



Fraunhofer-Leitprojekt »Waste4Future«

Vom Abfall zur Ressource – Lösungen
für eine zirkuläre Kunststoffwirtschaft



Motivation

In Deutschland fallen jährlich rund 6,3 Millionen Tonnen kunststoffhaltiger Abfälle an, die zu 53 Prozent thermisch und zu 47 Prozent werkstofflich verwertet werden – eine Herausforderung für Umwelt und Klima.

Kunststoffe wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS) gehören zu den wichtigsten Werkstoffen weltweit. Die Herstellung erfolgt überwiegend auf Basis fossiler Rohstoffe und trägt somit wesentlich zur Klimabelastung bei. Die noch immer übliche thermische Verwertung führt zu weiteren Umweltbelastungen.

Mehr Kunststoff im Kreislauf halten

Der in Kunststoffen enthaltene Kohlenstoff stellt eine wertvolle Ressource für die chemische Industrie dar. Derzeit wird jedoch nur etwa ein Viertel der Kohlenstoffverbindungen im Kreislauf gehalten. Im Leitprojekt »Waste4Future« ist es

gelungen, kohlenstoffhaltige Bestandteile in Abfällen besser zu identifizieren und effizienter zu verwerten, so dass daraus hochwertige Ausgangsmaterialien für industrielle Prozesse gewonnen werden. Dies senkt nicht nur den Bedarf an fossilen Rohstoffen und die CO₂-Emissionen, sondern reduziert auch die Umweltbelastung durch Plastikmüll. Darüber hinaus stärkt die Nutzung dieser alternativen Kohlenstoffquelle die Versorgungssicherheit der Industrie.

Von den erzielten Ergebnissen profitieren

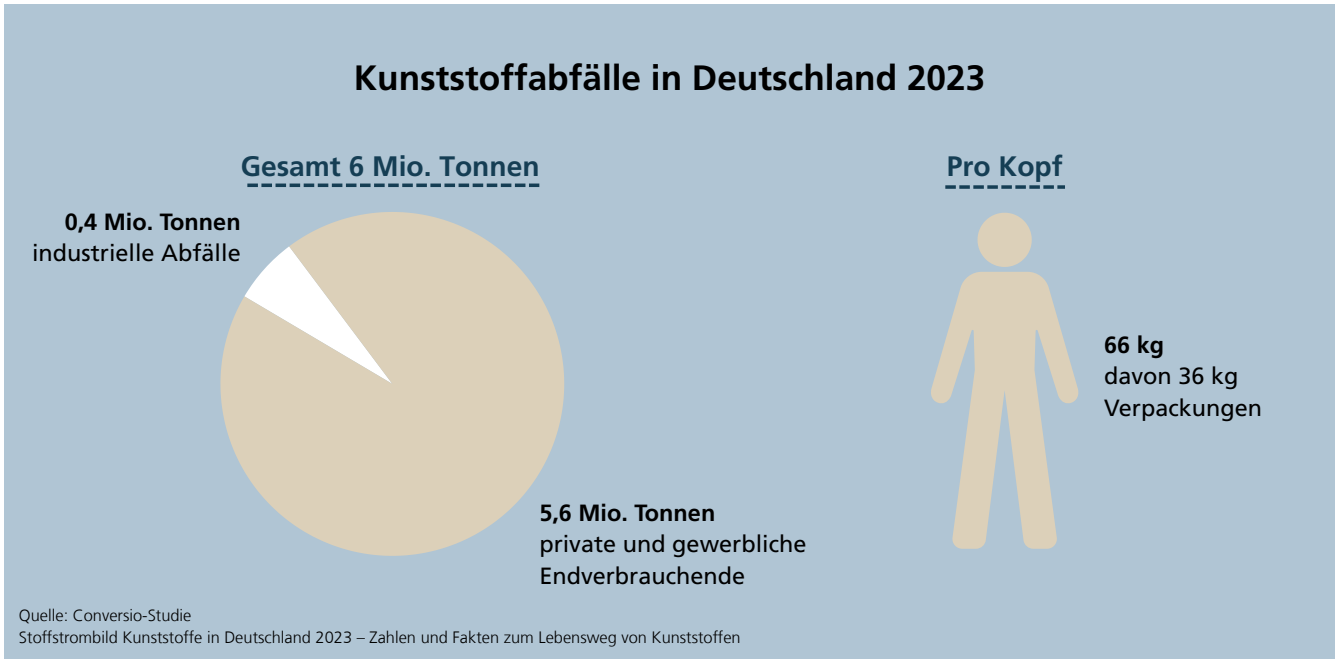
- die chemische Industrie,
- die Kunststoffverarbeitung,
- Unternehmen aus den Bereichen Abfallwirtschaft, Bau und Betrieb von Recyclinganlagen



Plastikmüll ist meist ein ungeordneter Stoffstrom. Ziel des Projektes war es, daraus Teilströme für eine passende Aufbereitungsroute zu machen.

Ganzheitliche Lösungen zur Rohstoffgewinnung aus Abfallströmen

Im Projekt »Waste4Future« haben acht Fraunhofer-Institute ihre Kompetenzen gebündelt und neue Wege für das Kunststoffrecycling entwickelt.



Interdisziplinär – Vernetzt – Zukunftsorientiert

Ziel war es, die stoffliche Verwertung für verschiedene Kunststoff-Fractionen zu verbessern und neue Technologien für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu etablieren. Das Projekt verfolgte einen ganzheitlichen Ansatz zur Optimierung der Recyclingkaskade, wobei die Entwicklung eines digitalen Zwilling, eines entropiebasierten Bewertungsmodells sowie neuer Sortier- und Verwertungstechnologien im Fokus standen. Für jede Abfallfraktion sollte der ökologisch, ökonomisch und technisch beste Verwertungsweg identifiziert werden.

Die erzielten Ergebnisse leisten einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von CO₂-Emissionen im Vergleich zur energetischen Verwertung. Gleichzeitig ermöglichen sie eine nahezu vollständige Kreislaufführung kohlenstoffhaltiger Abfälle und schaffen die Grundlage für die Herstellung nachhaltiger Plattformchemikalien – sogenannte grüne Moleküle – als umweltfreundlichen Rohstoff für die chemische Industrie. So wird der Abfall von heute zur Ressource von morgen.

Verwertungspfade von Kunststoffabfällen in Deutschland 2023



*Mengen in Tausend Tonnen/ Quelle: Umweltbundesamt

Die wichtigsten Ergebnisse aus dem Leitprojekt

Mit der Kombination aus innovativen Recyclingtechnologien und digitalen Lösungen haben die Projektpartner die Möglichkeiten zur Rückführung von Kunststoffen in den Wirtschaftskreislauf erheblich verbessert. Es ist gelungen, reale Abfallströme als Rohstoff zu erschließen, für verschiedene Recyclingrouten besonders geeignete Bestandteile zu identifizieren und zu extrahieren und daraus neue technische Bauteile zu fertigen. Dabei wurden die entsprechenden Verarbeitungsprozesse mit entwickelt und skaliert. Die im Leitprojekt entwickelten Methoden und Modelle bieten der Industrie eine attraktive Grundlage für zukünftige Anwendungen und Optimierungen im Recyclingbereich.

Entropiebasiertes Bewertungsmodell – Beurteilung von Abfällen nach Materialordnung zur Auswahl optimaler Recyclingpfade

Das entwickelte innovative, entropiebasierte Bewertungsmodell analysiert Material- und Stoffströme – selbst bei komplexen, heterogenen oder verunreinigten Kunststoffabfällen wie der Schredderleichtfraktion (SLF) und der Sinkfraktion aus dem Gelben Sack (DSD) und ermöglicht den Vergleich von werkstofflichen und chemischen Recyclingtechnologien.



Ein im Projekt entwickeltes Sensorsystem erkennt und klassifiziert Kunststoffe präzise – selbst schwarzen, rußhaltigen Kunststoff.

Es berücksichtigt dabei nicht nur den Materialtyp und -zustand (z. B. Alterung und Qualität), sondern auch den Energiebedarf und die erzielbaren Rezyklate bei verschiedenen Recyclingpfaden. So lassen sich in Echtzeit fundierte Aussagen über den voraussichtlichen Recyclingerfolg treffen.

Kernstück ist ein digitaler Zwilling, der eine intelligente Verknüpfung von Materialdaten mit ökologischen, ökonomischen und technischen Kriterien erlaubt. Er kann sowohl für Anlagen (Prozesse) als auch für Materialien eingesetzt werden und ermöglicht die lückenlose Interaktion zwischen den digitalen Komponenten.

Dies macht nicht nur eine dynamische Prozesssteuerung und eine Datenaufnahme der bearbeiteten Materialströme möglich, sondern erlaubt auch Simulationen verschiedenster Prozessrouten und somit die Optimierung des gesamten Recyclingprozesses mit einer zielgerichteten Zuweisung zu geeigneten Aufbereitungsrouten entlang der Recyclingtechnologie-Hierarchie.

Zudem wurden im Projekt die Substitutionspotenziale von Rezyklaten im Rahmen einer neuen Methode zur Consequential Life Cycle Analysis bewertet. Die automatisierte Bewertung komplexer Prozessketten basiert auf Daten aus unterschiedlichen Quellen – von maschinenlesbaren Formularen über interne Datenbanken bis hin zu realen Prozessdaten.



Mit Einsatz eines digitalen Zwillings werden Materialdaten intelligent mit ökologischen, ökonomischen und technischen Aspekten verknüpft. Er lässt sich sowohl auf Anlagen (Prozesse) als auch auf Materialien anwenden und ermöglicht eine nahtlose Interaktion zwischen den digitalen Komponenten.

Sensor- und Sortiertechnik erkennt komplexe oder verschmutzte Kunststoffe

Es wurde ein Multi-Sensor-Sortiersystem entwickelt, das Kunststoffe präzise identifizieren und klassifizieren kann – selbst bei schwierigen Materialien wie rußhaltigem, schwarzem Plastik. Die Sensorik kann verschiedene Technologien wie THz-Zeilenkameras, aktive Thermografe, Linienlaser und Luftultraschall kombinieren und erfasst so die Materialeigenschaften einschließlich innerer Strukturen und äußerer Geometrie des Schüttguts.



Eine Methode zur Online-Rheologie als schnelles Diagnose-Tool zur Rezepturentwicklung wurde im Projekt entwickelt.

Mithilfe von KI-gestützter Datenverarbeitung erkennt das System zudem Alterungszustände sowie Additive und Füllstoffe. Somit können Kunststoffabfälle sortenrein und effizient getrennt werden, um hochwertige Recyclingströme zu ermöglichen.

Weiterhin wurden Lösungen für das Zusammenspiel verschiedener Sensoren und die Verarbeitung und Speicherung großer Datenmengen in Echtzeit gefunden.

Werkstoffliches Recycling – Mechanisches und Lösungsmittel-basiertes Recycling für hochwertige Rezyklate

Ein Schwerpunkt lag auf der Bewertung der Alterung von Rezyklaten, um deren Eignung für hochwertige Anwendungen zu verbessern. Dafür wurden Recyclingzyklen und Gebrauchsphasen simuliert sowie Prüfkörper für sensorische Analysen entwickelt. Die Untersuchungen ermöglichten eine detaillierte Analyse von Alterungsprozessen – etwa Veränderungen der Molmasse, Schmelzviskosität oder Restabilisierung bei Polyamiden.

Ein zentrales Ergebnis war die Identifikation eines neuen, auf dem Alterungszustand basierenden Sortierkriteriums, nämlich von Kippunkten bei Polypropylen und Polyamid, ab denen werkstoffliches Recycling nicht mehr sinnvoll ist und chemisches Recycling bevorzugt werden sollte. Zur schnellen Bewertung von Materialeigenschaften wurde eine Methode zur Inline-Rheologie entwickelt, die als Diagnose-Tool für die Rezepturentwicklung dient. Es gelang die Rückgewinnung von Polypropylen (PP) und Polyamid (PA) aus verschiedenen Fraktionen, wobei hohe Reinheiten erreicht wurden. Die mechanischen Eigenschaften der Rezyklate wurden umfassend geprüft und mit Neuware verglichen. Für die Additivierung wurden Kettenverlängerer auf CO₂-Basis entwickelt, um die Eigenschaften von Rezyklaten zusätzlich zu verbessern.



»Waste4Future« verfolgte das Ziel, die stoffliche Verwertung verschiedener Kunststofffraktionen zu optimieren und innovative Technologien für eine zukunftsfähige Kreislaufwirtschaft zu entwickeln.

Chemisches Recycling – Rückgewinnung von Rohstoffen aus Kunststoffabfällen mittels Solvolyse, Pyrolyse oder Gasifizierung

Im Fokus stand die stoffliche Nutzung von werkstofflich nicht verwertbaren Kunststofffraktionen (gasförmig, flüssig, fest) oder Reststoffen aus der Sortierung. Verschiedene Prozessrouten wurden, aufbauend auf einer intelligenten Steuerung, hinsichtlich der Potenziale ausgewählter Einsatzstoffe für das chemische Recycling bis in den Pilotmaßstab bewertet.

Die Pyrolyse von SLF und DSD führte zu komplexen Produktgemischen, wobei Caprolactam als Hauptprodukt aus PA6



Pyrolyseanlage zur Verölung von kohlenstoffhaltigen Abfällen.

identifiziert wurde. Die Gasifizierung zeigte vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Ausbeuten an gasförmigen und flüssigen Produkten.

Zu den Ergebnissen zählen auch die Bilanzierung und Bewertung verschiedener Verfahrensoptionen, verbesserte Kenntnisse für die Analytik von kohlenstoffhaltigen Einsatzstoffen und Produkten beim Einsatz im chemischen Recycling sowie die Erstellung von Prozesskettenmodellen.

Vom Labor in die Praxis

Erste Demonstratoren bestätigen die Machbarkeit der entwickelten Technologien, die den Transfer in die Industrie ermöglichen – ein entscheidender Schritt zur Marktreife. Die im Projekt entwickelten Lösungen sollen langfristig in industrielle Prozesse integriert werden.

Ziel ist es, eine neue Generation von Recyclingtechnologien zu etablieren – offen, skalierbar und international anschlussfähig. Ein Beispiel ist die Herstellung einer Stuhlschale aus recyceltem Polyamid im Spritzguss, die im Projekt umgesetzt wurde – als Beleg dafür, dass hochwertige Produkte aus Abfallkunststoffen möglich sind.

Dabei ist ein Benchmarking von Rezyklaten im Labor- und Pilotmaßstab erfolgt, auch Compoundierung und Spritzguss von Blends inklusive Additivierung haben die Projektpartner



Aus kunststoffhaltigem Abfall wurde im Projekt Polyamid extrahiert, das im Spitzguss zu einer Stuhlschale verarbeitet wurde.

erfolgreich umgesetzt, ebenso wie die rheologische, mechanische und mikrostrukturelle Charakterisierung der aus recyceltem Kunststoff (Realfraktion) gefertigten Bauteile.

Die entwickelten Lösungen haben das Potenzial, die Recyclingtechnologien für verschiedene Kunststofffraktionen grundlegend zu verändern und eine nachhaltige Nutzung von Kunststoffabfällen sowie das Erfüllen von Recyclingquoten zu ermöglichen. Durch die Integration in industrielle Prozesse können die Technologien weltweit eingesetzt werden.

Nachhaltigkeit und Zukunftsperspektiven

»Waste4Future« leistet einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele und zur Umsetzung des europäischen Green Deal. Die entwickelten Technologien und Modelle sollen künftig in einer Online-Plattform zur Verfügung stehen, um Unternehmen bei der Auswahl nachhaltiger Recyclingpfade zu unterstützen.

Das Projekt hat zahlreiche Folgeprojekte angestoßen. Die Weiterentwicklung der Sensorik, die industrielle Umsetzung des Bewertungsmodells und die Integration in bestehende Recyclinganlagen stehen im Fokus. Ziel ist es, die Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe auf ein neues Niveau zu heben.



Sie haben Interesse an einer Zusammenarbeit?

Wir unterstützen Sie mit unseren Kompetenzen gerne bei der Verbesserung der Abfallverwertung und dem Erreichen von Recyclingquoten. Sprechen Sie uns an zu:

- Weiterentwicklung und Implementierung von Sensorik-Lösungen (farbunabhängige Sortierung)
- Automatisierter Prozesssteuerung
- Vergleich unterschiedlicher Prozess- und Aufbereitungspfade mit definierten Zielgrößen durch den Einsatz von kaskadierten Bewertungsmodellen für Kunststoff-haltige Abfallströme
- Alterungsbewertung von Kunststoffen
- Gewinnung von Rezyklaten in hoher Reinheit und Empfehlungen für passende Additivierungskonzepte
- Optimierung von Verwertung und Aufbereitung
- Bauteilentwicklung auf Basis Rezyklat-haltiger Kunststoffe
- Charakterisierung und Bewertung von Werkstoffsystemen und Bauteilen auf Basis Rezyklat-haltiger Kunststoffe (Ähnlichkeitsbewertung mit Neuware / Drop-In-Potenzial)
- Optimierung von Pyrolyse- und Gasifizierungsprozessen für das chemische Recycling (Einsatzstoff- und Produktcharakterisierung, Bilanzierung und Validierung, Modellierung und Entropieberechnung)
- Upscaling

Beteiligte Institute und Einrichtungen

- Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS
- Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP
- Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS
- Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
- Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR
- Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
- Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV
- Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS

Kontaktieren Sie uns:

Prof. Dr.-Ing. Maik Feldmann
Leiter Geschäftsfeld »Polymeranwendungen«

Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS
Walter-Hülse-Straße 1
06120 Halle (Saale)

Telefon + 49 345 5589-203
maik.feldmann@imws.fraunhofer.de

