

# **Kunststoffrecycling am Beispiel des EPS-Recycling aus Wärmedämmverbundsystemen**

Verfasst von:

**Sebastian Granderath**

Grundlagen der Umweltchemie

Wintersemester 2020/21

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
2	Recyclingverfahren von Kunststoffen .....	5
2.1	Werkstoffliches Recycling.....	6
2.1.1	Trocken- und nassmechanische Aufarbeitung.....	6
2.1.2	Lösungsmittelbasierte Verfahren .....	7
2.2	Chemisches Recycling .....	7
2.2.1	Pyrolyse .....	7
2.2.2	Vergasung.....	8
2.2.3	Verflüssigung .....	8
2.3	Vergleich der Kunststoffrecyclingverfahren .....	9
3	Recycling von EPS aus Wärmedämmverbundsystemen .....	11
3.1	Expandiertes Polystyrol .....	11
3.2	Wärmedämmverbundsysteme.....	12
3.3	Probleme beim Recyceln von WDVS .....	13
3.4	CreaSolv® Prozess.....	14
3.5	Lebenszyklusanalyse des PolyStyreneLoop.....	15
3.6	Bewertung des CreaSolv® Prozesses.....	18
4	Fazit .....	20
5	Literaturverzeichnis .....	22

# 1 Einleitung

Die Weltwirtschaft ist heutzutage sehr stark von Ressourcen abhängig. Im weltweiten Durchschnitt liegt der Materialverbrauch pro Person bei fünf Tonnen pro Jahr. All dieses Material wird aus natürlichen Ressourcen aus der Umwelt hergestellt, die nur begrenzt zur Verfügung stehen. Zudem wird sehr viel Energie zur Herstellung benötigt, sowohl von Grundressourcen als auch von Endprodukten.

Beim aktuellen Umgang mit den Ressourcen führt dies zu Ressourcenknappheit, Umweltverschmutzung (z.B. durch Einweg-Plastikartikel) und Umweltschäden (z.B. Abgase, Abwässer) wie z.B. dem Klimawandel. Alle diese Probleme müssen dringend bekämpft und eingedämmt werden<sup>[1]</sup>.

Dazu ist es beispielsweise wichtig, Abfälle zu vermeiden, die Produkte so lange wie möglich zu verwenden oder, wenn das nicht mehr möglich ist, sie so einzusetzen, dass noch ein Nutzen damit erzielt werden kann. Das alles kann dazu führen, dass weniger natürliche Ressourcen zur Herstellung verwendet werden müssen, weniger CO<sub>2</sub> ausgestoßen wird und die Umwelt weniger verschmutzt wird.

Gerade synthetisch hergestellte Kunststoffe stellen dabei ein Problem dar<sup>[2]</sup>. Die Natur kann diese nicht wie viele andere natürliche Materialien abbauen. Daher ist es die Aufgabe der Menschen, die diese Stoffe wegen ihrer besonderen Eigenschaften entwickelt haben und einsetzen, dafür zu sorgen, dass diese am Ende ihrer Lebenszeit wiederverwendet werden können.

Dazu werden Recyclingverfahren benötigt. Recycling beschreibt dabei alle Verfahren, die Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen, entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke, aufbereiten<sup>[3]</sup>. Dadurch ist eine Mehrfachverwendung von Materialien möglich, die ansonsten nach ihrer Benutzung entsorgt werden würden. Zusätzlich können diese auch als Rohstoffquelle fungieren und auf diese Weise werden weniger Ressourcen zur Herstellung von neuen Produkten benötigt. Das senkt zum einen den Bedarf an natürlichen Rohstoffen und senkt zum anderen die benötigte Energie zur Produktion und damit den CO<sub>2</sub>-Ausstoß.

Recycling ist somit eine Möglichkeit, um die Effizienz der Ressourcen für die Gesellschaft zu steigern. Es ist eine Methode, mit Rohstoffen oder Materialien (Werkstoffen) besser auszukommen und diese nachhaltiger zu verwenden. Solche Recycling- oder Verwertungsprozesse müssen für jedes Material individuell entwickelt werden, genauso wie die Herstellung solcher Materialien. Diese Prozesse sind für viele Materialien bisher noch nicht entwickelt, beziehungsweise aufgrund hoher Kosten oder Aufwand nicht etabliert und kommerzialisiert.

Ein Beispiel für ein Kunststoff-Material, das bisher nicht recycelt werden kann, ist expandiertes Polystyrol (EPS) in Wärmedämmverbundsystemen (WDVS). Dieses wurde lange Zeit mit einem inzwischen als gefährlich eingestuften Flammschutzmittel versetzt. Dieses Flammschutzmittel muss heute nach EU-Richtlinien vollständig zerstört werden. Daher wird EPS aus Wärmedämmverbundsystemen aktuell in Müllverbrennungsanlagen verbrannt.

Ein neues Recyclingverfahren für expandiertes Polystyrol aus dem Baubereich ist das CreaSolv® Verfahren, welches in diesem Essay erklärt wird (CreaSolv® ist eine eingetragene Marke der CreaCycle GmbH). Mit diesem Verfahren ist die Trennung von Polystyrol (PS) von eingeschlossenen Verschmutzungen und die Wiedergewinnung von PS-Granulat möglich<sup>[4]</sup>. Der Prozess gewinnt reines Polystyrol wieder, das zum Beispiel als Granulat, zur Herstellung neuer polystyrolhaltiger Produkte zur Hausisolierung eingesetzt werden kann.

## 2 Recyclingverfahren von Kunststoffen

Kunststoffe sind menschengemachte, synthetische Stoffe. Alle Eigenschaften, die die jeweiligen Kunststoffe besitzen, sind für einen gewissen Einsatzzweck designed worden. Das führt allerdings dazu, dass Kunststoffe nicht natürlich (biologisch) abgebaut werden können und darum sehr lange in der Umwelt verbleiben. Eine Wiederverwendung und/oder Recycling solcher Kunststoffe sind darum essenziell um diese Probleme zu vermeiden. Sie legen die Grundlage dafür, um nachhaltig und ökologisch sinnvoll Kunststoffe weiter zu verwenden.

Bisher werden Kunststoffe am Ende ihrer Lebenszeit zu großen Teilen energetisch verwertet. Dabei wird, zum Beispiel durch die Verbrennung in Abfallverbrennungsanlagen, der Kunststoff als alternativer Brennstoff und billiger Ersatz für Heizöl verwandt. Die von der Europäischen Union aufgestellte Abfallhierarchie aus der EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG<sup>[3]</sup> (Abbildung 1) legt eine Prioritätenliste von Abfallbewirtschaftungsmaßnahmen fest. Danach ist das Recycling vorteilhafter als die energetische Verwertung.



Abbildung 1: Abfallhierarchie nach EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG

Daher müssen Recyclingverfahren entwickelt werden, die in der Lage sind, Kunststoffe werkstofflich oder chemisch zu recyceln. Ein großes Problem stellt dabei das Produktdesign vieler kunststoffhaltiger Materialien dar, das nicht auf das Recycling ausgelegt ist. Zudem sind in Kunststoffen häufig zusätzliche Inhaltsstoffe enthalten, die inzwischen als Schadstoffe identifiziert, eingestuft und teilweise verboten wurden. Eine schlechte Trennung der Stoffe voneinander führt dazu, dass die Kunststoffe nicht recycelt werden können und anstelle dessen energetisch verwertet werden.

Aus diesem Grund müssen neue Verfahren entwickelt und kommerzialisiert werden, um mehr Recycling möglich zu machen. Als Recycling gelten nach §3 Abs. KrWG<sup>[5]</sup> alle Verfahren, die Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen, entweder für den ursprünglichen Zweck

oder für andere Zwecke, aufbereiten. Die energetische Verwertung ist somit kein Recyclingprozess. Alle Recyclingverfahren können in zwei Überkategorien eingeteilt werden: **Werkstoffliches** und **chemisches Recycling**. Diese werden im Folgenden genauer erläutert<sup>[6]</sup>. Während werkstoffliches Recycling möglichst sortenreine Polymere benötigt, wird vom chemischen Recycling behauptet, dass es auch gemischte Kunststoffabfälle verarbeiten kann.

## **2.1 Werkstoffliches Recycling**

Werkstoffliches Recycling beschreibt alle Verfahren, die während des Recyclingprozesses die Polymerstruktur der Kunststoffe nicht verändern. Am Ende der Prozesse wird das ursprüngliche Material in gereinigter Form erhalten. Da hierbei physikalische Prozesse zum Recyceln eingesetzt werden, die nur den Aggregatzustand verändern, kann es auch als physikalisches Recycling bezeichnet werden. Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches werkstoffliches Recycling ist die gründliche Trennung von Kunststoffsorten. Je besser diese Sortierung ist, desto höher ist die Qualität des recycelten Produkts. Die Trennung und Reinigung der Kunststoffe kann durch zwei Verfahren erfolgen, die trocken- und nassmechanische Aufbereitung oder das lösungsmittelbasierte Verfahren<sup>[6]</sup>.

### **2.1.1 Trocken- und nassmechanische Aufarbeitung**

Mithilfe der Kombination von trocken- und nassmechanischen Aufbereitungsverfahren können Fremdstoffe (z.B. Aufkleber, Glas, Metalle) von einem Kunststoff getrennt und somit gereinigt werden.

Trockenmechanische Verfahren nutzen dabei zum Beispiel Siebung oder induktive und magnetische Metallabscheidung, um Kunststoffe von unerwünschten Materialien zu trennen. Kunststoffe können auch nach Kunststofftyp voneinander getrennt und sortiert werden. Dazu wird meist die Nahinfrarotspektroskopie (NIR-Trennung) verwendet.

Die nassmechanische Aufbereitung besteht aus der Zerkleinerung und Wasch- und Trennprozessen. In der Wäsche können unter anderem Anhaftungen (z.B. Sand, Lebensmittelreste) und Kleber abgelöst werden.

Mittels Dichtentrennung können verschiedene Kunststofftypen sortiert werden. Dazu wird die unterschiedliche spezifische Dichte von Polymeren zur Trennung genutzt. Haben verschiedene enthaltene Kunststoffe eine ähnliche spezifische Dichte, muss zuvor eine Trennung der Kunststoffe, zum Beispiel durch die NIR-Trennung, erfolgen.

Abschließend werden die Kunststoffe mechanisch oder thermisch getrocknet. Mechanisch kann dies durch eine feuchtigkeitsentziehende Zentrifuge geschehen. Bei der thermischen Trocknung werden die Kunststoffe von warmer Luft durchströmt<sup>[6]</sup>.

### **2.1.2 Lösungsmittelbasierte Verfahren**

Bei Lösungsmittelbasierten Verfahren werden spezielle Lösungsmittel verwendet, um einen Kunststoff gezielt in Lösung zu bringen. Anschließend werden die flüssigen und festen Bestandteile voneinander getrennt. Fremdstoffe und/oder Additive können hierbei vom Polymer getrennt werden.

Das Polymer wird zum Abschluss des Verfahrens aus dem Lösungsmittel gefällt und getrocknet. Im Anschluss wird der zurückgewonnene gereinigte Kunststoff zu Granulat extrudiert. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass Kunststoffe aus Verbänden oder Kunststoffabfälle, die Schadstoffe enthalten, in sehr reiner Form zurückgewonnen werden können<sup>[6]</sup>.

## **2.2 Chemisches Recycling**

Chemisches Recycling beschreibt alle Recyclingverfahren, die die molekulare Struktur der Polymere in Kunststoffen durch chemische Prozesse zerstören und aufbrechen. Kunststoffpolymere werden dabei zum Beispiel in einzelne Monomere oder andere kleinere Moleküle zerlegt, die zur Erzeugung neuer Polymere (Monomere) oder als chemische Rohstoffe (Kohlenwasserstoffe, Synthesegas) genutzt werden können. Chemische Recyclingverfahren sind die Pyrolyse, die Vergasung und die Verflüssigung<sup>[6]</sup>.

### **2.2.1 Pyrolyse**

Bei der Pyrolyse werden Kunststoffe unter dem Ausschluss von Sauerstoff thermisch zersetzt. Dabei entstehen Öle und Wachse, die in der Produktion neuer Chemikalien und Polymere eingesetzt werden können.

Inwieweit bei diesem Verfahren stärker verschmutzte oder gemischte Kunststofffraktionen recycelt werden können ist allerdings noch nicht bekannt<sup>[6]</sup>.

### 2.2.2 Vergasung

Bei der Vergasung wird unter Sauerstoffmangel aus festen Kunststoffen ein Synthesegas (Wasserstoff- und Kohlenstoffmonoxid-Gemisch) erzeugt, welches in der chemischen Industrie als Grundstoff für die Herstellung von vielen Produkten eingesetzt werden kann. Die Qualität des erzeugten Synthesegases hängt allerdings stark von den eingesetzten Stoffen ab. Je heterogener der eingesetzte Stoff, desto aufwändiger wird die Aufreinigung<sup>[6]</sup>.

### 2.2.3 Verflüssigung

In Verflüssigungsverfahren werden Kunststoffe direkt verflüssigt mit dem Ziel, das verflüssigte Produkt weiter zu verwenden. Das flüssige Produkt wird meist zunächst gereinigt.

Ein Verfahren der Verflüssigung ist die **Solvolyse**, bei der Polymere in organischen Lösungen gelöst werden. Dazu wird unter Umständen eine erhöhte Temperatur oder ein erhöhter Druck benötigt. Im Gegensatz zu lösungsmittelbasierten Recyclingverfahren wird das Polymer bei der Solvolyse gezielt in Monomere zerlegt. Hier erfolgt eine **Depolymerisation**, die auf Kondensationspolymere (PET, PA) anwendbar ist und sortenreine Abfallströme benötigt. Die Monomere können wieder polymerisiert werden.

Die **Verölung** ist ein weiteres Verfahren der Verflüssigung, bei der Kunststoffpolymere direkt thermisch oder katalytisch in einem Rührkesselreaktor zu Ölen (Kohlenwasserstoffen) zersetzt werden. Die Öle können verschmutzt sein und müssen vor einer hochwertigen Nutzung gereinigt werden<sup>[6]</sup>.



## 2.3 Vergleich der Kunststoffrecyclingverfahren

Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Methoden zur Abfallbehandlung von Kunststoffen.

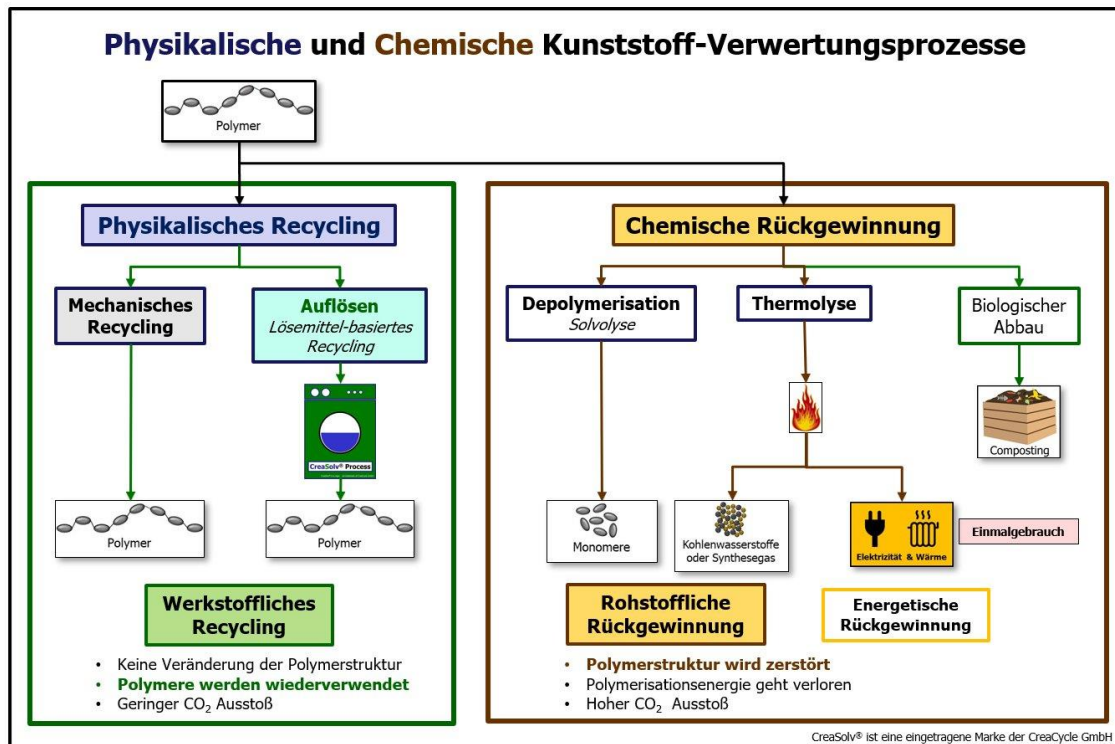


Abbildung 2: Kunststoffrecyclingverfahren<sup>[7]</sup>

Werkstoffliches oder auch physikalisches Recycling sind Oberbegriffe für mechanische und lösungsmittelbasierte Verfahren, bei denen die molekulare Struktur des Kunststoffes nicht verändert wird. Chemisches Recycling umfasst die Depolymerisation, die Pyrolyse und die Vergasung. Dabei werden folgende Produkte erhalten:

- Monomere, die wieder polymerisiert werden können,
- flüssige und feste Kohlenwasserstoffe (Öle und Wachse),
- Synthesegas

Diese Rohstoffe können auch zur Herstellung anderer chemischer Produkte genutzt werden. Außerdem gibt es noch die energetische Verwertung, die Kunststoff in Energie umwandelt.

Sowohl das physikalische als auch das chemische Recycling ist in der Abfallhierarchie nach EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG<sup>[1]</sup> in der Priorität höher einzuordnen als die energetische Verwertung. Chemische Recyclingprozesse erzeugen Chemikalien, die weiter behandelt werden müssen. Dazu sind zusätzliche Mengen an Energie und Rohstoffen nötig. Nach der aktuellen Lage werden werkstoffliche Recyclingverfahren als ökologisch und ökonomisch vorteilhafter eingestuft. Diese Verwertungsverfahren sind weniger aufwändig.

Daher sollte nach Möglichkeit immer ein werkstoffliches Recyclingverfahren gewählt werden bevor ein Kunststoff chemisch verändert wird, um als Rohstoffquelle für neue Kunststoffe zu dienen. Erst wenn eine Wiederverwendung eines Kunststoffes nicht möglich ist, sollten chemische Recyclingverfahren verwendet werden, um die Umweltbelastungen durch Kunststoffe zu senken und die Kunststoffproduktion nachhaltiger zu gestalten<sup>[6]</sup>.

### 3 Recycling von EPS aus Wärmedämmverbundsystemen

#### 3.1 Expandiertes Polystyrol

Expandiertes Polystyrol wird hergestellt, indem Polystyrol-Granulat, das Pentan als Schäumittel enthält, mit heißem Wasserdampf aufgeschäumt und anschließend in Form gepresst wird. Im Aufschäumprozess vergrößert sich das Volumen des Polystyrols um das 20 bis 50-fache seines ursprünglichen Volumens.

Polystyrol ist ein thermoplastischer Kunststoff. Er wird durch die Polymerisation von Styrol gewonnen (Abbildung 3). Großtechnisch erfolgt die Herstellung entweder durch die Dehydrierung von Ethylbenzol oder das SM/PO-Verfahren. Ethylbenzol wird aus den erdölbasierten Chemikalien Benzol und Ethylen in Gegenwart von Katalysatoren, wie z.B. Aluminiumchlorid, gewonnen. Weltweit werden jährlich etwa 15 Millionen Tonnen Polystyrol hergestellt (Stand 2007).

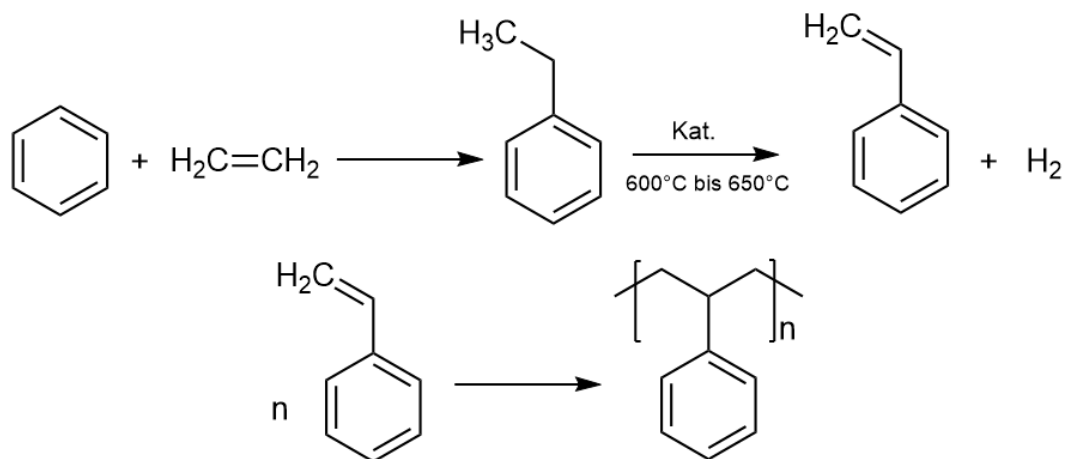


Abbildung 3: Herstellung von Polystyrol

Während die Dichte von Polystyrol zwischen  $1040$  und  $1090 \text{ kg/m}^3$  liegt, sinkt sie bei expandiertem Polystyrol auf  $10$  bis  $35 \text{ kg/m}^3$ . Außerdem besitzt expandiertes Polystyrol eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit im Bereich von  $0,035$  bis  $0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Durch diese Eigenschaften wird EPS als bevorzugtes Dämmmaterial im Bau eingesetzt. Außerdem wird es als Verpackungsmaterial, für Schutzhelme oder Surfboards verwendet<sup>[8]</sup>. Zirka 60% des EPS wird im Baubereich eingesetzt<sup>[9]</sup>.

### 3.2 Wärmedämmverbundsysteme

Wärmedämmverbundsysteme (WDVS), im englischen auch ETICS (External Thermal Insulation Composite System) genannt, sind mehrschichtige Konstruktionen, die zur Wärmedämmung von Gebäudewänden eingesetzt werden. Diese bestehen aus mehreren Schichten, dargestellt in Abbildung 4<sup>[10]</sup>.

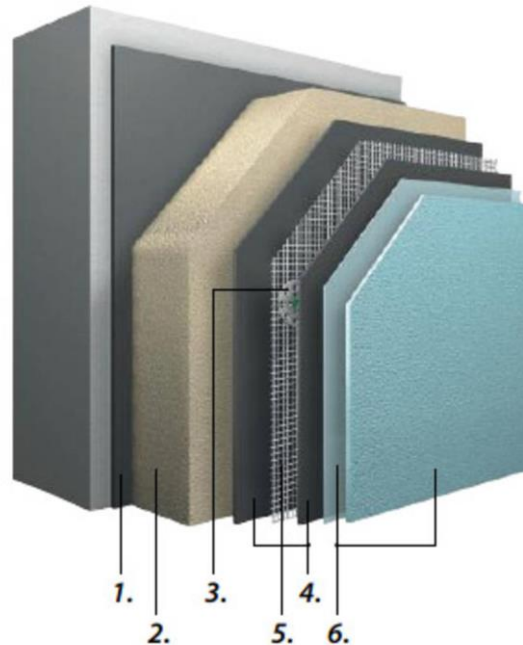


Abbildung 4: Wärmedämmverbundsystem mit 1. Klebstoff, 2. Thermisches Dämmmaterial, 3. Verankerung, 4. Unterputz, 5. Verstärkung, 6. Oberste Schicht<sup>[11]</sup>

WDVS bestehen meist aus einer Schicht Klebstoff, gefolgt von dem thermischen Dämmmaterial. Das kann neben geschäumtem und expandiertem Polystyrol (EPS/ XPS) auch ein anderes Material wie zum Beispiel Mineralwolle sein. Hinter dem Dämmmaterial liegen mehrere Stabilisierungsschichten und abschließend die oberste Schicht, welche nachher die einzige Sichtbare ist<sup>[11]</sup>.

Im Zeitraum von 1960 bis 2012 sind laut Angaben des Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. (FV WDVS) 900.000.000 m<sup>2</sup> an Wärmedämmverbundsystemen verbaut worden. Ungefähr 80% davon nutzen EPS als Dämmmaterial. Daher wurden ungefähr 720.000.000 m<sup>2</sup> Gebäudeflächen mit EPS gedämmt<sup>[8]</sup>.

### 3.3 Probleme beim Recyceln von WDVS

Expandiertes Polystyrol, welches in Wärmedämmverbundsystemen verwendet wird, muss nach der aktuellen Gesetzgebung mit einem Flammschutzmittel versetzt sein. Das Flammschutzmittel der Wahl war bis zum Jahr 2014/2015 1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan (HBCD) mit einem Marktanteil von mehr als 95%. Dieser Stoff wurde 2008 von der Europäischen Union als besonders besorgniserregender Stoff (Substance of very high concern, SVHC) aufgrund seiner PBT-Eigenschaften (persistent, bioakkumulativ, toxisch) eingeordnet. 2011 wurde HBCD in Anhang XIV der REACH Verordnung aufgenommen<sup>[12]</sup> und schließlich am 9. Mai 2013 zum Anhang A (Eliminierung) der persistenten organischen Schadstoffe (POP) der Stockholmer Konventionen hinzugefügt<sup>[13]</sup>. Durch diese Beschlüsse wurde die Produktion und Verwendung von HBCD verboten. Als Reaktion darauf wurde ein neues Flammschutzmittel entwickelt, ein bromiertes Styrol-Butadien-Copolymer mit dem Namen PolyFR<sup>[14]</sup>. Es ersetzt HBCD in EPS in neuen Wärmedämmverbundsystemen.

In den kommenden 20 bis 50 Jahren wird es darum viele EPS-Abfälle geben, welche jährlich ansteigen und HBCD enthalten. Nach der aktuellen Gesetzgebung müssen alle Abfälle, die persistenten organischen Schadstoffe (POP) enthalten, rückstandslos zerstört werden. Eine Möglichkeit ist hier die Hochtemperaturverbrennung, bei der gleichzeitig eine Energierückgewinnung stattfindet<sup>[15,16]</sup>. Daher kann Polystyrol aus WDVS nicht mehr mit herkömmlichen mechanischen Methoden recycelt werden, die für Polystyrol aus Verpackungsmaterial genutzt werden, aber nicht in der Lage sind, das verbotene Flammschutzadditiv auszuschleusen.

### 3.4 CreaSolv® Prozess

Der CreaSolv® Prozess ist ein lösungsmittelbasiertes Recyclingverfahren. Durch diesen Prozess kann HBCD von Polystyrol abgetrennt werden, damit das saubere Polystyrol zurückgewonnen und wiederverwendet werden darf. Dazu wird der PS-Schaum aus WDVS-Abfällen nach der Zerkleinerung in einem Behälter in der PS-spezifischen Lösungsmittelformulierung CreaSolv® PS aufgelöst<sup>[4]</sup>. Hierbei lösen sich sowohl Polystyrol als auch HBCD und beide ändern den Aggregatzustand von fest nach flüssig. Die restlichen festen Abfälle, zum Beispiel Schmutz oder Zement, können durch Filtration ausgeschleust werden<sup>[17]</sup>.

Zu der nun von festen Stoffen befreiten Lösung wird eine zweite CreaSolv® Formulierung hinzugegeben<sup>[4]</sup>, die das gelöste Polystyrol als Gel ausfällt, während das HBCD in der Lösung verbleibt. Nur das Polystyrol ändert wieder den Aggregatzustand von flüssig zurück zu fest. Dieses PS Gel wird von der restlichen Lösung abgetrennt und kann nach dem Trocknen in granuliertes Polystyrol überführt werden. Das im Polystyrol befindliche Lösungsmittel wird nach dem Trocknen aufgefangen und mit den restlichen Betriebsmitteln (mit HBCD) vereint. Dann werden die Lösemittel abdestilliert, wobei das HBCD-Additiv im Destillationssumpf zurückbleibt. Die CreaSolv® Betriebsmittel können nun wieder dem Prozess an früherer Stelle hinzugefügt werden<sup>[17]</sup>.

Das HBCD wird mithilfe einer Hochtemperaturverbrennung in einer Brom-Rückgewinnungsanlage zerstört. Bei diesem Prozess wird elementares Brom zurückgewonnen, welches zum Beispiel bei der Produktion eines neuen Flammschutzmittels, zum Beispiel PolyFR, verwendet werden kann. Der gesamte CreaSolv® Prozess ist in Abbildung 5 dargestellt.

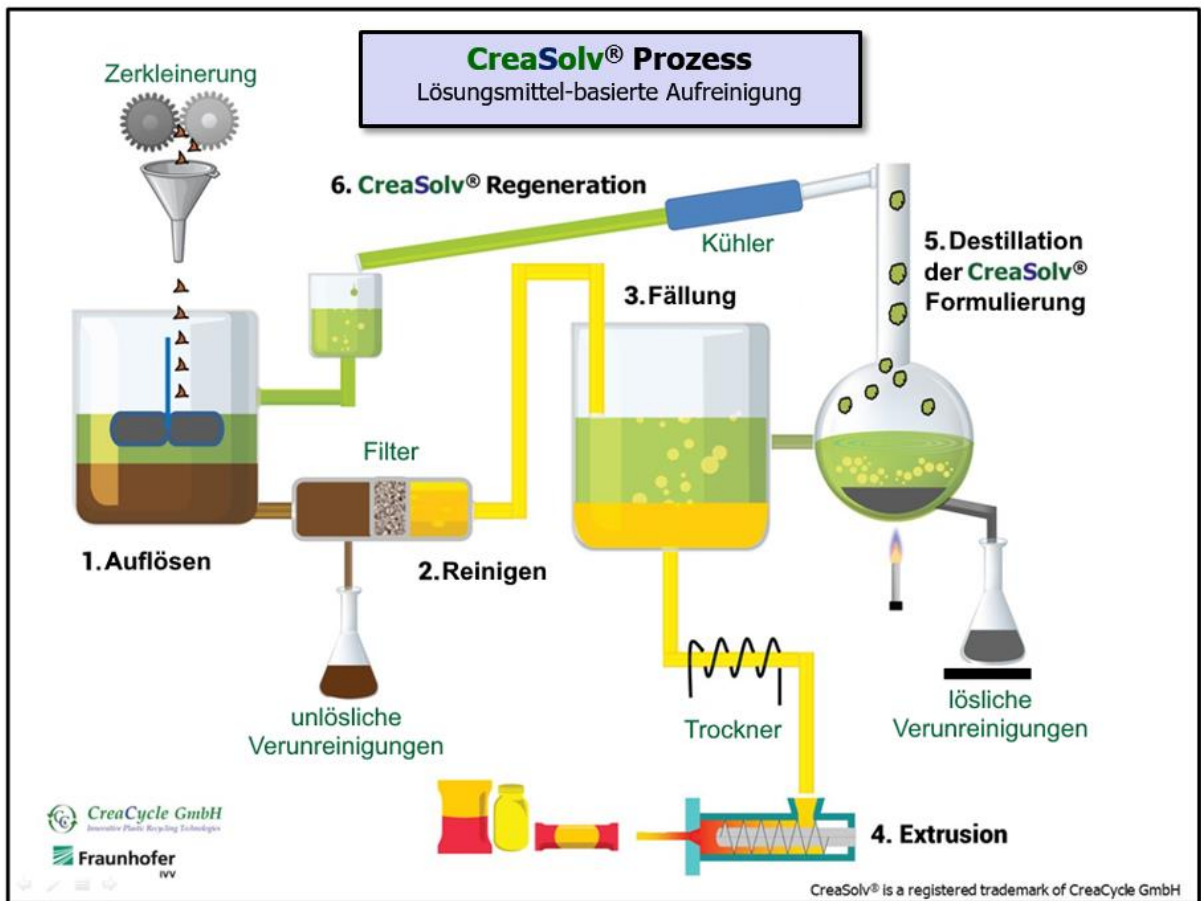


Abbildung 5: Darstellung des CreaSolv® Prozesses<sup>[7]</sup>

Da während des gesamten CreaSolv® Prozesses die molekulare Struktur des Polystyrols nicht verändert wird und nur physikalische Prozesse verwendet werden, bei denen sich lediglich die Aggregatzustände des Polymers verändern (fest -> flüssig -> fest), handelt es sich hierbei um ein reines werkstoffliches Recyclingverfahren. Diese Einstufung wird durch das Deutsche Umweltbundesamt in seinem Hintergrundpapier „Chemisches Recycling“ bestätigt<sup>[6]</sup>. Der zweite Schritt, in welchem HBCD zerstört und elementares Brom zurückgewonnen wird, ist dem chemischen Recycling zuzuordnen, da hier die molekulare Struktur des Stoffes verändert wird.

### 3.5 Lebenszyklusanalyse des PolyStyreneLoop

PolyStyreneLoop (PSLoop) ist eine niederländische Kooperative, die eine CreaSolv® Demonstrationsanlage für das Recycling von HBCD-haltigen Polystyrol-Isoliermaterialien aus dem Bausektor errichtet. Diese Anlage befindet sich in Terneuzen in den Niederlanden und ist zum aktuellen Zeitpunkt in der letzten Bauphase mit einer geplanten Inbetriebnahme im 2. Quartal 2021. Sie nutzt den CreaSolv® Prozess zum Recycling von HBCD-verunreinigten EPS-Abfällen. Um die Umweltverträglichkeit des PSLoop Projektes zu bewerten, ist eine

Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) vom TÜV Rheinland durchgeführt worden. Diese Analyse vergleicht den Einfluss von unterschiedlichen Behandlungen von Wärmedämmverbundsystemabfällen, welche EPS und HBCD enthalten, auf verschiedene Umweltfaktoren. Im Fokus stehen dabei PSLoop und die aktuell übliche Verbrennung von EPS mit Energierückgewinnung.

Zunächst wurde bei der Lebenszyklusanalyse das System definiert. Es wurde von einem Anteil von 10% EPS in den Wärmedämmverbundsystemen ausgegangen. Die Daten für den CreaSolv® Prozess stammten von Versuchen im Labormaßstab, die der Bromrückgewinnung aus der Anlage der Firma ICL in den Niederlanden. Das Institut für Infrastruktur, Wasser, Ressourcen und Umwelt (IWARU) der FH Münster stellte geschätzte Daten für die Vorbehandlungsprozesse, die nötig sind, um WDVS so zu zerkleinern, dass EPS-reicher Abfall im CreaSolv® Prozess verarbeitet werden kann, zur Verfügung. Alle weiteren Prozesse wurden von Experten mithilfe von Literaturquellen geschätzt.

Weitere Annahmen sind zum Beispiel ein Energiebedarf für die Zerstörung von Häusern von 0,2 MJ/kg WDVS oder eine Durchschnittsdistanz zwischen dem Abbauort des Wärmestoffverbundsystems und der Verbrennungsanlage.

Das Ergebnis dieser Lebenszyklusanalyse zeigt eine deutlich geringere Umweltbelastung des PSLoop im Vergleich zur Verbrennung von WDVS-Abfällen. Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen des aktuellen Status Quo mit dem PSLoop, der den CreaSolv® Prozess nutzt. Diese sind beim PSLoop um 47% geringer als bei der Verbrennung. In dieser Abbildung zeigen sich die großen Unterschiede zwischen beiden Prozessen. Im PSLoop werden zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionen erzeugt, um die Wärmedämmverbundsysteme vorzubehandeln. Außerdem benötigt der CreaSolv® Prozess Energie, genauso wie die Bromzurückgewinnungsanlage und die Erweiterungen im Strom und Dampf.

Bei der aktuellen Verbrennung und Energierückgewinnung der WDVS kann das gesamte Material nicht wiederverwendet werden. Dadurch entstehen im Vergleich zum PSLoop am Lebensende der WBVS über fünfmal höhere Mengen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Mengeneinheit der Wärmedämmverbundsysteme. Zudem wird viel Energie verbraucht, um neues Polystyrol und Brom herzustellen.



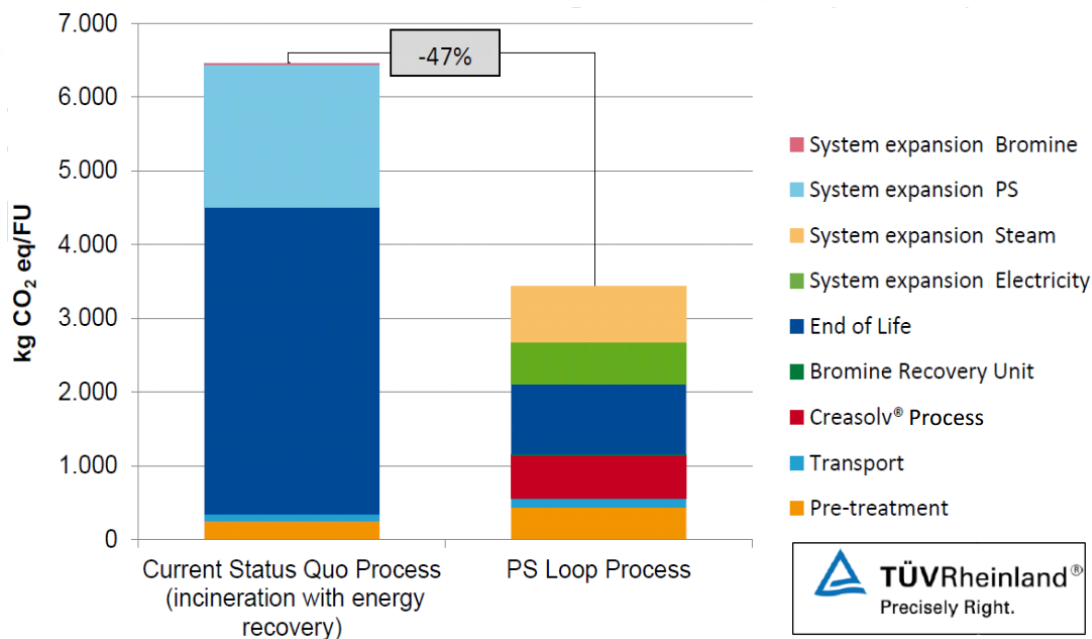


Abbildung 6: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Verbrennung von WDVS mit dem PSLoop<sup>[18]</sup>

Neben geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen kam die Lebenszyklusanalyse zudem zu dem Ergebnis, dass das Recycling der Wärmedämmverbundsysteme mit dem PSLoop zu einer geringeren Umweltbelastung in den Kategorien Klimawandel, Eutrophierung (Frischwasser), Sommersmog, Ressourcenabbau (Fossil, Elemente), Humantoxizität (Krebs, Nicht-Krebs) und Ökotoxizität von Frischwasser führt. Diese Ergebnisse sind in aufgeführt in Abbildung 7.

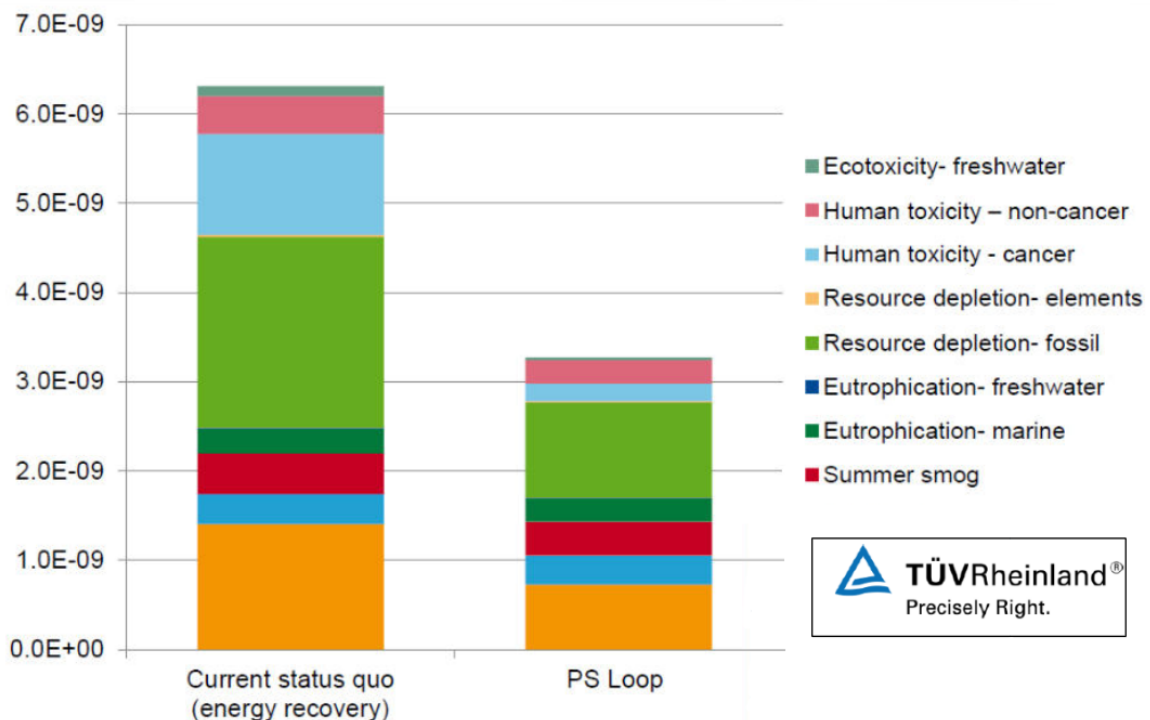


Abbildung 7: Vergleich der Umweltbelastung der Verbrennung von WDVS mit dem PSLoop<sup>[18]</sup>

Um die Stabilität der Ergebnisse zu untersuchen und eine falsche Interpretation auszuschließen, wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die untersuchten, ob eine Veränderung von manchen Parametern, zum Beispiel dem Anteil von 10 wt% EPS in WDVS, einen Einfluss auf die Endergebnisse der Studie haben. Dabei zeigte sich lediglich bei einer Veränderung der Transportdistanzen eine Abweichung von den Ergebnissen der Studie.

Die Studie wurde nach Abschluss von unabhängigen Experten kritisch bewertet. Die Qualität der Methodik und die Anwendung der Analyse wurde als adäquat für das Ziel der Studie befunden und sind konform mit den ISO 14040 und ISO 14044 Standards. Der PSLoop-Prozess ist ein zukünftiges Recyclingverfahren, das sich aktuell noch in der Entwicklungsphase befindet. Daher bestehen noch Unsicherheiten, was den Abfallstrom und die Prozessdaten des CreaSolv<sup>®</sup> Prozesses im großen Maßstab angeht. Der Technologie-Reifegrad (Technology Readiness Level, TRL) des Prozesses variiert heute zwischen TRL 3 und TRL 4. Das heißt, dass die Technologien und Daten im Labormaßstab getestet sind. Um Unsicherheiten zu beseitigen, muss die Studie erneut durchgeführt werden, sobald die Testphase der Pilotanlage des PSLoops abgeschlossen ist und mehr Daten vorliegen<sup>[18]</sup>. Das PSLoop Werk wird den CreaSolv<sup>®</sup> Prozess auf TRL 5-7 anheben.

### **3.6 Bewertung des CreaSolv<sup>®</sup> Prozesses**

Die vom TÜV Rheinland durchgeführte Lebenszyklusanalyse zeigt, dass das CreaSolv<sup>®</sup> Verfahren ein sinnvolles Verfahren für das Recycling von EPS aus Wärmedämmverbandsystemen ist. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß kann, im Vergleich zum Status quo, um 47 % gesenkt werden. Auch für weitere Umweltfaktoren ist der Prozess deutlich schonender. Diese Daten sind allerdings noch nicht zu 100 % sicher. Da die Testphase der Pilotanlage noch nicht beendet ist, sind die Daten für den CreaSolv<sup>®</sup> Prozess im großen Maßstab unsicher.

Laut eines Berichtes<sup>[8]</sup> des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik wird das Aufkommen von Kunststoffmüll im Jahre 2011 auf ungefähr 4.400 kt geschätzt. 42 kt stammen dabei von EPS-Abfällen aus dem Baubereich. Diese machen somit weniger als ein Prozent des jährlichen Kunststoffabfalls aus, sind aber durch den verbotenen Stoff HBCD belastet und nicht recyclingfähig. Damit ist das Verbrennen zwingend erforderlich, solange kein kommerzielles Recyclingverfahren existiert. In den kommenden Jahren wird mit einer signifikanten Steigerung der EPS-Abfälle aus Wärmedämmverbandsystemen gerechnet. Perspektivisch kann die Abfallmenge bis 2050 auf bis zu 50 kt pro Jahr anwachsen. Somit nimmt auch die Relevanz eines solchen Verfahrens zu.

Entscheidend für den Erfolg dieses Projekt ist die Verfügbarkeit von EPS, welches mit HBCD versetzt ist, in ausreichender Qualität und Quantität. Je aufwändiger der Aufbereitungsprozess

ist, desto schlechter ist die Bilanz des PSLoops. Außerdem spielt die Distanz eine Rolle, die zurückgelegt werden muss, um den Abfall zu einer PSLoop-Anlage zu befördern. Aus diesem Grund hat man ein Netzwerk mit zertifizierten Sammelstellen in Deutschland und den Niederlanden aufgebaut, wo EPS Abfälle vorsortiert und verpresst werden, um so das Volumen zu reduzieren, die Ladekapazität der Transportfahrzeuge zu optimieren und die Umweltbelastung durch den Transport (Treibstoff) zu minimieren.

Im Umweltprogramm der vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) ist das „Auflösen“ als beste verfügbare Technologie zur Vorbehandlung von HBCD-Abfällen in die Technischen Richtlinien der Basler Konvention aufgenommen worden<sup>[17]</sup>. Sollten die Daten der Testphase der Pilotanlage nicht eine Verschlechterung der aktuell angenommenen umweltschonenden, technischen und ökonomischen Realisierbarkeit des Verfahrens zeigen, so ist es bestens geeignet, um das Recycling in diesem Bereich nach vorne zu treiben und die Umweltbelastungen in diesem Bereich weiter zu senken.

## 4 Fazit

Recycling von Kunststoffen ist eine essenzielle Methode zum Umgang mit Kunststoffabfällen. Da diese synthetisch hergestellten Materialien nicht durch die Natur abgebaut werden können, muss der Mensch am Ende ihrer Lebenszeit Technologien entwickeln und anwenden, um diese wieder einer sinnvollen Verwendung zuzuführen. Die bisherige energetische Verwertung und Deponierung entzieht den energiehaltigen Kunststoff einer möglichen Wiederverwendung und sorgt so für einen noch höheren Ressourcenverbrauch, da der Bedarf an Kunststoffen auch weiterhin signifikant ansteigen wird.

Durch Recycling kann die Lebenszeit oder die Anzahl der Wiederverwendungszyklen von Kunststoffen verlängert werden. Die Umweltbelastung wird dabei durch die Reduktion der benötigten natürlichen Rohstoffe und eine reduzierte CO<sub>2</sub>-Bilanz gesenkt.

Zurzeit machen die Kosten für die Entwicklung von Recyclingverfahren beziehungsweise das Aufbereiten in Recyclinganlagen diese häufig wirtschaftlich unattraktiv. Als Anreiz für effektives Recyceln ist darüber nachzudenken, Neuware mit einer „End-of-Life“-Steuer zu belegen. Dadurch würden alle Recyclingverfahren auf dem Markt aufgewertet werden.

Zum Umweltschutz und zur besseren Handhabung von Ressourcen sollten wesentlich mehr Recyclingverfahren entwickelt werden, um bisher nicht recycelbare Produkte besser verwerten zu können. Bei der Auswahl dieser Verfahren sollte sich an der Abfallhierarchie in Abbildung 1 orientiert werden. Hierbei gilt, dass die Vermeidung von Abfällen und die Wiederverwendung immer an erster Stelle stehen. Das Recycling kommt direkt im Anschluss.

Bei der Entwicklung und Wahl des Recyclingverfahrens sollten werkstoffliche und chemische Verfahren unterschieden werden. Da werkstoffliche Verfahren das gleiche Material zurückgewinnen, das ursprünglich in den Recyclingprozess eingebracht wurde, werden keine neuen fossilen Rohstoffe zur Herstellung neuer Produkte benötigt. Chemische Verfahren zerstören immer die Polymerstrukturen und erzeugen dagegen neue Stoffe wie Monomere, Synthesegas oder andere Kohlenwasserstoffverbindungen, die für die Produktion neuer Materialien eingesetzt werden können. Diese Produktion erfordert dann wieder Energie, was sich negativ auf die Umweltbilanz dieser Verfahren auswirkt. Werkstoffliche Verfahren sollten, aufgrund der Annahme, dass sie eine bessere Umweltbilanz besitzen als chemische Prozesse, zuerst für das Recycling zur Wiederverwendung eines Materials in Betracht gezogen werden. Chemische Recyclingverfahren dienen somit der Erweiterung der aktuell genutzten mechanischen (physikalischen) Prozesse und bieten die Möglichkeit, Stoffe zu recyceln, die durch werkstoffliche Verfahren nicht recycelt werden können.

Auch die Kombination von werkstofflichen und chemischen Recyclingverfahren sollte in Betracht gezogen werden. Das zeigt das PSLoop Projekt, in der der CreaSolv® Prozess - ein

werkstoffliches Verfahren - mit der Bromrückgewinnung aus HBCD - ein chemisches Verfahren - kombiniert wird.

Es wäre wünschenswert, dass die Entwicklung und der Einsatz solcher neuen innovativen Recyclingverfahren in Zukunft zu einer Reduktion der energetischen Verwertung von Kunststoff-Abfällen führen. Das schont die natürlichen Ressourcen, reduziert Kunststoffabfälle und senkt den CO<sub>2</sub>-Ausstoß.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Worrell, E., Reuter, M. A., Handbook of Recycling, 2014, Elsevier
- [2] Sasse, F., Emig, G. Chemisches Recycling von Kunststoffen, Chemie Ingenieur Technik Vol.70-3, 233-245, 1998
- [3] RRL: Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (Text von Bedeutung für den EWR) (ABl. L312 v. 22. 11. 2008, S.3), zuletzt geändert durch Richtlinie (EU)2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30.Mai 2018 (ABl. L 150 v.14.06.2018,S.109)
- [4] Schlummer, M., et al., Recycling of flame retarded waste polystyrene foams (EPS and XPS) to PS granules free of hexabromocyclododecane (HBCDD), Fraunhofer IVV
- [5] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz–KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl.IS.212), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl.IS.2808)
- [6] Vogel, J., et. al (2020) „Chemisches Recycling“, Hintergrund, Umweltbundesamt
- [7] Bild bereitgestellt und Bearbeitung gestattet durch Dr. Gerald Altnau, CreaCycle GmbH
- [8] Albrecht, W., Schwitalla, C., Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS: Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des WDVS nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung, durchgeführt im Auftrag des Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V., 2014, Valley
- [9] Ceresana, Marktstudie Expandierbares Polystyrol, 2017, unter: <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/kunststoffe/expandierbares-polystyrol/expandierbares-polystyrol-eps-markt-anteil-kapazitaet-angebot-nachfrage-prognose-innovation-anwendung-wachstum-produktion-industrie.html>
- [10] Deutsches Institut für Bautechnik, ETICS, unter: <https://www.dibt.de/de/auprodukte/informationsportal-bauprodukte-und-bauarten/produktgruppen/bauprodukte-detail/bauprodukt/etics> (abgerufen 03.01.2021)
- [11] European Association for ETICS, About ETICS, unter <https://www.ea-etics.eu/etics/about-etics/> (abgerufen 03.01.2021)

- [12] European Union (2011) Commission Regulation (EU) No 143/2011 of 17 February 2011 amending Annex XIV to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals ('REACH'). Official Journal of the European Union L 44/2
- [13] UN Environment Programme, Chemicals listed in Annex A, unter: <http://chm.pops.int/Implementation/Alternatives/AlternativestoPOPs/ChemicalslistedinAnnexA/tabid/5837/Default.aspx> (abgerufen 04.01.2021)
- [14] Wang, Y., et al., Study on the effect of PolyFR and its FR system on the flame retardancy and foaming behavior of polystyrene, RSC Advances, 9. 192-205, 2019
- [15] Takigami, H., Watanabe, M., Kajiwara, N., Destruction behavior of hexabromocyclododecanes during incineration of solid waste containing expanded and extruded polystyrene insulation foams, Chemosphere 116, 24-33, 2014
- [16] Mark, F. E., Vehlow, J., Dresch, H., Dima, B., Gruttner, W., Horn, J., Destruction of the flame retardant hexabromocyclododecane in a full-scale municipal solid waste incinerator, Waste Manage Res 33, 165-174, 2015
- [17] Demacsek, C., et al., PolyStyreneLoop – The circular economy in action, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 323, 2019
- [18] TÜV Rheinland, Life Cycle Assessment for End of Life Treatment of Expandable Polystyrene (EPS) from External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS), 2017