Fremdstoffen gereinigtes Rezyklat-Polyol

### Übertragbarkeit auf weitere PU-Abfallströme

Das zugrunde liegende Prozesskonzept ist grundsätzlich auf Polyurethan-Abfälle aus unterschiedlichen Anwendungen übertragbar. Im vorliegenden Entwicklungsprojekt lag der Fokus bewusst auf PU-Hartschaum aus End-of-Life-Kühlgeräten, da hierfür definierte Abfallströme sowie etablierte Sammel- und Rückführstrukturen existieren.

In der praktischen Umsetzung müssen Prozessparameter und eingesetzte Hilfsstoffe jedoch stets an die spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Rohmaterials angepasst, experimentell validiert und analytisch verifiziert werden.

Das so gewonnene Rezyklat-Polyol kann anschließend in definierten Anteilen in Polyurethansysteme integriert werden und ermöglicht beispielsweise die Herstellung von Dämmstoffen für Kühlgeräte mit gezielt einstellbarem Rezyklatanteil.

### Entfernung und Weiterverwendung von Fremdstoffen

Ein zentraler Vorteil des kontinuierlichen Extrusionsprozesses ist seine hohe Toleranz gegenüber Fremdstoffanteilen. Aufgrund der Prozesskette im heutigen Recycling von Kühlgeräten können erhebliche Mengen an Verunreinigungen im PU-Ausgangsstrom enthalten sein. Dazu zählen thermoplastische Kunststoffe wie Polystyrol und PVC aus Gehäusen und Dichtungen sowie eisen- und nichteisenhaltige Metalle aus Anbauteilen.

Regulatorische Vorgaben führen dazu, dass diese Fremdstoffe im Rahmen der Kühlgeräteaufbereitung auf sehr feine Korngrößen zerkleinert werden. Dadurch ist eine vollständige Abtrennung vom PU-Pulver vor dem Extrusionsprozess technisch aufwendig. Je nach Prozessführung können die Verunreinigungen bis zu 30% des Materialstroms ausmachen.

Der gleichläufige Zweischnellenextruder ist im Gegensatz zu diskontinuierlichen Batch-Verfahren, bei denen insbesondere höhere Thermoplastanteile zu Prozessstörungen oder Blockaden führen können, unempfindlich gegenüber diesen Fremdstoffanteilen. Das System ist selbstreinigend ausgelegt, und sämtliche nachgelagerten Aggregate sind für den kontinuierlichen Betrieb konzipiert. Die Verunreinigungen können daher in nachgeschalteten Filtrationseinheiten aus dem Rezyklat-Polyol entfernt werden.

Soweit technisch und anwendungsspezifisch möglich, sollen die in der Filtration anfallenden Rückstände einer weiteren Nutzung in geeigneten Anwendungen zugeführt werden.



Abbildung 5: Zweischnellenextruder ZE BluePower zur Depolymerisation von Polyurethan zu Rezyklat-Polyol

### Projektpartner und Beiträge



Die Entwicklung der PU-Recycling-Technologie wurde durch ein interdisziplinäres Konsortium ermöglicht:

- KraussMaffei Extrusion GmbH: Extrusionstechnologie, Prozessentwicklung und Betriebserfahrung aus dem Technology Center Laatzten.
- KraussMaffei Technologies (RPM Division): Know-how in Reaktionsprozessmaschinen und Verarbeitung von Polyurethansystemen mit Rezyklatanteil.
- BASF: Lieferant von PU-Rohstoffsystemen, Unterstützung bei Prozessentwicklung, Analytik und Nutzungskonzepten für Filtrerrückstände.
- Rampf Advanced Polymers: Erfahrung in diskontinuierlichem PU-Recycling, Formulierung von Depolymerisationsmitteln und analytische Expertise.
- Remondis: Bereitstellung von PU aus End-of-Life-Kühlgeräten, Know-how zu Recyclingprozessen sowie zu rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen.

### Vorteile der Depolymerisation von PU-Abfällen

Im Vergleich zu diskontinuierlichen Batch-Prozessen ermöglicht die kontinuierliche, extrusionsbasierte Depolymerisation die industrielle Verarbeitung großer Polyurethan-Abfallströme mit erhöhten Fremdstoffanteilen.

Abhängig von den geforderten Bauteileigenschaften können signifikante Rezyklatanteile (ca. 25%) in neue Polyurethan-Systeme integriert werden. Der verbleibende Anteil besteht aus Neuware, die zur Erfüllung der spezifizierten Material- und Leistungsanforderungen erforderlich ist. Aufgrund der langen Lebensdauer von PU-Hartschaumanwendungen, beispielsweise in Kühlgeräten, besteht zudem die Möglichkeit, das Material mehrfach zu recyceln und in geeigneten Systemen erneut einzusetzen.

### Nachhaltiges und wirtschaftliches PU-Recycling

Mit der PU-Recycling-Technologie wird die Industrialisierung des kontinuierlichen chemischen Polyurethan-Recyclings vorangetrieben. Das Verfahren ermöglicht eine skalierbare, fremdstofftolerante und wirtschaftlich tragfähige Verwertung von End-of-Life-Polyurethan und stellt damit einen wesentlichen Baustein für eine zukünftige Kreislaufwirtschaft im Bereich PU dar.

Die Investitionskosten hängen unter anderem von den Eigenschaften des zu recycelnden Materials und der Maschinenkonfiguration ab. Weitere Einflussfaktoren sind der Umfang der vor- und nachgelagerten Anlagentechnik sowie die angestrebten Durchsatzleistungen. Nach heutigem Kenntnisstand sind Polyurethansysteme mit Rezyklatanteil kostenmäßig mit Systemen auf Basis reiner Neuware vergleichbar. Die industrielle Anwendung befindet sich derzeit in der Phase des Markteintritts. Der Einsatz von Rezyklaten ermöglicht die Kreislaufführung von Kohlenstoff, reduziert den Product Carbon Footprint und trägt zur Substitution fossiler Rohstoffe bei. Hieraus ergeben sich substantielle Nachhaltigkeitsvorteile im industriellen Maßstab.