

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# **Schlussbericht**

**zum BMBF-Verbundvorhaben**

**„KUBA – Nachhaltige Kunststoffwertschöpfungskette:  
Pilotfall Kunststoffe in Bauwirtschaft und Gebäuden“**

Laufzeit: 01.12.2018 – 31.10.2020

FKZ: 033R214A-F

## Inhalt

<b>Autoren .....</b>	<b>2</b>
<b>I. Kurze Darstellung.....</b>	<b>3</b>
<b>II. Eingehende Darstellung.....</b>	<b>16</b>

### Autoren

- Laura Bergs, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
- Kerstin Dobers, Fraunhofer IML
- Alexander Feil, RWTH Aachen - ANTS
- Claas Fricke, FH Münster - IWARU
- Thomas Hülsmann, VinylPlus Deutschland e.V.
- Michaela Koller, DECHEMA e.V.
- Jan-Philip Kopka, Fraunhofer IML
- Stefanie Mohmeyer, BASF SE
- Niklas Netsch, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - ITC
- Michael Ritthoff, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
- Ingo Sartorius, PlasticsEurope Deutschland
- Martin Simons, RWTH Aachen - ANTS
- Dieter Stapf, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - ITC
- Gotthard Walter, FH Münster - IWARU
- Katja Wendler, DECHEMA e.V.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## I. Kurze Darstellung zu

### 1. Aufgabenstellung

Ziel des Verbundvorhabens KUBA war die Entwicklung eines Konzeptes zur nachhaltigen Nutzung von Kunststoffen aus der Bauwirtschaft und Gebäuden im Rahmen eines Circular Economy Ansatzes. Hierfür wurde jeder Abschnitt der Wertschöpfungskette betrachtet und einbezogen – vom Einbau, über die Nutzung bis hin zum Rückbau. Zur Erzeugung von sekundären Rohstoffen, die in die Wirtschaft zurückgeführt werden können, wurden die Erfassungs-/Rückführlogistik, die Abfallwirtschaft, die mechanische Aufbereitung sowie Konversionsverfahren für ein chemisches Recycling, d.h. verfahrenstechnische Umwandlungsprozesse wie etwa Pyrolyse oder Vergasung, betrachtet.

Dabei wird unter dem Begriff „Circular Economy“ ein Ansatz verstanden, dessen Ziel es ist, den Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen innerhalb der Wirtschaft so lange wie möglich zu erhalten und möglichst wenig Abfall zu erzeugen.

Im Verbundprojekt KUBA wurden bisher nicht erfasste, grundlegende Daten zu Kunststoffen im Baubestand, zu Stoffströmen aus dem Baubereich sowie zu Prozessketten hinsichtlich der Erfassung und Sammlung, Rückführlogistik, Vorkonditionierung, Aufbereitung einschließlich Sortierung und Konversion gemischter Bauabfälle für ein chemisches Recycling erhoben und bewertet. Die Versuche zur Vorkonditionierung, Aufbereitung und Konversion wurden exemplarisch mit Wärmedämmverbundsystemen und hier den Referenzmaterialien Polyurethan (PUR)/ Polyisocyanurat (PIR) und expandiertem Polystyrol (EPS)/ extrudiertem Polystyrol (XPS) durchgeführt. Abschließend erfolgte eine grundsätzliche Bewertung der Nachhaltigkeit und der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit der untersuchten Technologien, Prozesse und Verwertungswege. Auch die erlangten grundlegenden Erkenntnisse hinsichtlich der technischen Voraussetzungen (z.B. Aufschluss kunststoffreicher Wärmedämmverbundsysteme, Ausschleusung möglicher enthaltener Verunreinigungen, Erzeugung eines fließ- und förderfähigen Materialstroms) für die mechanische und chemische Verfahrenstechnik wurden in die ökonomischen, ökologischen und rechtlichen Gegebenheiten eingeordnet. Durch die lebenszyklusweite Betrachtung der verschiedenen Verwertungsoptionen konnten die ökologischen und ökonomischen Potenziale sowie mögliche Grenzen ermittelt werden.

Im Sinne des verfolgten ganzheitlichen Ansatzes wurde auch der Einfluss einer entsprechend ausgerichteten Logistik auf die Stoffstromqualität in einer Potenzialanalyse für verschiedene relevante Stoffströme und Logistikansätze untersucht. Dies bildet die Grundlage, damit zukünftig Gesamtsysteme aus Erfassung, Transport, Vorkonditionierung und anschließender spezifischer mechanischer und chemischer Aufbereitung bestmöglich aufeinander abgestimmt werden können und somit das Potenzial von Kunststoffen aus anthropogenen Lagern in der Zukunft ressourceneffizient genutzt werden kann.

### 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

In Deutschland betrug der Verbrauch an verarbeiteten Kunststoffen insgesamt rund 12 Mio. Mg im Jahr 2015 (12,13 Mio. Mg in 2019) [16]. Der Gesamtbedarf für die Verarbeitung betrug in 2019 insgesamt 14,2 Mio. Mg inklusive Primär- und Sekundärware. Davon wurden im Bausektor, dem nach den Verpackungen zweitgrößten Kunststoffanwendungssektor, 2,1 Mio. Mg eingesetzt (2,75 Mio. Mg Primärware bzw. 3,6 Mio. Mg insgesamt in 2019). Wesentliche Kunststoffarten waren hier neben PVC (38%) und Polyolefinen wie PE (19%) und PP (7%) vor allem EPS/XPS (8%) und PUR/PIR

(9%), welche vorwiegend als Dämmstoffe eine bedeutende Rolle einnehmen [16].

Der Hauptgrund für den vielfältigen Einsatz von Kunststoffen im Gebäudebereich liegt in deren technischen Eigenschaften sowie deren Wirtschaftlichkeit. Sie kommen in den verschiedenen Anwendungen sowohl als einzelne Kunststoffart, als Kunststoff- oder als Material-Verbunde zum Einsatz.

Hinsichtlich der in Bauwerken verbauten Kunststoffmengen und -sorten sowie der Art ihres Einbaus bestehen im Grundsatz erhebliche Wissenslücken. Es bestand ein erheblicher Bedarf, diese Informationslücken zu schließen, die zukünftig zu behandelnden Kunststoffabfallströme aus dem Baubereich zu identifizieren und den Bedarf an geeigneten mechanisch/physikalischen wie chemischen Recyclingverfahren abzuschätzen.

Für bestimmte Abfälle wie etwa Altfensterprofile oder ausgebaute Rohre ist das mechanische Recycling etabliert und wird weiterentwickelt. Daneben werden auch eine Reihe von chemischen Recyclingverfahren (z.B. Solvolyse, Pyrolyse und Vergasung von kunststoffreichen Abfallströmen) als Alternativen zur energetischen Verwertung identifiziert, die somit eine weitgehende Kreislaufführung ermöglichen. Für die Kunststoff- und Chemieindustrie sind in diesen Fällen vor allem „Drop-In“ Lösungen von Interesse, die seitens der Rohstoffproduzenten Vorprodukte in der gewohnten Qualität zu wettbewerbsfähigen Konditionen zur Verfügung stellen. Es wurde bisher jedoch noch nicht systematisch untersucht und bewertet, inwieweit konkrete chemische/thermochemische Umwandlungsverfahren für bestimmte Abfallströme geeignet sind und welche Stoffstromvorbereitung erforderlich ist, damit definierte Abfallströme in solche Verfahren eingebracht werden können.

Chemisches Recycling von Kunststoffgemischen, im speziellen von kunststoffhaltigen Bauabfällen, findet aktuell kaum Anwendung. Die verfügbaren Technologien sind an spezifische Einsatzstoffe angepasst, welche nur einen geringen Anteil an Störstoffen enthalten dürfen, um nachgehende Produktspezifikationen einzuhalten oder die technische Realisierbarkeit zu gewährleisten. So sind mineralische und organische Verunreinigungen oder das jüngst nach POP-Verordnung als besonders gefährlich eingestufte HBCD Herausforderungen für solvolytische wie auch mechanisch/physikalische Recyclingverfahren. Daher wird im Moment für Abfallfraktionen mit diesen Inhaltstoffen v.a. der Weg der energetischen Verwertung gewählt. Jedoch gibt es aktuell Projekte, welche an Lösungen für diese Problemstellung arbeiten.

Weiterhin ist im Sinne einer rohstoffeffizienten Kreislaufwirtschaft an eine Verschaltung verschiedener, aneinander angepasster Recyclingtechnologien inklusive deren Schnittstellen zu denken. Dies hat zur Folge, dass mechanisches und chemisches Recycling sowie die energetische Verwertung gekoppelt in einer ganzheitlichen Analyse betrachtet werden müssen, was in bisherigen Studien nur selten untersucht wurde.

Bis dato lagen noch keine belastbaren Daten vor, inwiefern konkrete Verfahren für bestimmte Abfallströme geeignet sind und welche Stoffstromvorbereitung erforderlich ist, damit definierte Abfallströme in entsprechende Verfahren eingebracht werden können. Es existierten noch keine Kenntnisse, welche technologische Tiefe die mechanische Vorbehandlung für eine chemische Verwertung erfüllen muss, welche Wertstoffverluste hierbei in Kauf zu nehmen sind und ob bspw. eine ausreichende Förder- und Fließfähigkeit des Stoffstroms für eine chemische Konversion erzielt werden kann.

Durch die Ermittlung der technologischen Reife (Technology Readiness Level) aussichtsreicher Konversionsverfahren sollte zudem gezielt aufgezeigt werden, welche Entwicklungsbedarfe bis zur Demonstration einer solchen geschlossenen Wertschöpfungskette noch bestehen und an welcher Stelle im Sinne einer Realisierung, z. B. auch bei einer zukünftigen Forschungsförderung, priorisiert werden sollte.

Gründe für die Auswahl des Produkts „Wärmedämmverbundsystem“ war die Tatsache, dass auch

zukünftig, z.B. aufgrund notwendiger energetischer Sanierungen des Wohngebäudebestandes und dem vermehrten Einbau von Verbundmaterialien, mit verhältnismäßig sehr großen Volumenmengen anfallender Bauabfälle gerechnet werden muss, welche – im Gegensatz zum Verpackungsbereich – oft mit hohen Anteilen z.B. an Mineralien verunreinigt sind, was das mechanische Recycling erheblich erschwert.

Die Kunststoffe PUR/PIR und EPS/XPS sind für den Einsatz in Wärmedämmverbundsystemen etablierte Praxis. Für PIR/PUR-Baustoffabfälle sind erste mechanische Recyclingprodukte in der Markteinführung, jedoch eignen sich hierfür keine haushaltsnahen Endverbraucherabfälle, sondern definierte, gewerbliche Endverbraucherabfälle, die etwa aus Verschnittresten bezogen werden, welche bei der Montage von Dämmstoffplatten anfallen. Ein PUR/PIR Abfallrecycling mit mechanischen oder chemischen Recyclingtechnologien ist derzeit noch nicht in großtechnischem Maßstab auf dem Markt etabliert.

Das mechanische Recycling von flammschutzmittelhaltigen EPS/XPS-Bauabfällen ist nur unter bestimmten Bedingungen möglich. Daher werden praktikable Lösungen zur Verwertung benötigt.

Ein Recycling mittels thermochemischer Verfahren (Pyrolyse, Vergasung) wird als Lösung für EPS/XPS und PIR/PUR in der Literatur genannt, aber es gab bisher keine praktische Umsetzung für diese gemischten Kunststoffbauabfälle, die im Regelfall z.B. mit Verklebungen und Putz verunreinigt sind. Mit dem Verbundvorhaben KUBA sollte daher die in der Literatur beschriebene Theorie überprüft, teilweise in der Praxis evaluiert und das Potential für die Steigerung der Recycling-Ziele für diese Art der Abfälle identifiziert werden.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt die grobe Gliederung zum Vorgehen im Projekt, das sich in sechs Arbeitspakete (AP) gliedert.

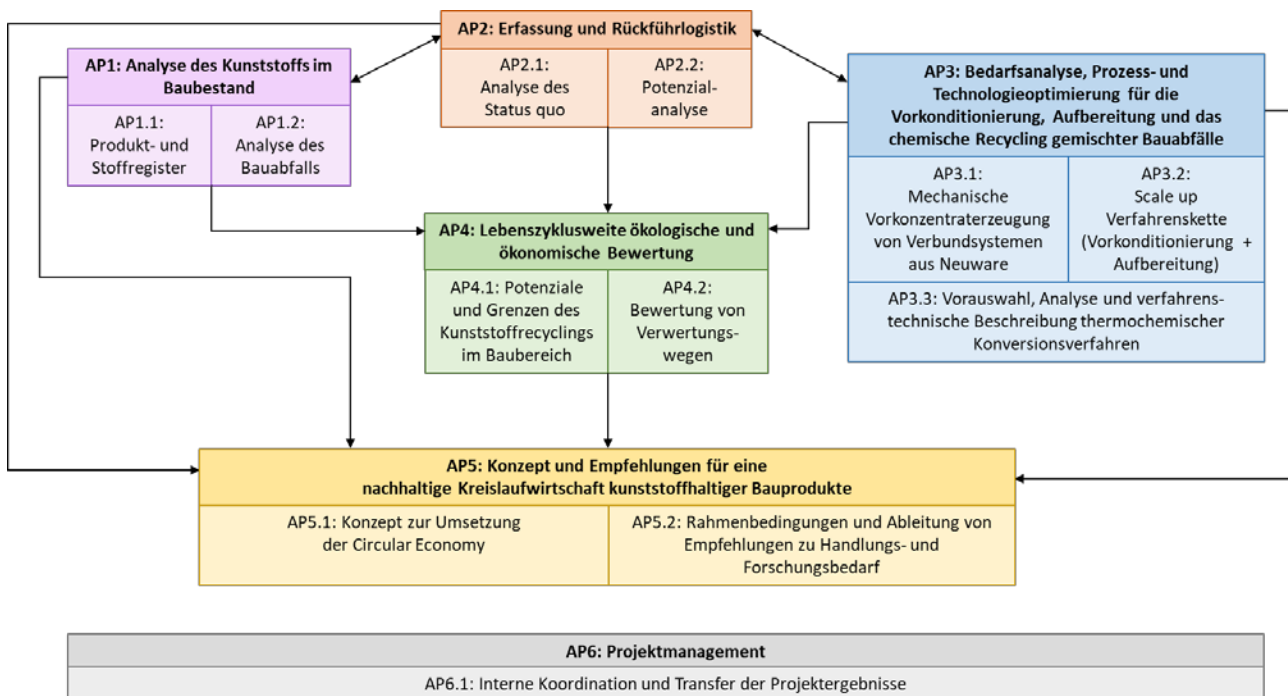


Abbildung 1: Arbeitspakete in KUBA (Quelle: DECHEMA)

### **AP 1: Analyse des Kunststoffs im Baubestand**

Ziel von AP 1.1 war die Erstellung eines Produkt-/ Stoffregisters über die aktuell relevanten Kunststoffmengen im Hoch- und Tiefbau in Deutschland, deren Nutzungs- und Entsorgungszeiträume sowie Aussagen zur Veränderungsdynamik für diese Stoffgruppen. Weiterführend wurde in AP 1.2 eine exemplarische Analyse der in Deutschland aktuell bei Neu-, Um- und Rückbau-Maßnahmen anfallenden Abfallströme mit dem Fokus auf die darin enthaltenen Kunststoffanteile durchgeführt. Die Analyse beinhaltete neben den Aspekten Menge und Qualität (stoffliche Zusammensetzung der verschiedenen Stoffströme) auch die Erhebung der jeweiligen Abläufe bei der Entsorgung und der beteiligten Akteure. Die Erhebung sollte als Grundlage für die Optimierung bestehender Rückführsysteme für relevante Kunststoffströme im Bauabfallbereich dienen, mit dem Ziel, die Wertschöpfung für diese Stoffgruppen zu erhöhen.

### **AP 2: Erfassung und Rückführlogistik**

AP 2.1 fokussierte die Analyse bestehender Lösungen für die Erfassung und Rückführung von Kunststoffen aus Bauabfällen. Es wurden Systeme verschiedener technologischer Reife für verschiedene Materialfraktionen (u.a. auch die in AP 3 untersuchten Stoffströme) und Anwendungen untersucht. Die Recherche umfasste sowohl bereits etablierte Systeme als auch Systeme und Modelle im Forschungs- und Entwicklungsstadium.

Ferner wurden in der Bauwirtschaft etablierte Erfassungs- und Rückführsysteme für Kunststoffanwendungen und andere Fraktionen betrachtet, da hier bereits Strukturen bestehen, die ggf. auf andere Kunststoffanwendungen adaptiert werden können. Im Anschluss wurde eine Potenzialanalyse durchgeführt, deren Ziel die vergleichende Bewertung einer Auswahl der in AP 2.1 identifizierten Logistiksysteme anhand verschiedener Kriterien war, um herauszuarbeiten, welche Systeme als „Best Practice“ für verschiedene Anwendungsfälle geeignet sind bzw. zu solchen weiterentwickelt werden können. Die Potenzialanalyse erfolgte überwiegend generisch (durch Literaturrecherche) und wird nach Möglichkeit mit Untersuchungen untermauert (z.B. Interviews mit Unternehmen, Abbruchunternehmen, Deponiebetreibern, Fuhrunternehmen).

### **AP3: Bedarfsanalyse, Prozess- und Technologieoptimierung für die Vorkonditionierung, Aufbereitung und das chemische Recycling gemischter Bauabfälle**

Hauptaugenmerk in AP 3.1 war es, die Möglichkeiten und Grenzen der im Bauschuttbereich verwendeten konventionellen Prozesstechnik, d.h. Aufschlusszerkleinerung und Siebklassierung, für Wärmedämmverbundsysteme als Voraussetzung für nachfolgende, konversionsangepasste aufbereitungstechnische Maßnahmen in AP 3.2 zu identifizieren. In AP 3.2. wurde die gesamte mechanische Verfahrenskette für in AP 3.1 verarbeiteten Wärmedämmverbundsysteme untersucht und technologisch bewertet. Dabei wurde der zusätzliche technologische Aufwand quantifiziert, der erforderlich war, um Vorkonzentrate aus AP 3.1 aufbereitungstechnisch so zu modifizieren, dass die erforderlichen Qualitätsvorgaben aus AP 3.3 (z.B. Produktreinheit) sowie physikalische Anforderungen an die Chargierfähigkeit eingehalten werden können. Ziel von AP 3.3 war die Identifikation potenzieller Routen des chemischen Recyclings mittels thermochemischer Verfahren in Abhängigkeit von Einsatzstoff- und Produktanforderungen, sowie verfügbarer Technologien und deren Reife. Darüber hinaus wurden charakteristische Kenngrößen der identifizierten Recyclingwege für eine nachfolgende Bewertung ermittelt.

#### **AP 4: Lebenszyklusweite ökologische und ökonomische Bewertung**

Hierzu wurde in AP 4.1 zunächst eine Übersicht über den derzeitigen Stand der ökologischen und ökonomischen Bewertung von mechanischem Recycling, chemischem Recycling und energetischer Verwertung von mengenmäßig relevanten Kunststoffen erstellt, einschließlich der wesentlichen Faktoren, die jeweils ihren Einsatz begünstigen oder limitieren.

Auf der Grundlage von AP 2 sowie dem in AP 1.1 entwickelten Stoff- und Produktregister wurden die in AP 4.1 beschriebenen Verwertungswege ökologisch und ökonomisch bewertet. Ziel war es, sowohl die Relevanz des Recyclings von Kunststoffen im Baubereich insgesamt, aber auch getrennt für wichtige Werkstoffe und Anwendungen einzuschätzen und Potenziale und Grenzen für die konkreten Verwertungswege zu ermitteln.

#### **AP 5: Konzept und Empfehlungen für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft kunststoffhaltiger Bauprodukte**

Ziel von AP 5.1 war die Erstellung eines Konzepts für eine nachhaltige Kreislaufführung von kunststoffhaltigen Bauabfällen mit besonderem Fokus auf der Kreislaufführung mittels chemischem Recycling. Für die Analyse und Darstellung des Status quo der einzelnen Abschnitte der Wertschöpfungskette kunststoffhaltiger Bauprodukte bei Herstellung, Anwendung und Entsorgung wurde auf die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 1–4 zurückgegriffen. Hier erfolgten die Beschreibung der Kunststoffe bzw. kunststoffhaltigen Abfallströme im Baubestand und Bauabfall (AP 1), deren Erfassung und Rückführung (AP 2), Untersuchungen zu Aufbereitungs- und Konversionsprozessen und dabei jeweils notwendiger Spezifikationen (AP 3) sowie eine lebenszyklusbasierte, ökologische und ökonomische Nachhaltigkeitsbewertung (AP 4). Weiterführend wurden in das Konzept die bestehenden Rahmenbedingungen (rechtlicher Rahmen und politische Entwicklungen) – auch im Hinblick auf mögliche, in den kunststoffhaltigen Bauabfällen enthaltene Verunreinigungen und Störstoffe – integriert; weiterführend flossen die Erkenntnisse und Rückmeldungen aus dem in AP 5.1 durchgeführten Stakeholder-Workshop in die Erarbeitung von Empfehlungen zur Optimierung der Kreislaufwirtschaft von Kunststoffbauteilen im Baubereich ein.

#### **AP 6: Projektmanagement**

Im Rahmen von AP 6 erfolgte die Abstimmung der Arbeiten zwischen den Arbeitspaketen. Es wurden Projekttreffen und –telefonkonferenzen mit den Projektpartnern organisiert sowie die administrative Koordination in Form von Kommunikation mit dem Fördermittelgeber und dem Controlling von Zeitplan und Budget durchgeführt.

### **4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere**

#### **4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

Nachfolgende Angaben zu bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechten, die zur Vorhabensdurchführung verwendet wurden, gliedern sich nach Arbeitspaket und Partner.

### **AP 1: FH Münster, IWARU**

Es wurden bei der Vorhabensdurchführung keine schutzrechtsrelevanten Konstruktionen, Verfahren verwendet/ angewendet.

### **AP 3.1 und AP 3.2: RWTH Aachen University, ANTS**

Die aufbereitungstechnischen Untersuchungen (Zerkleinerung-, Klassier- und Sortiersversuche) der AP 3.1 und AP 3.2 wurden mit handelsüblichen Aggregaten durchgeführt.

### **AP 3.3: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen zur Pyrolyse im Technikumsmaßstab wurde eine am KIT entwickelte Konstruktion eines Schneckenreaktors eingesetzt. Diese Konstruktion aus Schneckenreaktor mit integrierter Produktauftrennung durch Heißgasfiltration ist patentrechtlich geschützt („Pyrolysereaktor und Verfahren zur Erzeugung von hochwertigen partikelfreien Pyrolyse- und Synthesegasen“, Kennzeichnung EP2622048A1).

### **AP 4: Wuppertal Institut**

Für die Durchführung der ökologischen Bewertung wurde auf die Datenbank ecoinvent 3.6 zurückgegriffen.

## **4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste**

Nachfolgend werden die für die Projektarbeit verwendete Fachliteratur sowie andere Dienste genannt, aufgelistet nach Arbeitspaket und Partner.

### **AP 1: FH Münster, IWARU**

- [1] Bergmann, Thomas; Bleher, Daniel; Jenseit, Wolfgang (2015): Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau. Materialaufwendungen und technische Lösungen. Hg. v. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE). Online verfügbar unter [https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/studien/Studie\\_Ressourceneffizienzpotenziale\\_im\\_Tiefbau.pdf](https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/Studie_Ressourceneffizienzpotenziale_im_Tiefbau.pdf). Letzter Zugriff am 16.11.2020.
- [2] BKI Kostenplaner 2020, <https://bki.de/>. Letzter Zugriff am 16.11.2020.
- [3] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hg.) (2016): Datenbasis zum Gebäudedestand. Zur Notwendigkeit eines besseren Informationsstandes über die Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland. Bonn. Online verfügbar unter [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2016/ak-09-2016-dl.pdf;jsessionid=E91D32E66602E9833CF96AD5DBE8116B.live11292?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2016/ak-09-2016-dl.pdf;jsessionid=E91D32E66602E9833CF96AD5DBE8116B.live11292?__blob=publicationFile&v=1). Letzter Zugriff am 16.11.2020.
- [4] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hg.) (2017): Zukunft Bauen – Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Unter Mitarbeit von Clemens Deilmann, Jan Reichenbach, Norbert Krauß und Karin Gruhler. Bonn. Online verfügbar unter [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2017/band-06-dl.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2017/band-06-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=1). Letzter Zugriff am 16.11.2020.



- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.) (2020): Erdgasversorgung in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/gas-erdgasversorgung-in-deutschland.html>. Letzter Zugriff am 03.03.2020.
- [6] Destatis Fortschreibung des Wohngebäude- und Wohnungsbestandes, [https://www.destatis.de/DE/Home/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Home/_inhalt.html). Letzter Zugriff am 27.04.2020.
- [7] Deutsche Bahn (Hg.) (2019): Betriebslänge des Schienennetzes der Deutsche Bahn AG in Deutschland bis 2018. Online verfügbar unter <https://www.deutschebahn.com/resource/blob/4045194/462384b76cf49fe8ec715f41e4a3202a/19-03-IB-data.pdf>. Letzter Zugriff am 25.03.2020.
- [8] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.) (2016): Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. dena-Gebäudereport. Unter Mitarbeit von Uwe Bigalke, Aline Armbruster, Franziska Lukas, Oliver Krieger, Cornelia Schuch und Jan Kunde. Berlin (2016). Online verfügbar unter [https://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/8162\\_dena-Gebaeudereport.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/8162_dena-Gebaeudereport.pdf). Letzter Zugriff am 16.11.2020.
- [9] Gruhler, Karin; Deilmann, Clemens (2015): Materialaufwand von Nichtwohngebäuden – Teil I. Verfahrensschritte zur Abbildung der Ressourceninanspruchnahme des Nichtwohnbau-Bestandes. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Reihe Wissenschaft). ISBN: 978-3-8167-9536-0.
- [10] Schiller et al. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft, UBA Texte 83/2015. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_83\\_2015\\_kartierung\\_des\\_anthropogenen\\_lagers.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_83_2015_kartierung_des_anthropogenen_lagers.pdf). Letzter Zugriff am 16.11.2020.
- [11] Soeren Steger, Miriam Fekkak, Stefan Bringezu (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. ISSN 1867-0237.
- [12] Conversio (Hg.) (2017): Aufkommen und Management von EPS- und XPS-Abfällen in Deutschland 2016 in den Bereichen Verpackung und Bau. Abschlussbericht. Hg. v. Conversio Market & Strategy GmbH. Im Auftrag von BKV GmbH. Online verfügbar unter [www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html](http://www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html). Letzter Zugriff 12.11.2020.
- [13] Conversio (Hg.) (2018): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017. Kurzfassung. Hg. v. Conversio Market & Strategy GmbH. Online verfügbar unter [www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html](http://www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html). Letzter Zugriff 12.11.2020.
- [14] Conversio (Hg.) (2018): Post-Consumer PU Plastics Analysis. PU Waste Generation and Waste Management in Europe – Volumes, Waste Streams, Actors along the Value Chain and Conditions System Analysis for Selected Products. Final Revision. Hg. v. Conversio Market & Strategy GmbH.
- [15] Conversio (Hg.) (2018): Analyse der PVC-Produktion, Verarbeitungs-, Abfall- und Verwertungsströme in Deutschland 2017. Bericht. Hg. v. Conversio Market & Strategy GmbH. Im Auftrag von PlasticsEurope Deutschland und Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt (AGPU).
- [16] Conversio (Hg.) (2020): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. Langfassung. Hg. v. Conversio Market & Strategy GmbH. Online verfügbar unter [www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html](http://www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html). Letzter Zugriff 16.02.2021.
- [17] Albrecht, Wolfgang; Schwitalla, Christoph (2015): 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. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. (Forschungsinitiative ZukunftBau F, 2932).
- [18] Auskunft von Herrn Resende, Covestro Deutschland AG, am 30.01.2020
- [19] Auskunft von Herrn Hülsmann, Arbeitsgemeinschaft PVC und UMWELT e.V., am 03.07.2020

- [20] Rewindo (2019): Kunststoffensterrecycling in Zahlen 2019. Online verfügbar unter <https://rewindo.de/in-fomaterial/>. Letzter Zugriff am 16.11.2020.
- [21] Conversio (Hg.) (2020): Waste generation, waste streams and recycling potentials of HBCD-containing EPS/XPS waste in Europe and forecast model up to 2050. Final Report. Hg. v. Conversio Market & Strategy GmbH. Im Auftrag von BASF SE.
- [22] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (2019): Vollzugshinweise zur Gewerbeabfallverordnung. LAGA 34. Online verfügbar unter: [https://www.laga-online.de/documents/m34\\_vollzugshinweise\\_ge-wabfv\\_endfassung\\_11022019\\_inh-red\\_aenderung\\_1554388381.pdf](https://www.laga-online.de/documents/m34_vollzugshinweise_ge-wabfv_endfassung_11022019_inh-red_aenderung_1554388381.pdf). Letzter Zugriff am 16.11.2020.
- [23] DENA (2017): Neuer Impuls für mehr Klimaschutz im Wärmemarkt. Online verfügbar unter [https://www.dena.de/fileadm\\_in/dena/Dokumente/Meldungen/Neuer\\_Impuls\\_fuer\\_mehr\\_Klimaschutz\\_im\\_Waermemarkt.pdf](https://www.dena.de/fileadm_in/dena/Dokumente/Meldungen/Neuer_Impuls_fuer_mehr_Klimaschutz_im_Waermemarkt.pdf). Letzter Zugriff am 13.11.2020.
- [24] Bvse (2019): Umfrage sieht Entsorgungsbranche am Limit. Online verfügbar unter <https://www.bvse.de/recycling/pressemitteilungen/5112-umfrage-sieht-entsorgungsbranche-am-limit.html>. Letzter Zugriff am 13.11.2020.
- [25] Kreibe, S.; Schönemann, M.; Martin, A.: (2020): Entsorgung gemischter Gewerbeabfälle in Bayern. bifa-Text 69. ISSN 0944-5935.

## AP 2: Fraunhofer IML

- [1] COLLECTORS Consortium (Hrsg.): about COLLECTORS. URL: <https://www.collectors2020.eu/the-project/about-collectors/>, Abruf am 21.11.2020
- [2] van Leuuvwen, T.; Siebenlist, M.; Alnaja, S.; Hardjopawiro: COLLECTORS: Work Package 3: Quantification of costs and benefits. URL: [https://www.collectors2020.eu/wp-content/uploads/2020/04/Deliverable3.2\\_COLLECTORS-project-1.pdf](https://www.collectors2020.eu/wp-content/uploads/2020/04/Deliverable3.2_COLLECTORS-project-1.pdf), Abruf am 21.11.2020
- [3] AgPR Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling (Hg.) (o. J.): PVC-Bodenbelag-Recycling. Online verfügbar unter <http://www.agpr.de/cms/website.php?id=de/recycling-ueberblick.htm&nid=1&nidsub=1>, zuletzt geprüft am 10.03.2020.
- [4] DIN (2017): Kommunale Dienstleistungen. Abfall- und Wertstoffwirtschaft. 1. Auflage, Stand der abgedruckten Normen: Mai 2017. Berlin: Beuth Verlag (DIN-Taschenbuch, v.172).
- [5] Günther, Marko (2005): Methoden zur Ermittlung von Kennzahlen. In: Müll und Abfall (7), S. 350–353.
- [6] Jakob, Dr. George (1997): Baustellenabfall - Entsorgungslogistik. In: Müll und Abfall (8), S. 479–485.
- [7] Kranert, Martin (2010): Einführung in die Abfallwirtschaft. 4. Aufl. Hg. v. Klaus Cord-Landwehr. Wiesbaden.
- [8] Lai, Ying-Ying; Yeh, Li-Hsu; Chen, Ping-Fu; Sung, Po-Hsun; Lee, Yuh-Ming (2016): Management and Recycling of Construction Waste in Taiwan. In: Procedia Environmental Sciences 35, S. 723–730. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.07.077.
- [9] Landratsamt Kitzingen (Hg.) (2020): Abfälle am Bau. Der umfassende Ratgeber zur Verwertung und Entsorgung von Bauabfällen.
- [10] Sapuay, S. E. (2016): Construction Waste – Potentials and Constraints. In: Procedia Environmental Sciences 35, S. 714–722. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.07.074.
- [11] Toth, Zita (2007): Kennzahlen zur Unterstützung der Planung und Optimierung der Entsorgungslogistik. Universität Rostock, Rostock.
- [12] Weimann, Karin; Matyschik, Jan; Adam, Christian; Schulz, Tabea; Linß, Elske; Müller, Anette (2013): Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. Hg. v. Umweltbundesamt.

### AP 3.1 und AP 3.2: RWTH Aachen University, ANTS

- [1] Pretz, T.; Feil, A. & Julius, J. (2017): Aufbereitung fester Abfallstoffe, in Kranter, Martin (Hg.): Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 189-253.
- [2] Albrecht, W.; Schwitalla, C. (2015): Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS: Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des WDVS nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf des Dämmstoffs bzw. Downcycling in der Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau 2932)

### AP 3.3: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

- [1] D. Stapf, H. Seifert und M. Wexler (2019): Thermische Verfahren zur rohstofflichen Verwertung kunststoffhaltiger Abfälle; In: *Energie aus Abfall* (16), S. 357-375, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin, ISBN 978-3-944310-45-9.
- [2] Lechleitner, D. Schwabl, T. Schubert, M. Bauer, M. Lehner (2020): Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote; *Österr Wasser- und Abfallw* 72, S. 47-60.
- [3] N. Netsch, F. Richter, S.P. Yogish, M. Zeller, D. Stapf (2020): Chemisches Recycling kunststoffhaltiger Abfälle – Das Potenzial der Pyrolyse; *Chemie Ingenieur Technik* 92(9), S. 1260. DOI: 10.1002/cite.202055383.

Die Vergasung ist als thermochemischer Umwandlungsprozess in zwei der drei identifizierten Recyclingketten enthalten. Die Daten zur technoökonomischen und -ökologischen Bilanzierung basieren auf Berechnungen, die mit Hilfe der Simulationssoftware EBSILON Professional des Unternehmens Steag Energy Service durchgeführt wurden.

Die unter 4.1 genannte Pyrolyseanlage wurde im Rahmen eines durch den Verband der Chemischen Industrie e.V. und PlasticsEurope Deutschland e.V. geförderten Grundlagenprojekts zum chemischen Recycling gemischter Kunststoffabfälle eingesetzt, in dessen Rahmen die im AP 3.1 von RWTH erzeugten Vorkonzentrate nach Aufbereitung durch das KIT pyrolysiert wurden. Die daraus ermittelten Bilanzen für Masse und Energie wurden diesem Projekt bereitgestellt, sodass der Pyrolysepfad für EPS- und XPS-basierte Dämmstoffe erstmals bewertet werden konnte.

### AP 4: Wuppertal Institut

- [1] Arena, U., Mastellone, M. L., Perugini, F. (2003): Life Cycle Assessment of a Plastic Packaging CONVERSIO Market & Strategy GmbH - Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019, Stand 08/2020 Recycling System. LCA Case Studies
- [2] Bittner, Muna; Michaeli, Walter; Menges, Johannes (1995): Die Wiederverwertung von Kunststoffen. Carl Hanser Verlag München Wien
- [3] CreaCycle GmbH (2014): Recycling von expandiertem Polystyrol (EPS) – Transportkosteneinsparung durch Auflösen. URL: <http://www.creacycle.de/de/projekte/recycling-von-expandiertem-polystyrol-eps/9-transportkosteneinsparung-durch-aufoesen.html>, abgerufen am 23.01.2014
- [4] Dechantsreiter, Ute; Horst, Peter; Mettke, Angelika; Asmus, Stefan; Schmidt, Stephanie; Knappe, Florian; Reinhardt, Joachim; Theis, Stefanie; Lau, Jens Jürgen (2015): Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertiger Verwertung von Baustoffen. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_93\\_2015\\_wiederverwertung\\_von\\_bauteilen\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_93_2015_wiederverwertung_von_bauteilen_0.pdf)
- [5] Dehoust, Günter; Christiani, Joachim (2012): Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe Sammel- und Verwertungsquoten für Verpackungen und stoffgleiche Nicht- Verpackungen

als Lenkungsinstrument zur Ressourcenschonung. UBA, Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz\\_3711\\_33\\_316\\_verwertungswertstoffe\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3711_33_316_verwertungswertstoffe_bf.pdf)

- [6] ecoinvent Association (2019): ecoinvent 3.6, <https://www.ecoinvent.org/home.html>
- [7] Elsner, Peter; Exerer, Peter; Hirth, Thomas (2008): Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen. Springer Verlag Berlin Heidelberg
- [8] Franke, Matthias; Reh, Katharina; Hense Peter (2014): Ökoeffizienz in der Kunststoffverwertung. Kapitel 6, [http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2014\\_rur/2014\\_RuR\\_351\\_370\\_Franke.pdf](http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2014_rur/2014_RuR_351_370_Franke.pdf)
- [9] Heyde, Michael (2009): Ökologischer Vergleich der stofflichen und thermischen Verwertung von Kunststoffverpackungsabfällen unter verschiedenen Randbedingungen. Dialogforum Kreislaufwirtschaft. [https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/abfallpolitik/nabu\\_heyde.pdf](https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/abfallpolitik/nabu_heyde.pdf)
- [10] Heyde, Michael; Kremer, Markus (1999): Recycling and Recovery of Plastics from Packagings in Domestic Waste – LCA-type Analysis of Different Strategies. Fraunhofer Institut Verfahrenstechnik und Verpackung.
- [11] Huckstein, Brigitte; Plesnivý, Thomas (2000): Möglichkeiten und Grenzen des Kunststoffrecyclings. Umweltchemie. [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1521-3781\(200010\)34:5%3C276::AID-CIUZ276%3E3.0.CO;2-Q](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1521-3781(200010)34:5%3C276::AID-CIUZ276%3E3.0.CO;2-Q)
- [12] Kägi, Thomas; Dinkel, Fredy (2015): Ökobilanz KS Verwertung in DE - Vergleich stoffliches Recycling mit thermischer Verwertung in einer MVA oder Zementwerk. Carbotech. <http://docplayer.org/29818366-Oekobilanz-ks-verwertung-in-de-vergleich-stoffliches-recycling-mit-thermischer-verwertung-in-einer-mva-oder-zementwerk.html>
- [13] Kasser, Ueli (Büro für Umweltchemie, Zürich): dämmstoff-spider ([www.daemmstoff-spider.ch](http://www.daemmstoff-spider.ch)), Zürich 2009
- [14] Leisewitz, André; Kruse, Hermann; Schramm, Engelbert (2001) Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel, UBA-Texte 25/01, 26/01, 27/01, Berlin 2001
- [15] Lepper, Peter, Herrchen, Monika, Müller, Martin (April 2000): Ökobilanzieller Vergleich der energetischen Verwertung von Kunststoffen mit Verfahren des rohstofflichen Recyclings für den Raum Mannheim/Ludwigshafen. Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie (IUCT) und Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI)
- [16] Martens, Hans; Goldmann, Daniel (2016): Recyclingtechnik - Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Auflage, Springer, Wiesbaden
- [17] Mötzl, H., Zelger, T. (Hrsg.: IBO - Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie, Donau-Universität Krems, Zentrum für Bauen und Umwelt): Ökologie der Dämmstoffe, Wien 2000
- [18] Nürrenbach, Till; Menner, Michael; Ramsel, Florian; Weber-Blaschke, Gabriele; Faulstich Martin(2002): Energetische Verwertung von Mischkunststoffen in bayerischen Müllverbrennungsanlagen: Ökologischer und ökonomischer Vergleich mit Verfahren zur stofflichen Verwertung. Müll und Abfall, <https://www.muellundabfall.de/ce/oekologischer-und-oekonomischer-vergleich-mit-verfahren-zur-stofflichen-verwertung/detail.html>
- [19] Patel, Martin; von Thienen, Norbert; Jochem, Eberhard; Worrell, Ernst (1999): Recycling of plastics in Germany, Resources, Conservation and Recycling, Volume 29, Issues 1–2, May 2000, Pages 65–90. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(99\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(99)00058-0)
- [20] Perugini, Floriana; Mastellone, Maria Laura; Arena; Umberto (2005): A Life Cycle Assessment of Mechanical and Feedstock Recycling Options for Management of Plastic Packaging Wastes. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ep.10078>
- [21] Pfennig, Lucas; Kuchta, Kerstin (2016): Kunststoffrecycling aus der Perspektive einer modernen Ressourcenwirtschaft, [https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR9/2016\\_RuR\\_513-522\\_Kuchta](https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR9/2016_RuR_513-522_Kuchta)

- [22] Schalles, Helmut (2014): Die stoffliche und energetische Nutzung von Kunststoffabfällen. Vortrag an den 9. Schweriner Wissenschaftstagen, 10.09.2004. [https://www.sammelsack.ch/images/stoffliche\\_und\\_energetische\\_Nutzung\\_von\\_Kunststoffabfallen.pdf](https://www.sammelsack.ch/images/stoffliche_und_energetische_Nutzung_von_Kunststoffabfallen.pdf)
- [23] Umweltbundesamt (2008): Bromierte Flammschutzmittel - Schutzengel mit schlechten Eigenschaften?; Presseinformation 020/2008; Berlin
- [24] Waltjen, Tobias (Hrsg. IBO - Österreichisches Institut für Baubiologie) (2004): Hochbaukonstruktionen und Baustoffe für hochwärmegedämmte Gebäude, Wien
- [25] Wollny, Volrad; Dehoust, Günter; Fritsche, Uwe R.; Weinem Peter (2008): Comparison of Plastic Packaging Waste Management Options Feedstock Recycling versus Energy Recovery in Germany, Journal of Industrial Ecology, <https://doi.org/10.1162/108819801760049468>

#### **AP 5: DECHEMA e.V.**

- [1] Bergmann et al. (2015): Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau – Materialaufwendungen und technische Lösungen
- [2] Consultic (2016): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015. Studie der Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH
- [3] CONVERSIO (2017): Studie “Post-Consumer Plastic Waste Management in European Countries 2016 - EU 28+2 Countries”
- [4] Conversio (Hg.) (2020): Waste generation, waste streams and recycling potentials of HBCD-containing EPS/XPS waste in Europe and forecast model up to 2050. Final Report. Hg. v. Conversio Market & Strategy GmbH. Im Auftrag von BASF SE.
- [5] CONVERSIO Market & Strategy GmbH (2020): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019
- [6] DENA (2017): Neuer Impuls für mehr Klimaschutz im Wärmemarkt. Online verfügbar unter [https://www.dena.de/fileadm, in/dena/Dokumente/Meldungen/Neuer\\_Impuls\\_fuer\\_mehr\\_Klimaschutz\\_im\\_Waermemarkt.pdf](https://www.dena.de/fileadm, in/dena/Dokumente/Meldungen/Neuer_Impuls_fuer_mehr_Klimaschutz_im_Waermemarkt.pdf). Letzter Zugriff am 13.11.2020. <https://polystyreneloop.eu/technology/>, letzter Zugriff am 05.08.2020
- [7] Destatis Fortschreibung des Wohngebäude- und Wohnungsbestandes, [https://www.destatis.de/DE/Home/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Home/_inhalt.html), letzter Zugriff 27.04.2020
- [8] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.) (2016): Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. dena-Gebäudereport. Unter Mitarbeit von Uwe Bigalke, Aline Armbruster, Franziska Lukas, Oliver Krieger, Cornelia Schuch und Jan Kunde. Berlin (2016). Online verfügbar unter [https://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/8162\\_dena-Gebaedereport.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/8162_dena-Gebaedereport.pdf). Letzter Zugriff am 16.11.2020.
- [9] EC Communication (2015) “Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy”, COM(2015) 614 final
- [10] EC Communication (2020) "A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives", COM(2020) 662 final
- [11] Gruhler, K.; Deilmann, C. (2015): Materialaufwand von Nichtwohngebäuden - Teil I. Verfahrensschritte zur Abbildung der Ressourceninanspruchnahme des Nichtwohnbau-Bestandes. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Reihe Wissenschaft).
- [12] <https://www.baulinks.de/webplugin/2020/0159.php4> und [https://daemmt-besser.de/fileadmin/user\\_upload/IVPU\\_Faktenpapier\\_2001\\_Entsorgungsservice\\_ONLINE.pdf?utm\\_source=baulinks&utm\\_campaign=baulinks](https://daemmt-besser.de/fileadmin/user_upload/IVPU_Faktenpapier_2001_Entsorgungsservice_ONLINE.pdf?utm_source=baulinks&utm_campaign=baulinks), letzter Zugriff am 27.04.2020
- [13] [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/erp-rl\\_uebersicht\\_ueber\\_den\\_stand\\_der\\_verabschiedung\\_von\\_durchfuehrungsmassnahmen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/erp-rl_uebersicht_ueber_den_stand_der_verabschiedung_von_durchfuehrungsmassnahmen.pdf), letzter Zugriff am 27.04.2020

- [14] <https://www.wecobis.de/service/lexikon/recycling-lex.html>, letzter Zugriff am 05.08.2020
- [15] Krauß, Norbert (2012): Stand der Gebäudemodernisierung in Deutschland – Unsicherheiten der Hochrechnung. Vortrag im Rahmen der Fachtagung Energetische Aufwertung und Stadtentwicklung (EASE). Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. Dresden. [https://www.ioer.de/fileadmin/internet/Oeffentlichkeitsarbeit/Veranstaltungen\\_2012\\_pdf/WS\\_EASE/Krauss\\_IOER.pdf](https://www.ioer.de/fileadmin/internet/Oeffentlichkeitsarbeit/Veranstaltungen_2012_pdf/WS_EASE/Krauss_IOER.pdf), letzter Zugriff am 28.04.2020
- [16] Mitteilung EC zum Green Deal 2019, S. 11
- [17] Positionspapier PED, VCI (2019) "Chemisches Recycling: Ein zusätzlicher Baustein für nachhaltiges Abfallmanagement und zirkuläre Wirtschaft", [https://www.bayerische-chemieverbaende.de/wp-content/uploads/2019/03/20190322-ped\\_vci\\_positionspapier\\_chemisches\\_recycling.pdf](https://www.bayerische-chemieverbaende.de/wp-content/uploads/2019/03/20190322-ped_vci_positionspapier_chemisches_recycling.pdf)
- [18] Rewindo (2019): Kunststoffensterrecycling in Zahlen 2019. Online verfügbar unter <https://rewindo.de/informaterial/>. Letzter Zugriff am 16.11.2020.
- [19] Schiller et al. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft, UBA Texte 83/2015
- [20] Stapf, D; Seifert, H. & Wexler, M. (2019): Thermische Verfahren zur Rohstofflichen Verwertung kunststoffhaltiger Abfälle. In: Energie aus Abfall (16), S. 357-375, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin, ISBN 978-3-944310-45-9
- [21] Umweltbundesamt (2020): Hintergrundpapier „Chemisches Recycling“, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17\\_hgp\\_chemisches-recycling\\_online.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf)

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

### *Zusammenarbeit innerhalb des KUBA-Projekts:*

Zur Durchführung des Vorhabens hat DECHEMA e.V. als Projektkoordinator die Zusammenarbeit mit folgenden weiteren Projektpartnern in KUBA koordiniert: FH Münster - IWARU, Fraunhofer IML, KIT, RWTH Aachen - I.A.R. (im Rahmen der Neubesetzung des Institutes ab 01.09.2020 erfolgte die Umbenennung in ANTS) und Wuppertal Institut gGmbH. Als assoziierte Partner waren folgende Institutionen involviert: AGPU - Arbeitsgemeinschaft PVC und UMWELT e.V. (ab Februar 2021 VinylPlus Deutschland e.V.), BASF SE, BKV GmbH, bvse-Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V., Covestro Deutschland AG, Deutsche Bauchemie e.V., INEOS Styrolution Group GmbH, PlasticsEurope Deutschland e.V., Sto SE & Co. KGaA, PreZero Kunststoffrecycling GmbH & Co. KG und VCI – Verband der Chemischen Industrie e.V. Die jeweiligen Kompetenzen, relevanten Vorarbeiten und laufenden Aktivitäten aller Partner sind nachfolgend aufgeführt. Für die Arbeiten, die in den jeweiligen Arbeitspaketen von KUBA durchgeführt wurden, war je einer der Projektpartner hauptverantwortlich; weiterführende Interaktionen innerhalb des Projektverbundes sowie nach außen werden im Folgenden in Kürze skizziert.

Die Recherchen und Plausibilitätsprüfungen hinsichtlich der Kunststoffmengen und -qualitäten (AP 1) wurden in enger Zusammenarbeit mit den assoziierten Partnern durchgeführt. Für die Erhebung und Beschreibung der aktuellen Situation im Bauabfallbereich (AP 1.2 und AP 2) erfolgte eine Zusammenarbeit zwischen dem IWARU an der FH Münster und Fraunhofer IML.

Das Fraunhofer IML arbeitete im Rahmen des Projektes mit allen Partnern unterschiedlich intensiv zusammen, Hauptansprechpartner waren die FH Münster (Abstimmung zwischen den Arbeitspaketen 1 und 2 sowie gemeinsame Erhebung von Informationen auf Baustellen) und die DECHEMA hinsichtlich der Erstellung des Konzepts zur Circular Economy. Ferner erfolgte mit dem Wuppertal Institut ein Austausch zur ökologischen Bewertung der Logistikprozesse und mit KIT und ANTS Austausch zum Feedback der entwickelten Supply-Chain-Prozesse. Informationen zum Prozessablauf auf Baustellen hat das Fraunhofer IML insbesondere von PreZero und der AGPU (VinylPlus

Deutschland) erhalten.

Die Zusammenarbeit des ANTS (ehem. I.A.R.) innerhalb des KUBA-Projektes erfolgte vor allem an der Schnittstelle zu AP 3.3. In Zusammenarbeit mit dem KIT wurden die Rahmenbedingungen für die Aufbereitungsziele aus den APs 3.1 und 3.2 ausgearbeitet. Darüber hinaus erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit dem assoziierten Partner Sto SE & Co. KGaA. Die Firma Sto hat dabei insbesondere durch die Bereitstellung von WDVS-Bauprodukten mit baurechtlicher Zulassung sowie von Erfahrungswerten zur Herstellung reproduzierbarer Probekörper wertvolle Unterstützungsarbeit geleistet. Das Wuppertal Institut wurde durch die Bereitstellung von Annahmen zum Energieverbrauch des betrieblichen Aufbereitungsprozesses unterstützt.

Die Arbeiten des KIT werden in Hinblick auf die Schnittstelle zwischen mechanischer Aufbereitung und thermochemischer Konversion in enger Zusammenarbeit mit dem ANTS der RWTH Aachen University durchgeführt. Gleichzeitig ermöglicht der enge Austausch mit den Kollegen des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt und Energie die ökonomische und ökologische Bewertung unter Berücksichtigung technischer Detailfragen.

Die Recyclingroute von polystyrolbasierten WDVS via Pyrolyse hätte anhand der durchgeführten Laborversuche nur bedingt auf einen großskaligen Prozess übertragen werden können. Daher wurden nach der Lieferung des aufbereiteten Vorkonzentrats durch das ANTS Versuche an einer Technikumsanlage zur Ermittlung der Stoff- und Energiebilanzen durchgeführt. Diese Versuche wurden von externen Partnern des KIT, dem Verband der Chemischen Industrie e.V. und PlasticsEurope Deutschland e.V., im Rahmen des Projekts „Bewertungsgrundlagen der Pyrolyse von gemischten Kunststoffabfällen“ bereitgestellt. Die damit erhaltenen Ergebnisse dienen als repräsentative Grundlage zur Skalierung der Prozessketten in AP 3.3, werden aber gleichzeitig im Rahmen des vorhergehend aufgeführten Projekts verwertet.

Für die ökologische und ökonomische Bewertung hat das Wuppertal Institut insbesondere auf Daten und Informationen der RWTH Aachen und des KIT zurückgegriffen. Ergänzende Informationen wurden von BASF SE und der Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt (VinylPlus Deutschland) bereitgestellt.

#### *Zusammenarbeit mit Institutionen außerhalb des KUBA-Projekts:*

Auf nationaler und internationaler Ebene fanden eine inhaltliche Abstimmung bzw. ein informeller Austausch mit verschiedenen Fachgruppen, Institutionen, Initiativen und Behörden statt.

- Es bestand Kontakt zum International Sustainable Chemistry Collaborative Centre (ISC3: <https://www.isc3.org/en/home.html>). Im Rahmen des von ISC3 bearbeiteten Workstreams „Sustainable Building and Living with Focus on Plastics“ nahmen Vertreter des KUBA Projekts (K. Wendler, DECHEMA und T. Hülsmann, AGPU) am 05.12.2018 an einem Roundtable in Frankfurt am Main teil. Zudem wurde für den Bericht zum o.g. Workstream im September 2020 ein Bericht zu den Ergebnissen von KUBA ISC3 zur Verfügung gestellt.
- Im Rahmen des Stakeholder Workshops am 23.01.2020 in Frankfurt am Main fand ein fachlicher Austausch statt mit folgenden Institutionen:
  - Arcadis Germany GmbH
  - Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V.
  - Deutsche Umwelthilfe e.V.
  - Fachvereinigung Extruderschäumstoff (FPX e.V.)
  - Rewindo GmbH
  - Trägerverein Umwelttechnologie-Cluster Bayern e.V.

- Umweltbundesamt
- Zentralverband Deutsches Baugewerbe e.V.
- Zu den Ergebnissen aus KUBA fand ein inhaltlicher Austausch statt mit der Universität Kassel, FB 14 Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen, Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik.
- Auf nationaler Ebene wurden die Ziele und Inhalte des Projekts KUBA den Mitgliedern und Beiräten der DECHEMA-/ProcessNet Fachgruppen „Rohstoffe“ sowie „Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung“ im Rahmen des Jahrestreffens im März 2019 vorgestellt und mit den Experten diskutiert.

## II. Eingehende Darstellung zu

### 6. *der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele,*

#### AP 1: FH Münster, IWARU

##### AP 1 Analyse des Kunststoffes im Baubestand

Das Teilprojekt ist in zwei Unterarbeitspakete aufgeteilt.

Ziel von **AP 1.1** war die Erstellung eines Produkt-/Stoffregisters über die relevanten Kunststoffmengen im Baubereich in Deutschland, deren Nutzungs- und Entsorgungszeiträume sowie Aussagen zur Veränderungsdynamik für diese Stoffgruppen.

##### Vorgehensweise

Basierend auf vorliegenden Untersuchungen, Statistiken und Gesprächen mit relevanten Stakeholdern sowie eigenen Berechnungen wurden die Kunststoffmengen, differenziert für den Hoch- und den Tiefbau, abgeschätzt.

- **Hochbau**

Die Erhebung für den Hochbau konzentrierte sich, in Abstimmung mit dem gesamten KUBA Konsortium, auf den Roh- und Ausbau (ohne die technische Gebäudeausstattung). Dabei wurde bei der Erhebung zwischen **Wohn- und Nichtwohngebäuden** unterschieden.

In Anlehnung an die Vorgehensweise im BMBF-Forschungsprojekt „*Terra Incognita – Der Lauf der Dinge oder Privatbesitz? Ein Haus und seine Objekte zwischen Familienleben, Ressourcenwirtschaft und Museum*“ wurden für den Wohngebäudebereiche synthetische Mustergebäude für unterschiedliche Gebäudetypen (Ein-, Zwei-, Mehrfamilienhaus) in unterschiedlichen baulichen Ausführungen (Holzbauweise, mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS)-Dämmung etc.) konzipiert und dimensioniert. Die Grundlage hierfür waren ca. 300 Gebäude aus Fertighauskatalogen und Online-Portalen, die analysiert wurden und aus denen anschließend basierend auf diesen Daten die Standardgebäude generiert wurden.

Für diese Gebäudetypen wurde in Abhängigkeit der unterschiedlichen Einsatzbereiche/-zwecke der Kunststoffe (z. B. Dampfsperre, Feuchtigkeitsschutz, Fensterprofile) die jeweils verbauten Kunststoffmengen und -qualitäten berechnet. In Kombination mit der in Destatis [6] verfügbaren Wohngebäudeanzahl in Deutschland wurden die 2017 in Wohngebäuden eingesetzten Kunststoffmengen



und -qualitäten abgeschätzt. Die hieraus resultierenden Ergebnisse wurden mit in der Literatur vorliegenden Daten verglichen und gemeinsam mit dem im Verbund beteiligten Projektpartnerunternehmen auf Plausibilität geprüft und bei Bedarf angepasst.

Für den Nichtwohngebäudebereich ist die vorliegende Datenlage deutlich geringer. Der Ansatz, der hier verfolgt wurde, umfasst die Auswertung u. a. folgender Informationsquelle:

- Studie des IÖR<sup>1</sup> „*Materialaufwand von Nichtwohngebäuden Teil 1*“ in Verbindung mit den Nutzflächen Berechnung des Bestandes der Nichtwohngebäude anhand der Bruttoanlagevermögens und der Bautätigkeit von 1997 bis 2010 [9]

Analog zu den Berechnungen bei den Wohngebäuden wurden die vom IÖR mit Hilfe der BKI<sup>2</sup>-Datenbank konzipierten synthetischen Nichtwohngebäude analysiert. Die Nichtwohngebäude wurden nach unterschiedlichen Nutzungsarten differenziert, hinsichtlich der Kunststoffkomponenten in der Bausubstanz, inkl. deren Menge und Qualität, analysiert und darauf basierend die Gesamtmenge an Kunststoffen abgeschätzt.

Auch diese Ergebnisse wurden mit dem Gesamtprojektkonsortium diskutiert und auf Plausibilität geprüft und bei Bedarf angepasst.

- **Tiefbau**

Wesentliche Grundlage für die Erhebungen im Bereich des Tiefbaus war die umfassende VDI<sup>3</sup>-Studie „*Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau*“ aus dem Jahr 2015 [1]. In dieser Studie werden u. a. die Mengenpotenziale unterschiedlicher Materialien für die verschiedenen Sektoren des Tiefbaus (Straße, Schiene, Wasserstraße etc.) erfasst und hinsichtlich ihres Veränderungspotenzials bewertet. Die hierbei zu Grunde gelegten Daten wurden vor dem Hintergrund der im Rahmen des KUBA-Projektes diskutierten Fragestellungen analysiert und unter Einbeziehung weiterer Datenquellen (z. B. [5], [7], [8], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]) und Expertenbefragungen ([18],[19]) auf Plausibilität geprüft, erweitert und für die Berechnung des Kunststoffbestands im Sektor Tiefbau genutzt.

### **Wesentliche Ergebnisse für AP 1.1:**

- Die Gesamtmenge an derzeit im **Wohngebäudebereich** verbauten Kunststoffen wird mit rd. 22 Mio. Mg für das Jahr 2017 abgeschätzt. Hierbei handelt es sich überwiegend (ca. 58 %) um PE-Kunststoffe, die z. B. als Dichtungen im Keller, Dach oder Wandbereich oder als Heizungsrohre, z. B. bei Fußbodenheizungssystemen, eingesetzt werden. Weitere relevante Kunststoffarten sind EPS/XPS (i. W. Dämmung für unterschiedliche Anwendungsfelder) und PVC (z. B. Fenster und Rohre) mit ca. 24 % bzw. ca. 12 % der Gesamtmenge.
- Der überwiegende Anteil dieser Kunststoffmenge (ca. 54 %) befindet sich im Bereich der Einfamilienhäuser, die mit 12,6 Mio. Gebäuden rd. 67 % des Wohngebäudebestandes ausmachen.
- Plausibilitätsprüfungen der ermittelten Mengen anhand der in der Literatur verfügbaren Daten bzw. durch Gespräche mit Stakeholdern im Rahmen des Projektkonsortiums bestätigen bei Kunststoffarten wie EPS und PVC die ermittelten Werte. Für weitere spezifische Kunststoffarten (z. B. PU) wurden gemeinsam mit den am Projekt beteiligten Industrievertretern die berechneten Mengen validiert bzw. entsprechend angepasst.

---

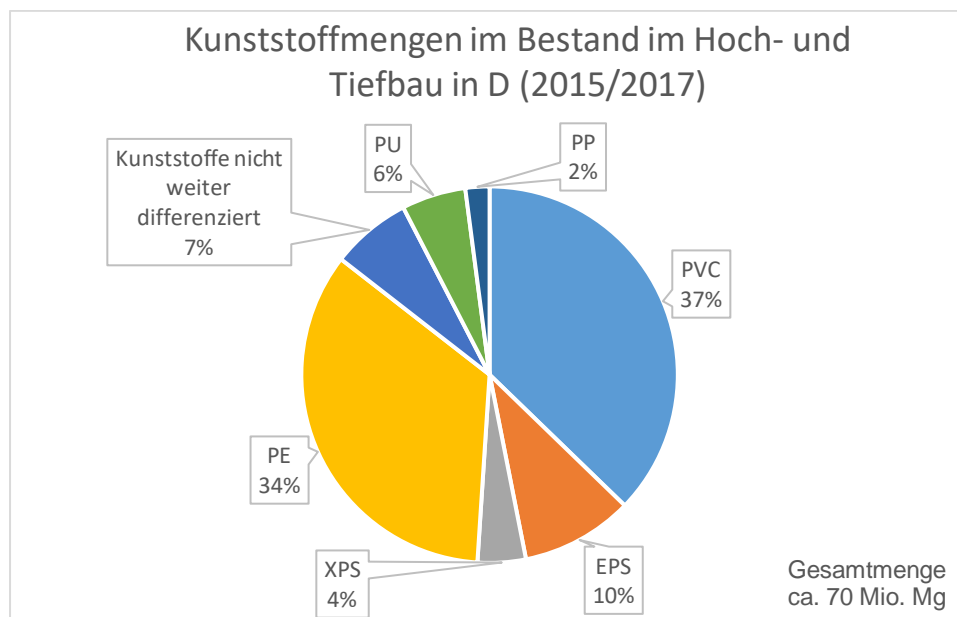
<sup>1</sup> IÖR: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung

<sup>2</sup> BKI: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern

<sup>3</sup> VDI: Verein Deutscher Ingenieure

- Der Kunststoffbestand im deutlich heterogeneren **Nichtwohngebäudebereich** wird auf insgesamt rd. 40 Mio. Mg für 2015 geschätzt. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um die Kunststoffarten EPS/XPS, PE und PVC mit jeweils rund 30 % und zusätzlich um 10 % PUR/PIR. Diese Mengen sind deutlich geringer als die entsprechenden Aussagen in einer Studie für das UBA<sup>4</sup> über das anthropogene Lager in Deutschland [10]. In dieser Studie wird für die gesamte Kunststoffmenge in den Nichtwohngebäuden eine Spannweite von 154 bis 220 Mio. Mg angegeben. Dieser Wert erscheint u. a. bei einem Vergleich mit den für die vergangenen Jahre vorliegenden Produktionszahlen deutlich zu hoch. Dies wurde in Gesprächen mit den jeweiligen Stakeholdern aus dem Projektkonsortium auch ausdrücklich bestätigt [18],[19].
- Die Recherchen über den Kunststoffbestand im **Tiefbau** haben gezeigt, dass die in der analysierten VDI-Studie [1] angegebenen Mengen über die in den verschiedenen Sektoren eingesetzten Kunststoffmengen weitgehend plausibel erscheinen. Lediglich im Bereich der Geotextilien/-kunststoffe sind nach Gesprächen mit Experten deutliche Korrekturen nach unten vorzunehmen. Somit liegt die Gesamtmenge an Kunststoffen im Sektor Tiefbau im Jahr 2015 bei ca. 6 Mio. Mg. Auch hier weisen die Kunststoffe PE und PVC (z. B. als Rohre oder Leitungsummantelungen) mit 41 bzw. 30 % die größten Anteile auf.

Für den Bestand an Kunststoffen in Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie im Tiefbau ergibt sich für Deutschland somit eine **Gesamtmenge von ca. 70 Mio. Mg** (Bezugsjahr 2015 beim Tiefbau und den Nichtwohngebäuden; Bezugsjahr 2017 für den Bereich der Wohngebäude). Die größten Anteile weisen hierbei die Kunststoffe PVC und PE mit 37 % bzw. 34 % auf (siehe Abbildung 2).



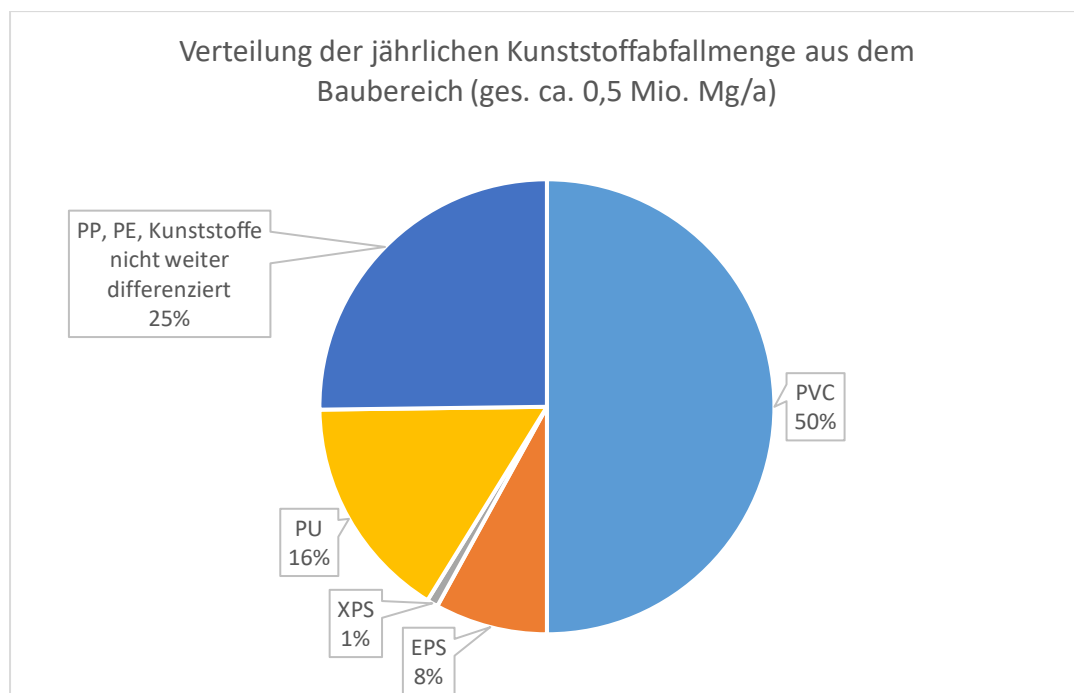
**Abbildung 2: Verteilung der Kunststoffmengen im Bestand im Hoch- und Tiefbau in Deutschland (Quellen: Eigene Berechnungen IWARU, [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19])**

Diese Verteilung deckt sich weitgehend mit den Angaben, die das Unternehmen Conversio in seinen bisherigen Studien über die Kunststoffsituation in Deutschland macht. Conversio erstellt seit einigen Jahren, im Auftrag verschiedener Akteure aus der Kunststoffbranche, regelmäßig Studien über die Kunststoffströme in Deutschland. Diese Studien greifen auf eine valide und differenzierte Datenbasis zurück, die von Seiten der Auftraggeber bereitgestellt wird. Sie geben einen umfassenden Überblick,

<sup>4</sup> UBA: Umweltbundesamt

u.a. über die produzierten und entsorgten Kunststoffmengen in Deutschland. Danach lag der Anteil an produzierten PE- und PVC-Kunststoffen für den Baubereich in den vergangenen Jahren in Deutschland durchgängig im Bereich um jeweils 30 %, so dass aufgrund der Langlebigkeit der hier eingesetzten Bauprodukte (z. B. Trennfolien, Fenster), die in Abbildung 1 dargestellte Verteilung über den Kunststoffbestand in Deutschland plausibel erscheint.

Aktuell fallen laut Conversio [16] in Deutschland jährlich ca. 0,5 Mio. Mg Kunststoffabfälle (siehe Abbildung 3) aus dem Baubereich an. Diese werden zum größten Teil gemischt mit anderen Abfallfraktionen oder über Systeme, wie z. B. Rewindo ([www.rewindo.de](http://www.rewindo.de)) und die Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling ([www.agpr.de](http://www.agpr.de)), getrennt erfasst und recycelt (aktuell werden ca. 30 % der Gesamtmenge mechanisch recycelt). Nach den vorgenommenen Berechnungen haben PVC-Kunststoffe mit ca. 50 % den größten Anteil an der Gesamtabfallmenge.



**Abbildung 3: Verteilung der jährlichen Kunststoffabfallmenge aus dem Baubereich in Deutschland (Quellen: Eigene Berechnungen IWARU, [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19])**

Der Einsatz von Kunststoffen im Baubereich ist in den vergangenen Jahrzehnten aus bautechnischen Gründen, aber auch bedingt durch höhere Anforderungen in den gesetzlichen Vorgaben (z. B. durch die Umsetzung der Energieeinsparverordnung und den damit verbundenen Maßnahmen im Bereich der Wärmedämmung und Fenstersanierungen), stetig gestiegen [8]. Daher wird auch die Gesamtmenge an Kunststoffabfällen aus dem Bausektor mittel- und langfristig sukzessive zunehmen. Auf Grund der z. T. langen Lebensdauern der hier eingesetzten Produkte geschieht dies jedoch mit einer großen zeitlichen Verzögerung.

So war z. B. die installierte Fensterfläche in den 1990er Jahren, als Folge der Wiedervereinigung und den damit verbundenen Investitionen in den neuen Bundesländern, mit 20 bis 30 Mio. m<sup>2</sup> Fensterfläche fast doppelt so hoch wie in den Jahren davor und danach [8]. Es ist davon auszugehen, dass bei einer Nutzungsdauer von etwa 45 Jahren das Abfallaufkommen aus diesem Bereich (aktuell rd. 56.000 Mg/a [20]) in den nächsten 20 Jahren deutlich zunehmen wird. Insbesondere auch der in den vergangenen Jahren zunehmende Einsatz von Wärmedämmverbundsystemen wird dazu führen, dass mittel- und langfristig die jährlich erfasste Menge an EPS weiter ansteigen wird. Vor dem Hintergrund der langen Lebensdauern (z. T. > 40 Jahre) dieser Bauprodukte, zeigen entsprechende

Prognosen, z. B. für EPS, dass die anfallende Menge von derzeit rd. 45.000 Mg/a bis 2050 auf rund 88.000 Mg/a steigen könnte [21].

Faktoren, die diese Entwicklungen maßgeblich mit beeinflussen, sind

- die zukünftige konjunkturelle Entwicklung,
- die tatsächlichen Sanierungs- und Rückbauraten (z. B. bedingt durch gesetzliche Vorgaben, z. B. hinsichtlich Energieeinsparmaßnahmen); aktuell besteht in Deutschland ein erheblicher Sanierungsstau [23].

Ziel von **AP 1.2** war die Beschreibung der aktuellen Situation in Deutschland bei Neu-, Um- und Rückbau-Maßnahmen hinsichtlich der anfallenden Abfallströme mit dem Fokus auf die darin enthaltenen Kunststoffanteile.

### **Vorgehensweise**

Die auf eigenen Erhebungen und Expertengesprächen basierende Analyse beinhaltete neben den Aspekten Menge und Qualität (stoffliche Zusammensetzung der verschiedenen Stoffströme) auch die Ermittlung der beteiligten Akteure und der jeweiligen Abläufe bei der Entsorgung. Die Ergebnisse werden als Grundlage für die Optimierung bestehender und die Entwicklung neuer Rückführsysteme für relevante Kunststoffströme im Bauabfallbereich genutzt (s. a. AP 2), mit dem Ziel, die Wertschöpfung für diese Stoffgruppen zu erhöhen.

### **Wesentliche Ergebnisse für AP 1.2**

Die novellierte Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) von 2017 regelt die Erfassung u. a. von Bau- und Abbruchabfällen und fordert gemäß § 3 Absatz 1 die Getrennthaltung und Erfassung verschiedener Abfallfraktionen an der Anfallstelle, u. a. auch Kunststoffe. Werden Abfälle nicht getrennt erfasst, muss dies nach § 3 Absatz 3 dokumentiert und die fehlende technische Möglichkeit der getrennten Erfassung (z. B. beengte Platzverhältnisse für eine Aufstellung der Abfallbehälter) oder deren wirtschaftliche Unzumutbarkeit begründet werden. Hierzu hat die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) konkretisierende Vollzugshinweise erarbeitet [22]. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Situation bei der Bauabfallentsorgung in Deutschland im Hinblick auf die Kunststoffe aktuell wie folgt dar:

#### **Neubau**

- Die Kunststoffabfallmenge ist eher gering, da insbesondere bei größeren Gebäudekomplexen weitgehend vorkonfektionierte Produkte angeliefert werden.
- Kunststoffabfälle, wie Verpackungen und Verschnittreste, werden weitgehend getrennt erfasst und soweit verfügbar über entsprechende (z. T. herstellereigene) Sammelsysteme aufbereitet und wieder der Produktion zugeführt oder entsorgt.

#### **Sanierung/Rückbau**

- In diesem Segment erfolgt (häufig) keine separate Erfassung der Kunststofffraktionen, da
  - nur geringe Mengen anfallen und damit ein unverhältnismäßig hoher Aufwand für eine getrennte Erfassung besteht,
  - ein z. T. hoher Aufwand für die nach den Vorgaben der Rücknahmesysteme erforderliche Bereitstellung der separat erfassten Menge (z. B. palletiert, verpackt etc.) besteht,
  - eine ungenügende Qualität (durch Verschmutzungen/ Anhaftungen, Additive wie z. B. Flammenschutzmittel) der gewonnenen Fraktionen vorliegt,

- ein hoher technischer Aufwand für eine Separierung der Kunststoffkomponenten aufgrund des Einsatzbereiches der Kunststoffe (z. B. Perimeterdämmung) erforderlich ist
- (kostengünstige) Logistikkonzepte, Aufbereitungs- und Entsorgungsmöglichkeiten für separat erfasste Kunststoffe fehlen.
- Kunststoffe werden über die Fraktion Baumischabfall (AVV 170904) entsorgt; eine weitergehende Aufbereitung/ Separierung der Kunststofffraktionen erfolgt in Abhängigkeit der Qualität des Abfallgemisches.
- Der Fokus der getrennten Erfassung liegt eher auf den mengenrelevanten bzw. wert- und schadstoffhaltigen Fraktionen (u. a. Mineralik, Metalle, teerhaltige Dachbahnen, asbesthaltige Komponenten).
- Sofern Kunststoffe in ausreichender Menge und geeigneter Qualität (s. o.) vorhanden sind, werden Kunststoff-Fraktionen auf der Baustelle separat erfasst: z. B. Fensterprofile, Rohre, Bodenbeläge sowie Kabelkanäle, Deckenverkleidungen, Dachabdichtungsbahnen aus Kunststoff und Dämmmaterialien und über z. T. vorhandene Rücknahmesysteme entsorgt (s. o.)

Es bestehen zurzeit große (regionale) Unterschiede im Vollzug der GewAbfV (z. B. bei Art und Umfang der Kontrollen) aber auch bei administrativen Vorgaben, z. B. hinsichtlich der Vorlage von Rückbaukonzepten und damit verbundener Vorgaben zur getrennten Erfassung bestimmter Fraktionen. Gleichzeitig existiert in einzelnen Regionen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit einer getrennten Erfassung und der notwendigen Aufbereitung für die stofflichen Verwertung eine gewisse Konkurrenzsituation mit der energetischen Verwertung. Es zeichnet sich aber ab, dass aufgrund begrenzter Verbrennungskapazitäten in den Müllverbrennungsanlagen (MVA) sich insbesondere diese Rahmenbedingung kurz- bis mittelfristig verändern wird. So zeigen aktuelle Erhebungen des bvse<sup>5</sup>, dass bereits in einzelnen Entsorgungsregionen erhebliche Engpässe bei der Entsorgung gemischter Gewerbeabfälle in MVA bestehen [24], [25].

Dies wird dazu führen, dass zukünftig die getrennte Erfassung von Kunststoffabfällen wirtschaftlich konkurrenzfähig wird und neue Entsorgungsoptionen für die Fraktionen aufgebaut werden.

## AP 2: Fraunhofer IML

Ziel des Arbeitspaketes „Erfassung und Rückführlogistik“ war die Untersuchung der logistischen Aspekte und Gestaltungsansätze zur Unterstützung der Kreislaufführung von kunststoffhaltigen Abfallfraktionen im Bereich der Bauwirtschaft. Zu diesem Zweck sollte der **Status quo** für verschiedene Unterfraktionen möglichst breit anhand geeigneter Kriterien analysiert werden. Ergänzend zu Systemen aus dem Bereich der Sammlung und Erfassung von Abfällen aus dem Kontext Bauwirtschaft und Gebäude wurden Systeme aus anderen Bereichen wie z. B. der Rücknahme von Elektroaltgeräten und gemischten Fraktionen aus anderen Branchen betrachtet. Auf diese Weise konnten Ansatzpunkte für die Verbesserung der Leistung von Systemen in dem in KUBA fokussierten Bereich identifiziert werden.

Im Rahmen einer **Potenzialanalyse** wurden die Ergebnisse der Analyse des Status quo in ein Interpretationssystem überführt und mittels einer morphologischen Analyse archetypische Systeme herausgearbeitet. Diese Systeme weisen verschiedene in den Recherchen dominierende Merkmalskombinationen auf, die auf entsprechende Vorteile bei der Verknüpfung ebendieser Aspekte innerhalb von Systemen schließen lassen. Ergänzend wurden prototypische Supply Chain-Prozesse de-

---

<sup>5</sup> bvse: Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung

finiert und durch geförderte und assoziierte Partner validiert, um Verwertungsketten für Kunststoffabfälle zu beschreiben und Ansatzpunkte für verschiedene Optimierungsansätze zu identifizieren.

Konkret wurden im Rahmen von **AP 2.1** „Analyse des Status quo“ die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Eine Literaturrecherche zu Sammlungs- und Erfassungssystemen für Kunststoffe und kunststoffhaltige Stoffströme im Bereich von Bau- und Abbruchbaustellen wurde durchgeführt und aus dieser Recherche wurden Ableitungen für Untersuchungsgegenstände zu Systembetrachtungen getroffen.
- Entwicklung und Abstimmung eines Fragebogens zur Datenerhebung, um die zuvor identifizierten Gestaltungsparameter für Systeme mit Daten zu hinterlegen. Der Fragebogen wurde in einer finalen Version über die jeweiligen Netzwerke der KUBA Partner gestreut. Der Rücklauf aus diesen Netzwerken war jedoch überschaubar und häufig unvollständig, sodass beschlossen wurde, die entwickelten Fragebögen als Grundlage für Interviews und Ortsbegehungen auf Baustellen zu nutzen.
- Im Rahmen von Interviews konnten verschiedene, bereits etablierte Systeme genauer untersucht werden, wobei aufgrund der gegenüber den Planungen angepassten Erhebungsmethodik nur wenige Interviews durchgeführt werden konnten.
- Bei der geplanten Erhebung von Informationen auf Baustellen konnte im Projektzeitraum aufgrund langwieriger Terminfindungsprozesse für die Identifikation geeigneter Baustellen und der Anfang 2020 einsetzenden Covid-19-Pandemie nur eine Begehung durchgeführt werden.

Eine Aufbereitung und Zusammenfassung der Ergebnisse führt zu den folgenden Erkenntnissen:

- Getrennterfassung von Kunststoffen im Rahmen von Baumaßnahmen ist abgesehen von der Erfassung von Verpackungsmaterialien unüblich, unabhängig von der Baustellengröße.
- Ein insgesamt geringer Materialwert im Vergleich zu Metallen und ein geringer Masseanteil im Vergleich zu Mineralik führt dazu, dass Kunststoffeffassung kein erheblicher Erlösfaktor bei der Gestaltung von Abbruchmaßnahmen ist und entsprechend auch nicht prioritär behandelt wird.
- Sowohl für Kunststoffe als auch für andere im Rahmen von Baustellen anfallende Fraktionen konnte festgestellt werden: Insgesamt herrscht ein geringer Automatisierungsgrad von Prozessen mit geringer Integration von Informations- und Kommunikationstechnologie vor.
- Existierende Lösungen für die Getrennterfassung von Kunststoffen (Fenster, Rohre) profitieren von geschlossenen Materialkreisläufen und damit einhergehenden Faktoren wie Sicherheit und Planbarkeit der Abnahme von Abfällen und Sekundärmaterialien. Dies scheint eine hohe Erfassungsqualität und damit verbundene organisatorische Aufwände zu ermöglichen und zu bedingen.
- Die Vereinbarkeit der gelebten Praxis mit den rechtlichen Anforderungen der GewAbfV ist unklar, dies wurde im Rahmen von Baustellenbesuch und Interviews auch durch die Gesprächspartner bestätigt. Konkret wird die nach den Vollzugshinweisen zur Gewerbeabfallverordnung eigentlich vorgesehene Getrennterfassung von Kunststoffabfällen nur in Ausnahmen durchgeführt, beispielsweise für Fraktionen, zu denen geschlossene Kreisläufe existieren (Fenster, Rohre) oder wenn ein sehr hohes Kunststoffaufkommen zu erwarten ist (strukturierter Rückbau eines großen Gebäudes). Üblicherweise wird der Kunststoff aufgrund seines geringen Masseanteils als gemischte Fraktion erfasst.

Im untersuchten Bereich findet kaum Umsetzung von Supply Chain-Integration im Sinne eines produktionslogistischen Systems statt, die für eine Kreislaufschließung auf hohem Niveau erforderlich ist. Unter einem produktionslogistischen System ist ein analog zur fertigen der Industrie arbeitendes Logistiksystem zu verstehen, in dem Produkte nachfrageorientiert hergestellt und Materialbedarfe an Vorlieferanten gemeldet werden (Pull-Prinzip). Derartige Systeme sind auf Robustheit und eine diversifizierte Beschaffungsbasis ausgelegt, die langfristige Lieferbeziehungen begünstigt. Im Gegensatz dazu arbeiten Recyclingsysteme häufig inputbasiert und bieten dem Markt das Sekundärmaterial an, das sie momentan oder kurzfristig erzeugen können.

Die Ergebnisse des Arbeitspaketes flossen in die Vorbereitung und Durchführung des im Januar 2020 durchgeführten Stakeholder-Workshops im DECHEMA-Haus in Frankfurt am Main ein, in dessen Rahmen neben anderen Projektthemen auch Erfassung und Rückführlogistik in einer Diskussionsgruppe tiefer mit den Teilnehmern diskutiert werden konnten. Hierbei wurden verschiedene Aspekte gestreift, die auch im Rahmen der Analyse des Status quo bereits identifiziert werden konnten (u. a. Materialqualität und Verknüpfung anschließender Prozesse durch transparente Informationsflüsse). Ferner wurde ein deutlicher Fokus auf den Bereich der Rahmenbedingungen der Kreislaufführung von Kunststoffen gelegt. Hierbei wurden unter anderem die Existenz unzureichender Regelungen und externer Anreize seitens des Marktes und des Gesetzgebers als Hinderungsgründe genannt. Die geringe Werthaltigkeit des Materials wurde auch im Kontext des Stakeholder-Workshops als besondere Herausforderung identifiziert. Hinsichtlich eines Ansatzes zur Verbesserung der Gesamtsituation in der Sammlung und Rückführlogistik wurde ersichtlich, dass diese Herausforderung nicht allein durch organisatorische Verbesserungen adressiert werden kann, sondern darüber hinaus auch externe Anreize, z. B. durch gesetzliche Regelungen oder die Einführung von Pfandsystemen für bestimmte Materialien erforderlich sind, um den höheren Aufwand für die Erfassung und Rückführlogistik zu realisieren.

In **AP 2.2** „Potenzialanalyse“ wurden zur Identifikation von Potenzialen die zuvor identifizierten Gestaltungsparameter als Grundlage verwendet und weitere Parameter zum Vergleich verschiedener Systeme identifiziert. Die Erhebung zur Potenzialanalyse erweiterte das Spektrum betrachteter Systeme um solche, die kunststoffhaltige Fraktionen auch aus anderen Branchen als dem Baubereich erfassen (z. B. aus dem WEEE<sup>6</sup>-Stoffstrom). Insgesamt wurden 80 Systeme analysiert, die 35 Akteuren (z. B. Unternehmen, Gebietskörperschaften) zugeordnet werden konnten. Hierbei handelt es sich neben Erfassungs- auch um freiwillige Rücknahmesysteme im Rahmen der Herstellerverantwortung. Eine Verteilung der Betrachteten Systeme nach ihrem jeweiligen Fokus ist der Abbildung 4 unten entnehmbar. Eine vollständige Aufstellung der untersuchten Systeme kann auf Anfrage vom Fraunhofer IML zur Verfügung gestellt werden.

---

<sup>6</sup> WEEE: Waste of Electrical and Electronic Equipment (Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall)

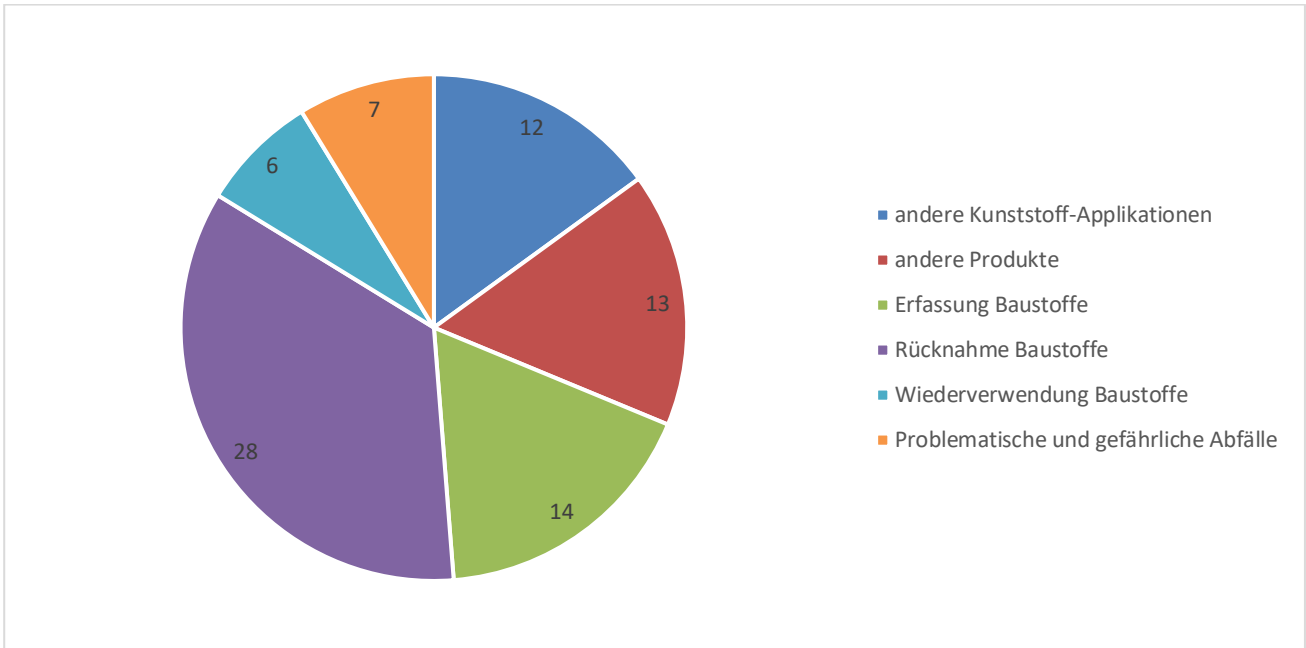


Abbildung 2: Fokus der für die Potenzialanalyse ausgewerteten Systeme (Quelle: Fraunhofer IML)

Konkret wurden in **AP 2.2** „Potenzialanalyse“ die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Recherche zusätzlicher Erfassungs- und Sammlungssysteme mit anderen Materialfokussen sowie Auswertung und Vergleich anhand der bereits zuvor für den Status quo genutzten Merkmale. Hierbei wurde eine darüberhinausgehende Analyse angedacht, allerdings erwiesen sich die recherchierbaren, vorhandenen Systembeschreibungen hierfür als nicht detailliert genug.
- Auswertung und Vergleich der recherchierten Systeme mittels einer morphologischen Analyse zur Identifikation hervorstechender Merkmale und Merkmalskombinationen, die typische Systeme kennzeichnen und Transferpotenziale zu existierenden Systemen der Erfassung und Rückführlogistik aus den Analysen des Status quo erlauben.
- Modellierung generischer Supply Chain Prozesse für eine Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe im Bausektor mittels des Dortmunder Prozessketteninstrumentariums und Validierung der Prozesse durch die geförderten und assoziierten Partner des Projektkonsortiums.

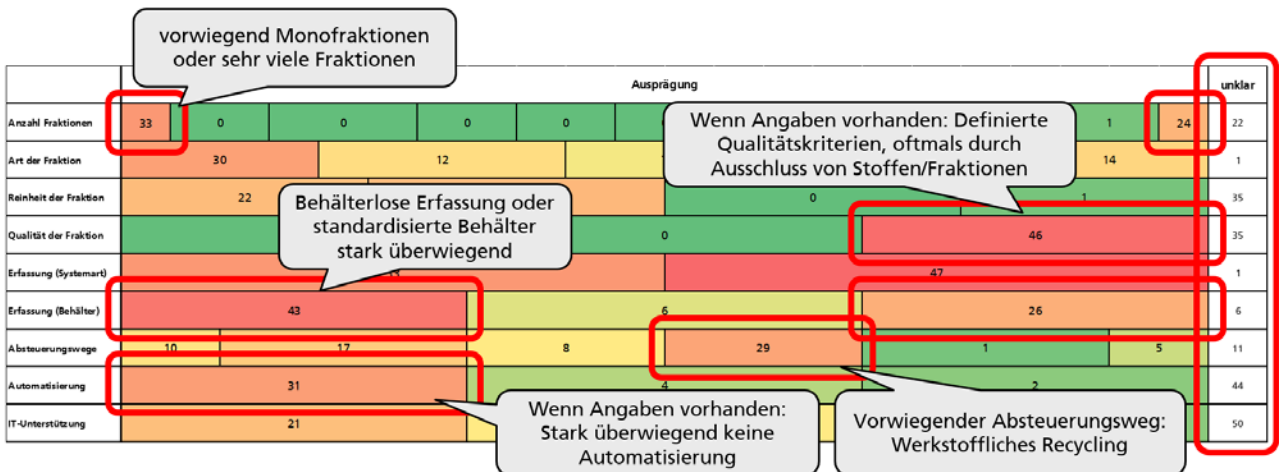


Abbildung 5: Ausgewählte Schlussfolgerungen zur morphologischen Analyse (Quelle: Fraunhofer IML)



Folgende Erkenntnisse konnten im Rahmen der Bearbeitung von **AP 2.2** gewonnen werden:

- Charakterisierend für existierende Systeme ist in der Regel eine behälterlose Erfassung von Monofraktionen in Bringsystemen. Der vorwiegende Absteuerungsweg ist das mechanische Recycling. Wichtig in diesem Zusammenhang ist das überwiegende Vorhandensein definierter Qualitätskriterien für Stoffströme, wodurch eine Verwertung erleichtert wird. Fast alle Systeme sind ebenfalls durch nur sehr rudimentäre technologische Unterstützung durch Informations- und Kommunikationstechnologie gekennzeichnet. Hierdurch werden akteursübergreifende Kommunikation und die Abstimmung aufeinanderfolgender Prozesse erschwert. Ausgewählte Schlussfolgerungen sowie die Häufigkeitsverteilung identifizierter Merkmale können der Abbildung 5 entnommen werden.
- Insgesamt sind Systeme für Erfassung und Rückführlogistik für die betrachteten kunststoffhaltigen Fraktionen im Bereich der Bau- und Abbruchabfälle als nicht dem logistischen Standard entsprechend zu beschreiben. Zahlreiche in vorwärts gerichteten Supply Chains von produktionslogistischen Systemen umgesetzte Ansätze zur Nachverfolgbarkeit und Steuerung von Stoff- und Materialströmen werden im Bereich der Kreislaufwirtschaft nicht eingesetzt. Entsprechende Potenziale, die insbesondere auch Logistikkosten mittelbar beeinflussen, werden entsprechend nicht gehoben.
- Abschließend konnten Empfehlungen zur Verbesserung der Erfassung und Rückführlogistik formuliert werden.

Insgesamt entsprechen die Ergebnisse dem zu Beginn der Projektlaufzeit und während der Beantragung Erwarteten. Während weniger als erhofft auf Primärdaten und direktes Feedback und Beobachtung aus der Praxis zurückgegriffen werden konnte, haben die erfolgten Arbeiten dennoch den angestrebten Erkenntnisgewinn erbracht. Insbesondere konnten strukturiert bestehende Verbesserungspotenziale für verschiedene Aspekte des im Arbeitspaket betrachteten Bereichs aufgezeigt werden, die beispielsweise im Rahmen weiterführender Forschungsprojekte bearbeitet werden sollten. Hierzu gehören Fragen der prozessualen Integration von Sammlung und Erfassung in Abhängigkeit von folgenden Recyclingprozessen sowie die Untersuchungen zur Rolle von Digitalisierung und Informationstechnologie zur besseren und zeitnahen Nachverfolgung von Stoffströmen.

### **AP 3.1 und AP 3.2: RWTH Aachen University, ANTS**

Das Ziel der Arbeitspakete 3.1 und 3.2 war es, aus ausgewählten Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) ein maximal kunststoffangereichertes Vorkonzentrat durch mechanisch basierte Verfahrenstechnik zu erzeugen. Dieses Vorkonzentrat soll als Zwischenprodukt die technischen Voraussetzungen für die Verarbeitung in einer thermo-chemischen Konversion (AP 3.3) erfüllen, um damit Grundlagenwissen für ein technisches Konzept zur Kreislaufführung von Dämmstoffen mittels chemischen Recyclings zu erarbeiten. Die Ergebnisse der praktischen Versuche wurden innerhalb einer rechnerbasierten Variantenrechnung weiterverarbeitet und für einen technischen Entwurf einer Aufbereitungsanlage im industriellen Maßstab verwendet. In Abbildung 6 ist der Ablauf der Arbeitspakete dargestellt. In AP 3.1 waren die geeigneten Maschineneinstellungen der Zerkleinerung und Siebklassierung zu identifizieren, bei der ein maximaler und verlustreduzierter Wertstoffaufschluss des Verbundmaterials erreicht wird. Durch eine nachfolgende Sortierung (AP 3.2) sollte der durch Zerkleinerung und Siebklassierung aufgeschlossene Dämmstoff einerseits verlustreduziert angereichert werden, andererseits in maximaler Wertstoffkonzentration im Vorkonzentrat vorliegen.

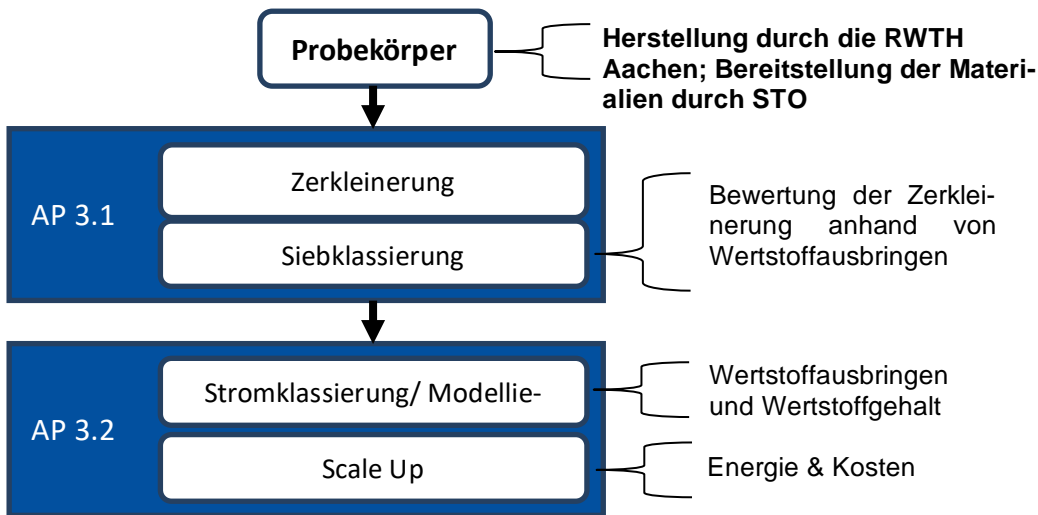


Abbildung 6: Ablaufplan & Bewertungskennzahlen der Arbeitspakete 3.1 und 3.2 (Quelle: RWTH Aachen University)

Aufgrund von fehlenden wissenschaftlichen Basisdaten zum erforderlichen Umgang mit WDVS in der mechanischen Aufbereitung und zur erforderlichen Prozesskonfigurierung haben die durchgeführten Versuchsreihen Aufschlusscharakter.

Zur Gewährleistung von vergleichbaren und reproduzierbaren Ergebnissen wurden für die Versuchsreihen Probekörper identischer stofflicher Zusammensetzung und Geometrie hergestellt. Für die Versuche am ANTS wurden nach Empfehlungen der assoziierten Partner hierzu baurechtlich zugelassene WDVS mit drei unterschiedlichen Dämmstoffen untersucht: expandiertes Polystyrol (EPS), extrudiertes Polystyrol (XPS) und Polyisocyanurate (PIR). Das ANTS – im September 2020 erfolgte die Umbenennung von I.A.R. in ANTS – hat während der Projektphase die Herstellung der Probekörper und die mechanische Aufbereitung und Analyse der aufbereiteten Probekörper in den institutseigenen Räumlichkeiten (Technikum & Labor) durchgeführt.

In Tabelle 1 sind die Eigenschaften der Probekörper dargestellt.

Tabelle 1: Eigenschaften der Probekörper

	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Ø Massenanteil Dämmstoff [M.-%]	Volumenanteil Dämmstoff [Vol.-%]
EPS	≈ 250	≈ 100	≈ 90	≈ 11	≈ 89
XPS	≈ 250	≈ 100	≈ 110	≈ 28	≈ 91
PIR	≈ 250	≈ 100	≈ 110	≈ 26	≈ 91

In Abbildung 7 sind beispielhaft Probekörper für jeden Dämmstoff dargestellt.



Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung von Probekörpern (links.: EPS; Mitte: XPS; rechts: PIR)  
(Quelle: RWTH Aachen University)

### AP 3.1 Mechanische Vorkonzentraterzeugung von Verbundsystemen aus Neuware

#### Methode

In AP 3.1 wurden systematische Versuchsreihen durchgeführt, um die Möglichkeiten und Grenzen von Aufschlusszerkleinerung und Siebklassierung an den Versuchsmaterialien zu identifizieren.

Die Zielstellung der mechanischen Aufbereitung richtet sich nach den Anforderungen des nachgeschalteten Verwertungsverfahrens. Anhand dieser Anforderungen wird der Aufwand für die Erzeugung eines Vorkonzentrates und dessen Qualität validiert und der Prozess insgesamt bewertet.

Durch das KIT (AP 3.3) wurde folgende, zentrale Anforderung an das Vorkonzentrat gestellt:

- Die maximale Korngröße des Vorkonzentrates soll aus Gründen der gleichmäßigen Chargierfähigkeit bei der Beschickung des Reaktors eine obere Partikelgröße  $d_0$  von 20 mm nicht überschreiten.

Das durch mechanische Aufbereitung erzeugte Vorkonzentrat sollte darüber hinaus in a) hoher Reinheit (d.h. maximaler Gehalt an Wertstoff) sowie b) mit möglichst hohem Wertstoffausbringen ( $R_W$ ), d.h. mit niedrigen Verlustanteilen, in die thermochemische Behandlung überführt werden. Als Wertstoff ist der jeweilige Dämmstoff definiert. Aufgrund des begrenzten Projektumfangs wurden Konversionsversuche am KIT ausschließlich für die Vorkonzentrate aus EPS und XPS durchgeführt.

#### Durchführung

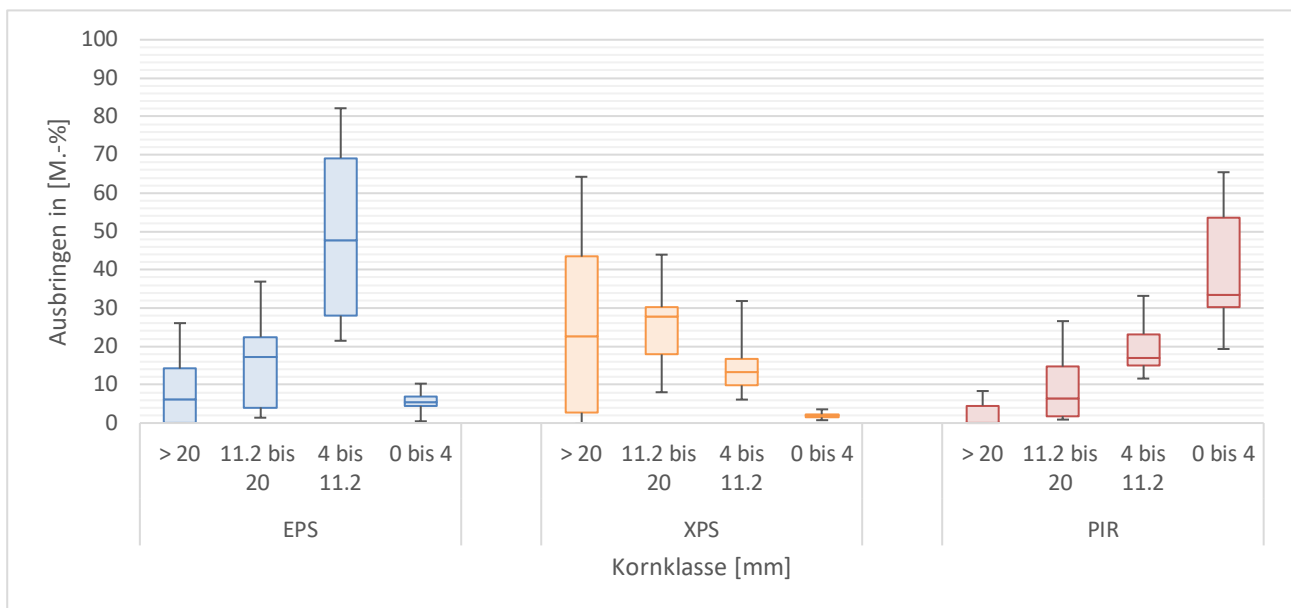
Die Probekörper wurden zuerst einer Aufschlusszerkleinerung in einer Hammermühle (Rotor: Ø 470 mm, L 540 mm; 35 kW Antriebsleistung) bzw. einer Prallmühle (Rotor: Ø 320 mm, 2 Schlagleisten à 70 mm Höhe, 18 kW Antriebsleistung) zugeführt. Beide Mühlenarten zerkleinern mittels Schlag- und Prallbeanspruchung und haben eine besondere Zerkleinerungswirkung auf spröde, d.h. mineralische Rohstoffe. Die Zerkleinerungsintensität wurde sowohl durch die Motordrehzahl (beide Maschinentypen: 500, 1000 und 1500 Umdrehungen pro Minute) als auch durch den Spaltabstand des Austragsrostes (nur Hammermühle: 20, 40 mm sowie ohne Austragsrost) variiert.

Die Zerkleinerungsprodukte wurden mittels Laborsiebung auf ihre Partikelgrößenverteilung untersucht. Die stoffliche Zusammensetzung der einzelnen Siebfractionen bis zur unteren Korngröße von 2 mm erfolgte mittels händischer Sortierung in die Fractionen Dämmstoff, MPK (Mörtel, Putz und Kleber), Armierung und Verbunde. Für die Fractionen < 2 mm wurde deren stoffliche Zusammensetzung durch Glühverlustbestimmung in Anlehnung an DIN EN 15935 ermittelt.

Die Bewertung der Zerkleinerungskonfiguration in AP 3.1, d.h. der geeigneten Parametrierung hinsichtlich der Zerkleinerungsgrößen Geschwindigkeit und Siebeinsatz, erfolgt anhand des maximalen Wertstoffausbringens bezogen auf die aufgeschlossene Wertstoffmasse im Korngrößenbereich

< 20 mm (Zielvorgabe aus AP 3.3., s.v.). Alle Mengenanteile, die > 20 mm sind, verfehlen hingegen die technischen Vorgaben der thermochemischen Konversion und sind somit verfahrenstechnisch als Verlust einzuordnen. Infolgedessen wurden nachfolgend nur die Anteile < 20 mm weiter aufbereitet (AP 3.2 und AP 3.3). Neben der maximalen oberen Partikelgröße  $d_0$  ist für die Bewertung des Zerkleinerungsprozesses auch die *Partikelgrößenverteilung* von Interesse, da mit feiner werdender Körnung sowohl die Sortierbedingungen als auch das Partikelhandling nachfolgender Prozessstufen grundsätzlich erschwert werden. Hohe Reinheiten der Zerkleinerungsfractionen spielen hingegen keine Rolle bei der Bewertung des Zerkleinerungsprozesses, da in jedem Fall eine gezielte Anreicherung des Wertstoffes aus dem Zerkleinerungsgut im folgenden AP 3.2 vorgesehen ist.

## Ergebnisse



**Abbildung 8: Wertstoffausbringen RW des Polymer (Dämmstoff) in Abhängigkeit vom Dämmstofftyp und dem Partikelgrößenbereich: Der Versuchsumfang betrug je Dämmstoff 30 Einzelversuche bei unterschiedlicher Parametrierung bzgl. Austragsrost (20 & 40 mm) und Umfangsgeschwindigkeit (500, 1000 und 1500 U/min) (Quelle: RWTH Aachen University)**

In Abbildung 8 ist das Wertstoffausbringen je Dämmstoff in die Kornklassen > 20; 20 - 11,2; 11,2-4 sowie < 4 mm und unterschiedlicher Versuchsparametrierung dargestellt. Dabei zeigt sich, dass je Dämmstoff eine *korngrößen-spezifische Anreicherung* erkennbar ist. So reichert sich der Dämmstoff EPS in der „mittleren“ Korngrößenfraktion 4 - 11,2 mm an (Medianwert: ca. 48 M.-%), hingegen sind weder im kritischen Grob- noch im Feinstkornbereich wesentliche Wertstoffanteile zu finden; XPS findet sich tendenziell in den gröberen Kornfraktionen 11,2 - 20 sowie > 20 mm wieder; im Gegensatz dazu wird PIR in großem Umfang in die Feinstkornfraktion < 4 mm überführt. Anhand dieses Vergleiches lässt sich ableiten, dass sich der Dämmstoff nach der Stoffart in unterschiedlichen Korngrößenklassen anreichert. Durch die Konfiguration der Zerkleinerung lassen sich diese Ergebnisse lediglich verstärken oder abschwächen.

In Abbildung 9 sind je Dämmstoff die Ergebnisse einschließlich der dabei gewählten Maschinenparametrierung dargestellt, bei denen im Zerkleinerungsgut die Mengenanteile < 20 mm maximiert werden konnten. Entsprechend maximale Mengenanteile wurden für alle WDVS durch Zerkleinerung in der Hammermühle (HM) erreicht. Durch die Verwendung eines Austragsrostes mit einer 20 mm Lochung und einer Drehzahl von 1500 U/min konnte für den Wertstoff EPS bspw. ein Wertstoffausbringen ca. 96 M.-% in die Kornklasse < 20 mm erzielt werden. Gleichzeitig wurde ein Mas-

senausbringen von 88 M.- % erreicht. Der Verlust von 12 M.- % lässt sich auf zwei Faktoren zurückführen. Zum einen wurden ca. 5 M.-% des aufgegebenen Probekörper nicht ausgetragen, sondern verblieben als Rückstand im Zerkleinerungsraum (diskontinuierliche Arbeitsweise), zum anderen kam es bei der Zerkleinerung durch die hohen Zerkleinerungsintensität zu einer starken Staubentwicklung.

Für den Dämmstoff XPS wurde das höchste Wertstoffausbringen in die Kornklasse < 20 mm ebenfalls bei Konfiguration auf höchster Zerkleinerungsintensität (1500 U/min und 20 mm Sieblochung

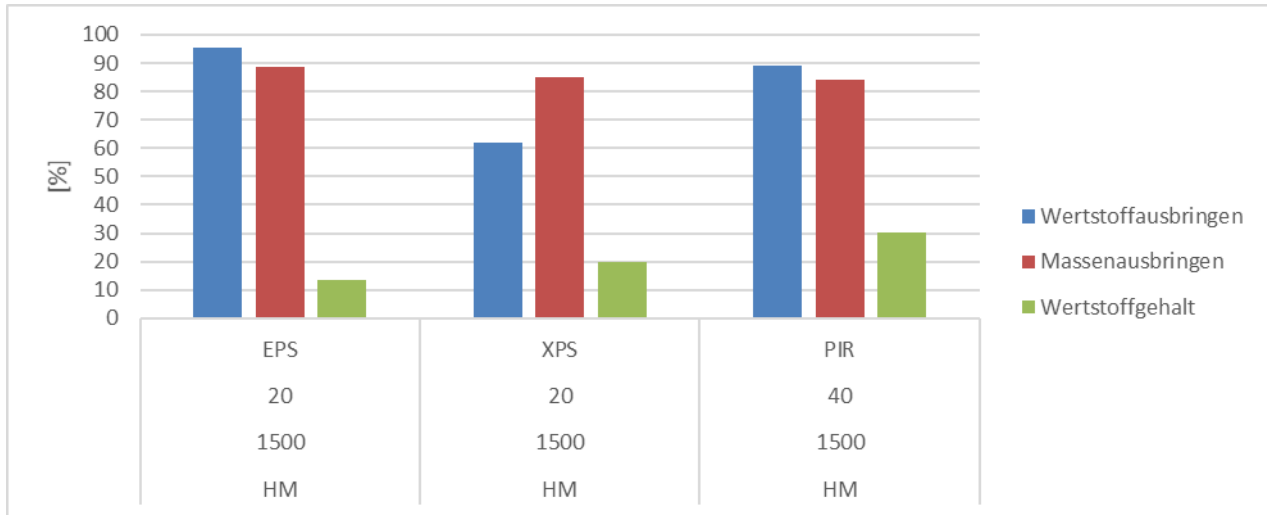


Abbildung 9: Konfiguration und Ergebnisse bei Best Case (HM: Hammermühle)  
(Quelle: RWTH Aachen University)

des Austragsrostes) erreicht. Es wurde im Vergleich zu EPS allerdings ein deutlich niedrigeres Wertstoffausbringen von 62 M.- % erzielt. Ein wesentlicher Grund hierfür war die Beobachtung, dass ein erheblicher Anteil von 22 M.- % des Inputmaterials (vorrangig XPS) nicht ausgetragen werden konnte, sondern im Zerkleinerungsraum verblieben ist. Dies ist vermutlich auf die höhere Festigkeit und Verformbarkeit des Dämmstoffs zurückzuführen. Während der Dämmstoff EPS entlang der Partikelgrenzen einzelner Kügelchen aufgebrochen wird, handelt es sich bei XPS um einen geschlossenzelligen Dämmstoff mit einer wesentlich höheren Druckfestigkeit (**EPS**: 0.07 bis 0.26 N/mm<sup>2</sup>; **XPS**: 0.15 bis 0.7 N/mm<sup>2</sup>).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von EPS und XPS wurde für den Dämmstoff PIR das höchste Wertstoffausbringen bei einer Konfiguration der Zerkleinerung bei 1500 U/min und 40 mm Sieblochung erreicht. Die Verwendung einer 20 mm Lochung bei gleicher Drehzahl führt nicht wie bei EPS oder XPS zu einer Steigerung des Wertstoffausbringens.

Die Ergebnisse der Zerkleinerung ohne Austragsrost in der Prallmühle und Hammermühle zeigen im Gegensatz zu den Ergebnissen mit Austragsrost ein grundsätzlich anderes Ergebnis. Aufgrund des fehlenden Austragsrostes wurde eine sehr breite Streuung der Partikelgrößen von < 1 mm bis > 100 mm festgestellt. Außerdem fand keine spezifische Wertstoffanreicherung in einer bestimmten Kornklasse statt. Der Verzicht auf einen Austragsrost ist für die vorliegende Aufgabenstellung demnach nicht zielführend.

Die Untersuchungen in der Hammer- und Prallmühle wurden diskontinuierlich durchgeführt. Nach Abschluss der Zerkleinerung jedes einzelnen Probekörpers wurde der Mühlenraum geöffnet und im Siebkorb verbleibende Rückstände nach Stoffart verifiziert und ausgewogen. Vor allem die WDVS aus XPS und auch in geringerem Umfang von EPS, aber auch die Armierung aus Glasfaser könnten

unter worst case Bedingungen den Mühlenraum verstopfen. Ob dieses Szenario auch im betrieblichen Maßstab, d.h. im kontinuierlichen Betrieb, auftritt, kann an dieser Stelle nicht abschließend beurteilt werden. So könnte es auch sein, dass in den Siebkorb kontinuierlich nachströmendes Material eine Reinigungsfunktion dahingehend hat, dass Siebrückstände durch das Sieb gedrückt werden wodurch die Siebfläche wieder freigesetzt wird. Im Zuge aber eines zeitigen Zusetzens des Siebkorbes muss der Zerkleinerungsschritt im kontinuierlichen Betrieb redundant ausgeführt werden oder es sind erforderliche Wartungszeiten zum Reinigen der Siebfläche einzuplanen.

### AP 3.2 Scale up Verfahrenskette (Vorkonditionierung + Aufbereitung):

In diesem Arbeitspaket wurde der zusätzliche technologische Aufwand quantifiziert, der notwendig ist, um ein Vorkonzentrat herzustellen, welches die Anforderungen der nachgeschalteten thermochemischen Konversion erfüllt.

Da im vorliegenden Anwendungsfall ein großer Dichteunterschied zwischen den verwendeten Komponenten besteht (EPS ca. 15 kg/m<sup>3</sup>, XPS ca. 25 kg/m<sup>3</sup>, PIR ca. 30 kg/m<sup>3</sup>, Armierung und MPK 900 bis 1800 kg/m<sup>3</sup>), bietet sich zur Sortierung der Zerkleinerungsproduktes eine Stromklassierung mittels Windsichtung an. Dabei wird das spezifisch leichtere Material mit dem Luftstrom in das Leichtgut überführt, während das spezifisch schwerere Material nicht mit dem Luftstrom mitgerissen, sondern im Schwergut ausgetragen wird. Ein maximaler Wirkungsgrad der Windsichtung wird erreicht, wenn *Gleichfälligkeitseigenschaften* des Inputmaterials vermieden werden. In der betrieblichen Praxis wird dies durch Erzeugung enger Kornfraktionen – z. B. durch ein Verhältnis von oberer (d<sub>o</sub>) zu unterer (d<sub>u</sub>) Korngröße in der Aufgabe von ungefähr 3 zu 1 – umgesetzt [1].

Für die Versuche in AP 3.2 kam ein Zick-Zack-Windsichter (ZZWS) mit elf Segmenten der Firma Graf Anlagenbau (Baujahr 2017) zum Einsatz. Ein Segment des Zick-Zack-Kanals ist 120 mm hoch, 80 mm breit und hat eine Tiefe von 130 mm. Der Winkel zwischen den einzelnen Segmenten beträgt 120°. Das zu trennende Gut wurde mittels einer Vibrationsrinne zwischen der siebten und achten Stufe des Windsichters aufgegeben.

In AP 3.1 wurde der Fokus auf die Überführung einer maximalen Wertstoffmasse in das Zwischenprodukt gelegt. In AP 3.2 soll dann eine gezielte Anreicherung von Wertstoff zur Einstellung einer maximalen Qualität des Vorkonzentrates angestrebt werden. Die Ergebnisse der ZZWS-Versuche werden anhand des Wertstoffgehalts im Leichtgut vorgenommen. Aus Qualitätsgründen wird ein maximaler Wertstoffgehalt im Leichtgut angestrebt (s.v.)

Es wurden für alle drei Dämmstoffe Wertstoffgehalte von ca. 99 M.-% im Leichtgut erreicht. Aufgrund der geringen Dichte der Dämmstoffe (15 bis 30 kg/m<sup>3</sup>) wurden die Ergebnisse mit vergleichsweise niedrigen Luftgeschwindigkeiten um die 2 m/s erreicht; im Gegensatz dazu werden z.B. in der Aufbereitung von Leichtverpackungen Luftgeschwindigkeiten > 10 m/s eingesetzt. In Tabelle 2 sind für die erreichten Ergebnisse die erforderlichen Luftgeschwindigkeiten aufgeführt.

Tabelle 2: Luftgeschwindigkeit (ZZWS)

WDVS	Luftgeschwindigkeit [m/s]
EPS	Ca. 1,7
XPS	Ca. 2,5
PIR	Ca. 2,0

Die dargestellten Ergebnisse für den ZZWS zeigen den jeweiligen Best Case mit dem Ziel eines maximalen Wertstoffgehaltes. Diese Zielsetzung kann sich unter betrieblichen Verhältnissen ändern.

Das angereicherte Vorkonzentrat nach Durchlauf der AP 3.1 und 3.2 ist ohne zusätzliche Verdichtung aufgrund der geringen Schüttdichten nicht für den Transport im LKW und für die Förderung in den Reaktor der thermochemischen Konversion geeignet. Eine Verdichtung nach einer mechanischen Aufbereitung ist daher unbedingt erforderlich. Hierzu wurden durch das KIT Versuche zur Verdichtung mittels thermischer Volumenreduktion durchgeführt.

Die erzeugten Ergebnisse aus AP 3.1 und AP 3.2 wurden in einer Variantenrechnung weiter aufbereitet, sodass die Parameter der Zerkleinerung, Siebung und Stromklassierung frei wählbar sind und das Wertstoff- und Massenausbringen sowie die Zusammensetzung aller Stoffströme, welche die modellierte Anlage verlassen, bilanziert werden können. Anhand dieser Variantenrechnung können Vorhersagen über die Qualität eines Vorkonzentrats getroffen werden, welches einer thermochemischen Konversion zugeführt wird.

Neben den praktischen Versuchen und der Erstellung einer Variantenrechnung wurde in AP 3.2 ein technischer Entwurf einer industriellen Anlage zur Trennung von Dämmstoffen aus WDVS-Abfällen am Beispiel von EPS umgesetzt. Mit Hilfe der Variantenrechnungen konnte für die entworfene Aufbereitungskette die erforderliche Bilanzierung durchgeführt werden. Für den Fall EPS kann ein Gesamtwertstoffausbringen von 85 M.- % in das Vorkonzentrat erreicht werden. Es werden ca. 10 M.- % der aufgegebenen Inputmasse als Wertstoff-Vorkonzentrat ausgetragen. Der erreichte Wertstoffgehalt beträgt ca. 99 M.- %. Bei einer Änderung der vorgegebenen Anforderungen an den Wertstoffgehalt kann mit Hilfe der Variantenrechnung eine Anpassung der Parametrierung vorgenommen werden. Neben dem Entwurf einer Anlage im industriellen Maßstab wurde auch eine Abschätzung des Energieverbrauchs sowie der Kosten einer mechanischen Vorbehandlungsanlage vorgenommen. Auf Basis des Abfallpotentials von WDVS in Deutschland wurde anschließend die mechanisch basierte Vorbehandlungsanlage geplant und mit Planern sowie dem Maschinen- und Anlagenbau diskutiert.

Das Abfallaufkommen an EPS-haltigen WDVS wurde anhand der Conversio Studie von 2017 abgeschätzt. Aus der Studie lässt sich ableiten, dass ca. 12.000 Mg EPS-Abfälle aus WDVS im Jahr 2016 angefallen sind. Dabei handelt es sich lediglich um die Masse des Dämmstoffs, die Masse an WDVS liegt laut einer Fraunhofer Studie von Albrecht und Schwitalla [2] um den Faktor 10 höher. Somit fielen im Jahr 2016 ca. 120.000 Mg WDVS-Abfälle mit EPS als Dämmstoff in Deutschland an.

In Deutschland leben ca. 83 Mio. Einwohner. Daraus folgt ein kopfspezifisches WDVS-Abfallaufkommen von ca. 1.44 kg/E\*a. Für eine als typisch gewählte Anlagenkapazität von 15.000 Mg/a ist somit der WDVS-Abfall von ca. 10.500.000 Einwohnern abzudecken.

Die Bilanzierung der Anlage wurde anhand der erstellten Modellierung durchgeführt. Die Anlage bereitet jährlich 15.000 Mg EPS-haltige WDVS-Abfälle auf. Der geplante Entwurf sieht eine Vorzerkleinerung mittels Kammwalze vor; neben der Einengung des Kornbandes soll durch Einsatz der Vorzerkleinerung zudem die weitere Stoffstromzufuhr in den Prozessen vergleichmäßig werden. An die Vorzerkleinerung angeschlossen ist eine Zerkleinerung mittels Hammermühlen in redundanter Verschaltung. Die Einstellung der benötigten Kornklasse für die Stromklassierung erfolgt mittels Spannwellensieben. Nach der Stromklassierung sind Strangpressen vorgesehen, um die Schüttdichte des erzeugten Vorkonzentrates zu erhöhen und für den Transport vorzubereiten.

Es werden durch die Anlage zwei Stoffströme erzeugt: zum einen ein Vorkonzentrat mit ca. 10 M.- % der Inputmasse und in der thermischen Konversion weiterverarbeitet wird sowie ein „Rest“-Strom von ca. 90 M.- %, der hauptsächlich aus Putz-, Kleber- und Mörtelkomponenten und Armierungsgebe besteht.



Die innerhalb des AP 3.2 geplante Anlage erfordert eine Investitionssumme von insgesamt rund 6.5 Mio. € (Gebäude; Fläche; Maschinen; Planung) sowie jährliche Betriebskosten von ca. 2.8 Mio. €. Die Investitionskosten entsprechen, bezogen auf die jährlich umgesetzte Anlageninputmasse, einer Kostenposition von ca. 40 €/Mg<sub>Input</sub>. Die jährlichen Prozesskosten setzten sich aus zwei Positionen zusammen: der Entsorgung des Reststrom für ca. 1.37 Mio. € und den Betriebskosten von rund 1.4 Mio. €. Dabei wird angenommen, dass der Reststrom in eine Müllverbrennungsanlage für 120 €/Mg entsorgt wird. Die jährlichen Prozesskosten bezogen auf die jährliche Anlageinputmasse entsprechen spezifischen Kosten von rund 185 €/Mg. Die gesamten spezifischen Kosten der Anlage bezogen auf den Input betragen 225 €/Mg.

Zur Bestimmung des Energieverbrauchs einer mechanischen Vorbehandlungsanlage wurde der zu verarbeitende Volumen- und Massenstrom der Anlage bestimmt und die Aggregate danach ausgelegt. Für die abgeschätzte Anlage wird eine Anschlussleistung von rund 725kW benötigt. Bezogen auf die Inputmasse entspricht dies 74 kWh/Mg<sub>Input</sub> und 745 kWh/Mg<sub>Output</sub>. Die ermittelten Werte sind dem Projektpartner aus AP 4 zur Verfügung gestellt worden und als Parameter in die ökologische und ökonomische Bewertung eingeflossen.

### **AP 3.3: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

Ziel von AP 3.3 war die Identifikation potenzieller Routen des chemischen Recyclings, insbesondere Pyrolyse und Vergasung, in Abhängigkeit von Einsatzstoff- und Produkthanforderungen, sowie verfügbarer Technologien und deren Reife. Darüber hinaus sollten charakteristische Kenngrößen der identifizierten Recyclingwege für eine nachfolgende Bewertung ermittelt werden. Speziell die Anforderungen an das aufbereitete Abfallgemisch sowie dessen Handhabung in technischen Prozessen waren hierbei von Bedeutung. Als Herausforderung waren insbesondere Störstoffe zu nennen. Diese umfassen z.B. mineralische Abfallbestandteile oder im WDVS enthaltene Flammschutzmittel. Ergänzend galt es, die physikalischen Eigenschaften der Einsatzstoffe zu berücksichtigen. Deren poröse Struktur mit Gaseinschlüssen und einer, für das Produkt essenziellen, geringen Wärmeleitfähigkeit und Dichte erschwert das Handling im Recyclingprozess. Aufgabe war es daher, Inputspezifikationen für potenzielle thermochemische Umwandlungsverfahren zu definieren und anschließend Massen- und Energiebilanzen in Abhängigkeit des Konversionsprozesses unter Einbezug der mechanischen Aufbereitung aufzustellen. Dieser ganzheitliche Ansatz ermöglichte das Erkennen von Optimierungspotenzialen und offenen Fragestellungen im Gesamtrecyclingprozess.

Anhand von Literaturrecherchen wurden drei vielversprechende thermochemische Umwandlungsverfahren zum chemischen Recycling von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) ausgewählt. Daraus konnten drei unterschiedliche Prozessketten abgeleitet werden, die neben der mechanischen Aufbereitung den Konversionsschritt und weitere Konditionierungsschritte beinhalten. Die Umwandlungsverfahren wurden anhand der Skalierbarkeit auf industriellen Maßstab und des Technology Readiness Levels ausgewählt. Nach Stapf, Seifert & Wexler [1] konnten hierbei die Wirbelschichtvergasung und die Pyrolyse identifiziert werden. Eine Kombination aus chemischer Vorkonversion mittels Pyrolyse mit anschließender Vergasung im Flugstrom wurde weiterhin als dritte Variante berücksichtigt. In der Prozesskette wurde allen Umwandlungsschritten die mechanische Vorbehandlung vorangestellt, die durch den Projektpartner RWTH Aachen in AP 3.1 und AP 3.2 untersucht wurde. Die Festlegung der Inputspezifikationen und Prozessparameter erfolgte anhand des aktuellen Stands der Technik und Institutserfahrungswerten, sodass Meilenstein Nr. 5 termingerecht erreicht wurde.

Aufgrund einer unzureichenden Datenlage für die Bewertung der Pyrolyse hinsichtlich ihrer technologischen Eignung wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Diese umfassten die Möglichkeit zur Verdichtung der porösen WDVS und die thermische Zersetzung. Im Projektverlauf erwies



sich die Verdichtung als notwendiger Prozessschritt nach der mechanischen Aufbereitung, um einerseits ungewollten Gaseintrag in den Pyrolysereaktor durch Ausgasungsvorgänge aus der porösen Struktur zu verhindern und andererseits die Materialdichte für einen ausreichenden WDVS-Durchsatz in dem Reaktor zu erhöhen. Hierbei wurde sowohl die mechanische Verdichtung (Pressen) als auch eine thermische Kompaktierung (Schmelzen) betrachtet. Die Laborversuche zeigten, dass über eine rein mechanische Verdichtung, sowohl für die polystyrol-, als auch bei den isocyanatbasierten WDVS keine ausreichende Kompaktierung der porösen Struktur erreicht werden kann. Eine thermische Kompaktierung war nur bei den schmelzbaren, thermoplastischen Polystyrol-WDVS möglich. Die Kombination beider Möglichkeiten durch Erwärmung bei gleichzeitiger mechanischer Belastung (bspw. durch Pelletieren) zeigte sich als vielversprechende Konditionierungsvariante.

Das thermische Verhalten aller WDVS wurde mit einem Erhitzungsmikroskop und in einer thermogravimetrischen Analyse untersucht. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen dem styrolbasierten (expandiertem, EPS bzw. extrudiertem, XPS, Polystyrol) und isocyanatbasierten (hochvernetztes Polyisocyanurat PIR) Material bezüglich Struktur- und Volumenänderungen bei thermischer Belastung. Die Ergebnisse der Erhitzungsmikroskopie sind in Abbildung 10 gezeigt. Es ist ersichtlich, dass die polystyrolbasierten Materialien nach kurzem Aufblähen eine deutliche Volumenreduzierung im Bereich von 80 bis 140 °C erfahren. Bei weiterem Temperaturanstieg konnte bei den Thermoplasten die Aufgabe der Plastizität und das Schmelzen der porösen Struktur beobachtet werden. Das PIR neigt zu einer mehrstufigen Volumenänderung, die auch erst bei vergleichsweise höheren Temperaturen auftritt. An der Probe war durch die optische Analyse kein Schmelzen, sondern nur ein Schrumpfen des formstabilen Materials zu beobachten.

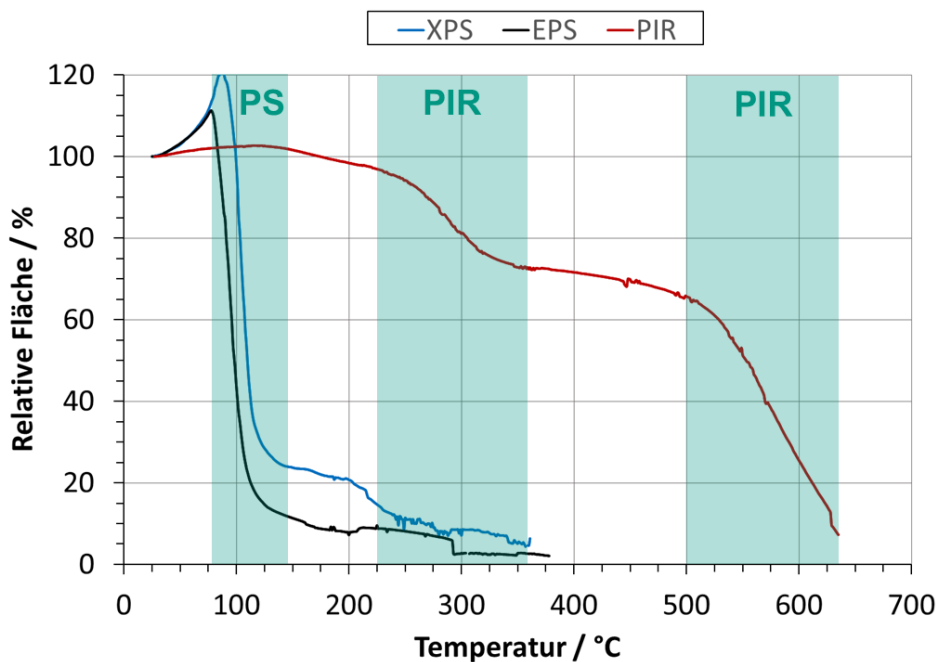


Abbildung 10: Ergebnisse der Untersuchung von EPS, XPS und PIR mit einem Erhitzungsmikroskop in Stickstoffatmosphäre und bei einer Heizrate von 10 K/min. (Quelle: KIT)

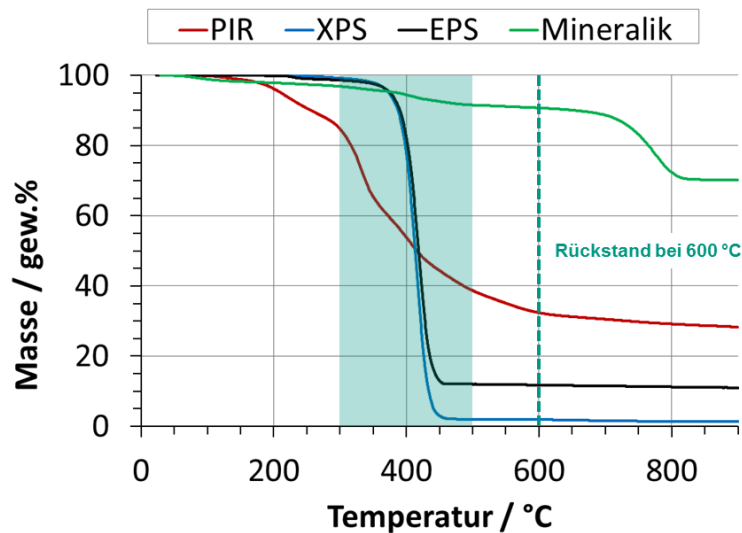


Abbildung 11: Thermogravimetrische Analyse der geschäumten Kunststoffe und einer mineralischen Probe in Stickstoffatmosphäre bei einer Heizrate von 10 K/min. (Quelle: KIT)

Die in Abbildung 11 dargestellten thermogravimetrischen Untersuchungen gaben Aufschluss über den Temperaturbereich, in dem die Pyrolyse der Materialien abläuft, und ließen weiterhin einen Rückschluss auf die entstehenden Produktfraktionen Feststoff und Flüchtige zu. Neben XPS und EPS, die beide in Übereinstimmung mit der Literatur einem einstufigen, fast rückstandsfreien Abbaumechanismus zwischen 350 und 400 °C folgen, tritt für PIR ein mehrstufiger Abbau mit deutlich höherem Anteil an Feststoffrückstand (Koks) auf. Die mineralischen Bestandteile zeigten im relevanten Temperaturbereich bis 600 °C nur einen geringen Massenverlust. Mit Abschluss der Untersuchungen war der im Zeitplan festgehaltene Meilenstein Nr. 10 erreicht. Die Ergebnisse zeigten, dass der Umgang des WDVS im Konversionsprozess an das grundlegend unterschiedliche Verhalten anzupassen ist.

Mit der ermittelten Datengrundlage war eine grobe Bewertung der Prozessketten durchführbar, jedoch ergab sich die Möglichkeit, durch Technikumsversuche mit polystyrolbasierten WDVS-Material im Rahmen des Grundlagenprojekts „Rohstoffliches Recycling kunststoffhaltiger Abfallströme mittels Pyrolyse“ im Auftrag des Verbands der Chemischen Industrie e.V. (VCI) und PlasticsEurope Deutschland e.V. die Aussagekraft der Ergebnisse dahingehend zu verbessern, dass Stoff-, Massen- und Energiebilanzen aufgestellt werden konnten. Hierbei wurde zunächst auf styrolbasierte, aufgearbeitete WDVS fokussiert. Die Prozesskettenbewertung erfolgte daher in Absprache mit dem Projektkonsortium ausschließlich für polystyrolbasierten Einsatzstoff. Nach der Bereitstellung des inputspezifationsgerechten Vorkonzentrats durch die RWTH Aachen wurde dieses in einem Muffelofen nach Erkenntnissen aus den Laborversuchen thermisch kompaktiert. Das kompaktierte Material wurde dann zusammen mit thermochemisch inertem Sand pyrolysiert. Als Ergebnis ließ sich eine Massenbilanz ermitteln. Diese erlaubte die Bestimmung der Produktausbeute von Feststoffrückstand, Pyrolysekondensat und Pyrolysegas in Abhängigkeit der Einsatzstoffmenge. Gleichzeitig ermöglichten gezielte Produktanalysen die Zusammensetzung der relevantesten Verbindungen in den verschiedenen Produktfraktionen zu identifizieren.

Die verfahrenstechnische Bewertung der Vergasung geschah auf Grundlage von Simulationsrechnungen, die auf Berechnungen des thermodynamischen Gleichgewichtszustandes basieren. Um Effekte abseits des Gleichgewichts, wie beispielsweise Teerbildung, miteinzubeziehen, wurde das Simulationsergebnis anhand von vergleichbaren Literaturdaten angepasst. Die Synthesegasaufbereitung mit dem Ziel der Einstellung eines H<sub>2</sub>/CO-Verhältnisses erfolgte nach Stand der Technik über die Wasser-Gas-Shift-Reaktion, die Filtration und diverse Wäschen. In den Simulationen wurden zwei Varianten des Rohsynthesegases berechnet, sodass anhand des H<sub>2</sub>/CO-Verhältnisses von

2,1:1 und 1:1 Auswirkungen auf den Gesamtprozess in Abhängigkeit der Produktaufbereitung abschätzbar sind.

Die erzeugten Daten flossen neben den Vorgaben für den mechanischen Aufbereitungsschritt seitens der RWTH Aachen als Grundlage in die Prozesskettenbewertung ein. Diese Prozessketten bilden einen großtechnischen Maßstab als zentrales Anlagenkonzept nach, indem die Versuchsergebnisse auf eine thermische Leistung des thermochemischen Konversionsschritts von 100 MW aufskaliert wurden. Ergänzend zum mechanischen und thermochemischen Teilprozess wurde in der Pyrolyse die Produktauftrennung in Form einer Kondensation und die Verbrennung von Nebenprodukten in die Recyclingkette einbezogen. Letzter Schritt dient dazu, den nicht weiter verwertbaren, aber kohlenstoffhaltigen Feststoffrückstand, sowie die wässrige Kondensatphase und das Pyrolysegas energetisch zu nutzen. Dadurch kann einerseits ein Teil des Energiebedarfs der endothermen Pyrolyse gedeckt werden und andererseits werden nicht nutzbare Stoffströme in ein ausschleusbares Endprodukt überführt. Dennoch lässt sich allein durch die Verwertung der Nebenprodukte der Energiebedarf der Pyrolyse nicht decken, weshalb in der gewählten Recyclingroute neben Luft auch Erdgas im Verbrennungsschritt zugeführt wird. Neben CO<sub>2</sub>-haltigem Abgas fällt in dieser Prozessvariante lediglich eine mineralikreiche Fraktion und organisches Kondensat an. Diese Mineralikfraktion beinhaltet abhängig vom WDVS-Einsatzstoff einen erhöhten Kohlenstoffgehalt, sodass die Möglichkeit der Nutzung dieses Stoffstroms gesondert zu betrachten ist, aufgrund des hohen Massenanteils aber große Relevanz aufweist. Das Kondensat macht als Hauptprodukt der Pyrolyse einen Anteil von etwa knapp 70 Gew.% des aufbereiteten Einsatzstoffes aus, weshalb beispielsweise für EPS eine Kohlenstoff-Recyclingrate von ca. 64 Gew.% (Kohlenstoff im öligen Kondensat bezogen auf Kohlenstoffinhalt im WDVS vor der mechanischen Aufbereitung) ermittelt werden konnte.

Die Prozesskette des chemischen Recyclings über die Vergasung des Vorkonzentrats ist im Bereich der mechanischen Aufbereitung identisch zur pyrolytischen Konversion. Aus dem Vorkonzentrat lässt sich in dieser Prozesskette allerdings Rohsynthesegas erzeugen. Für die Simulation wurde eine zentrale 100 MW Anlage nach dem Wirbelschicht-Konzept mit Gaskonditionierung und -reinigung nach gegenwärtigem Stand der Technik angenommen. Die exotherme Reaktion des Einsatzstoffes bedarf Wasserdampf und Sauerstoff als Vergasungsmedium, wobei die Mengen in Abhängigkeit des geforderten H<sub>2</sub>/CO-Gehalts im Synthesegas variieren. Neben dem Synthesegas fallen weitere Produkte wie Abwasser und CO<sub>2</sub>-reiches Abgas an. Nebenprodukte wie Teer und Feststoffrückstände spielen eine untergeordnete Rolle. Es zeigte sich, dass mit der Qualität des Synthesegases, die maßgeblich durch ein höheres H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis verbessert wird, auch der Aufwand in der Wasser-Gas-Shift-Reaktion steigt. Das führt zu geringerer einatzstoffspezifischer Ausbeute an Reinsynthesegas, einer geringeren Kohlenstoff-Recyclingrate und vermehrter Produktion von nicht nutzbarem Abgas. Es ließ sich daraus ableiten, dass sich das H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis in der Vergasung im Sinne einer Stoffstromoptimierung am H/C-Verhältnis im kunststoffhaltigen Einsatzstoff orientieren sollte. Die Kohlenstoff-Recyclingrate lag je nach betrachteter Synthesegasqualität für EPS mit 68 Gew.% knapp oberhalb (H<sub>2</sub>/CO = 1:1) bzw. mit 48 Gew.% (H<sub>2</sub>/CO = 2,1:1) deutlich unterhalb der Recyclingrate, die in der Pyrolyse-Prozesskette ermittelt wurde.

Ein ähnliches Ergebnis ließ sich bei der Prozesskette aus mechanischer Aufbereitung, Pyrolyse und nachgeschalteter Vergasung ableiten. In diesem Fall ist die Pyrolyse weniger als Recyclingschritt gedacht, sondern muss vielmehr als Aufbereitungsstufe der nachfolgenden Vergasung angesehen werden. Der Pyrolyseprozess wurde in dieser Prozesskette analog zur Recyclingroute des pyrolytischen Recyclings bilanziert. So findet auch hier eine gesonderte Verbrennung von Feststoffrückständen und Pyrolysegasen statt. Die wässrige Phase des Kondensats kann zusammen mit der öligen Phase als Einsatzstoff für den Vergasungsschritt genutzt werden. Ebenso ist im Sinne einer Prozessoptimierung und Effizienzsteigerung auch die Verwendung von kohlenwasserstoffhaltigen

Pyrolysegasen möglich, was durch die vergleichsweise hohen, detektierten CO<sub>2</sub>-Anteile in der Pyrolyse der Monofraktion aus polystyrolbasiertem WDVS jedoch in dieser Prozesskettenbilanzierung nicht durchgeführt wurde. Die Vergasung orientiert sich am Verhalten eines Flugstromvergasers und arbeitet daher im Vergleich zur Wirbelschicht-Technologie mit höheren Temperaturen und ist im Bereich höherer Drücke betreibbar. Der technische Mehraufwand hat seine Vorteile in einem flexibler auslegbaren Anlagensystem. Die Synthesegasausbeute und die Kohlenstoff-Recyclingrate ist, wie auch beim Konzept der Wirbelschichtvergasung, in Abhängigkeit der Produktausbeute zu betrachten. Durch das aufwendigere Verfahren fallen diese Kennwerte aber geringer aus als bei der allein stehenden Pyrolyse oder der Wirbelschicht-Vergasung. So liegt die kohlenstoffbezogene Recyclingrate in der kombinierten Prozesskette für EPS bei lediglich 53 Gew.% (H<sub>2</sub>/CO = 1:1) bzw. 34 Gew.% (H<sub>2</sub>/CO = 2,1:1). Die Vorteile eines flexibleren Anlagenkonzepts mit Möglichkeiten einer zentral-dezentralen Verschaltung der Prozesskettenelemente und einer günstigeren Synthesegasaufbereitung konnten erst in der ökologischen und technoökonomischen Bewertung innerhalb von AP 4 einbezogen werden.

Mit der Abbildung aller drei Technologieketten aus mechanischer Vorbehandlung und thermochemischer Konversion konnte auch Meilenstein Nr. 18 erreicht werden, womit alle Teilziele des AP 3 erfolgreich abgeschlossen wurden. Kombiniertes mechanisches und chemisches Recycling (sowohl mittels Pyrolyse als auch mittels Vergasung) wurden als potentielle Recyclingwege für komplexe kunststoffhaltige Bauabfälle identifiziert und beschrieben.

Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf ein weiteres Upgrading der Kondensate für die Verwendung als Naphtha-Ersatz im Steam-Cracker oder, aufgrund des hohen Styrolanteils, direkt als Edukt in der Polystyrolsynthese, da dies im Rahmen des Projekts nicht weiter betrachtet werden konnte. Es besteht Optimierungsbedarf hinsichtlich der Ausgestaltung der Teilprozesse und der Verschaltungen innerhalb der Prozesskette. Weiterhin ist die Störstoffausschleusung zu validieren. Darüber hinaus sind Fragestellungen zentraler oder dezentraler Einbindung des chemischen Recyclings zu bearbeiten. Die technologische Reife der dargestellten Prozessketten ist für eine unmittelbare Umsetzung im industriellen Maßstab noch unzureichend und erfordert die technische Entwicklung im größeren Maßstab (Pilotierung), um technische Risiken zu eliminieren und zu einer fundierten ökologischen und ökonomischen Bewertung als Voraussetzung von Investitionsentscheidungen zu gelangen.

#### **AP 4: Wuppertal Institut**

Das Wuppertal Institut war in der Projektlaufzeit vom 01.12.2018 bis 31.10.2020 mit der Bearbeitung des Arbeitspakets 4 „Lebenszyklusweite ökologische und ökonomische Bewertung“ beschäftigt. Im Folgenden werden die relevanten Arbeiten und Ergebnisse dargestellt.

##### **AP 4.1 Potenziale und Grenzen des Kunststoffrecyclings im Baubereich**

Ziel von AP 4.1 „Potenziale und Grenzen des Kunststoffrecyclings im Baubereich“ war, zunächst eine Übersicht über den derzeitigen Stand der ökologischen und ökonomischen Bewertung von mechanischem Recycling, chemischem Recycling und energetischer Verwertung von mengenmäßig relevanten Kunststoffabfällen zu erstellen. Dies sollte auch die wesentlichen Faktoren umfassen, die den Einsatz der verschiedenen Verfahren begünstigen oder limitieren. In einem zweiten Schritt sollte, ausgehend von der allgemeinen Übersicht, die Betrachtung der Besonderheiten beim Recycling und der Verwertung von Kunststoffen im Baubereich, insbesondere mit Blick auf die im Projekt identifizierten Kunststoffe, erfolgen.

Dazu wurden im Rahmen des AP 4.1 umfassend die einschlägige Literatur ausgewertet und verschiedene ältere wie auch aktuelle vergleichenden Studien zu Recyclingverfahren identifiziert, die

als Grundlage für die Bewertung von Verwertungsverfahren und für den Vergleich mit den im Projekt weiterentwickelten Verfahren geeignet sind.

Auch die mengenmäßig wichtigsten Baukunststoffe konnten identifiziert werden (siehe auch AP 1). Dies sind EPS, XPS, PE und PVC, daneben treten auch noch PP, PA, PUR und andere auf. Gegenüber Kunststoffen aus dem Dualen System sind insbesondere die Anteile an PVC und PUR deutlich erhöht. Damit überwiegen auch bei den Baukunststoffen die Thermoplaste. Die Auswertung der vorliegenden Fachliteratur und bereits vorliegender ökologischer Vergleiche zeigt, dass wenn mechanisches Recycling möglich ist, dies auch deutlich gegenüber dem chemischen Recycling zu bevorzugen ist. Dies stützt die Annahme, dass chemisches Recycling insbesondere für Fraktionen zum Einsatz kommen sollte, die einem mechanischen Recycling nicht zugänglich sind.

Sowohl die Literaturlauswertung als auch eine ergänzend durchgeführte Befragung unter den KUBA Projektpartnern zeigt, dass die Akzeptanz von Kunststoffrecycling, aber auch des Einsatzes von Kunststoffzyklen grundsätzlich gut ist. Insbesondere im Baubereich kommen auch schon eine Reihe von Recyclingprodukten zum Einsatz. Dies betrifft insbesondere Produkte aus PVC (hart), aber auch PE und PP. Ein Grund hierfür ist, dass insbesondere die Anforderungen an Farbe und Geruch dort geringer sind als in anderen Anwendungsbereichen. Ein anderer ist die relativ gute Identifizierbarkeit von größeren Bauprodukten, insb. Fenster, aber auch Rohre, die daher gut genutzt werden können.

Es konnten jedoch auch eine Reihe von Hemmnissen, die einem Recycling entgegenstehen, identifiziert werden:

- Baustoffe werden oft so eingebaut, dass sie nicht sauber ausgebaut werden können.
- Grundlegende Anforderungen an Bauprodukte wie Langlebigkeit, Sicherheit usw., welche etwa durch Verbundwerkstoffe oder Duroplaste erfüllt werden, schränken die Möglichkeiten für ein mechanisches Recycling ein).
- Der Mengenanfall mancher Stoffe ist zu gering, um ein wirtschaftlich tragbares Recycling zu ermöglichen.

Verunreinigungen und Zusatzstoffe haben einen erheblichen Einfluss auf das Recycling. Baustoffe sind langlebig, heutige Zusammensetzungen können sich von älteren unterscheiden und aufgrund veränderter rechtlicher Anforderungen dürfen manche Stoffe nicht mehr eingesetzt werden, können daher auch nicht oder nicht einfach mechanisch recycelt werden.

Dies betrifft insbesondere Additive, die in Kunststoffen eingesetzt wurden. Wesentliche Additive, die das Recycling von Baukunststoffen aufgrund veränderter rechtlicher Rahmenbedingungen erschweren oder verhindern, sind insbesondere Stabilisatoren, Flammschutzmittel und Pigmente.

- Vor 2007 kamen Barium-Cadmium-Stabilisatoren in PVC zum Einsatz. Cadmium unterliegt der europäischen Richtlinie [Richtlinie 91/338/EWG], in welcher das Inverkehrbringen und die Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen beschränkt ist. Zudem steht dieser Stoff auf der REACH-Kandidaten Liste und darf daher auch in Recycling-Kunststoff maximal bis zu 0,1 Gew.% enthalten sein.
- Ein weiterer Stabilisator in PVC ist Dibutyltindichloride (DBTC), das ebenfalls auf der REACH-Kandidaten Liste steht.
- Einen besonders breiten Raum hatte zuletzt die Diskussion um Hexabromcyclododecan (HBCD) als Flammschutzmittel in EPS/XPS eingenommen. Es wird seit 2016 nicht mehr in der EU eingesetzt und verhindert das bis zu diesem Zeitpunkt übliche mechanische Recycling alter Materialien, da es nicht mehr in den Verkehr gebracht werden

darf. Nach 2016 produzierte EPS oder XPS Dämmstoffe enthalten als Flammschutzmittel ein bromiertes Styrol-Butadien-Block-Copolymer (PolymerFR) und können nach ihrer Nutzungsphase recycelt werden.

Derartige Bedingungen werden sich auch weiterhin ändern, dies zeigt z.B. die Diskussion um Titandioxid (TiO<sub>2</sub>)-Partikel. Sie werden unterhalb einer bestimmten Partikelgröße als karzinogener Stoff der Kategorie 2 eingeteilt. Daher bedarf es grundsätzlich Strategien beim Umgang mit sich verändernden Rahmenbedingungen und verändernden stofflichen Zusammensetzungen. Dies kann etwa durch eine Kaskadennutzung erfolgen, wo ein Einsatz der Rezyklate in unkritischeren Bereichen erfolgen kann.

Neben den rechtlichen Anforderungen können auch werkstofftechnische Aspekte das Recycling beeinflussen. So können zwischen den zahlreichen Additiven z. T. Unverträglichkeiten bestehen. Daher kann eine große Menge an Altkunststoffen derzeit nicht mechanisch recycelt werden, könnte jedoch in einem chemischen Recycling genutzt werden. Hierbei handelt es sich bei den Baukunststoffen insbesondere um solche Kunststoffe, die sich aufgrund veränderter rechtlicher Rahmenbedingungen nicht für ein mechanisches Recycling eignen.

#### **AP 4.2 Bewertung von Verwertungswegen**

Ziel von AP 4.2 „Bewertung von Verwertungswegen“ war die ökologisch und ökonomisch Bewertung der in AP 4.1 beschriebenen und der im Projekt weiterentwickelten Verwertungswege. Damit sollte die Relevanz des Recyclings von Kunststoffen im Baubereich insgesamt und Potenziale und Grenzen für die konkreten Verwertungswege ermittelt werden. Bei der ökologischen Bewertung sollten hierbei vor allem Leitindikatoren herangezogen werden, die wesentlich von verfahrenstechnischen Parametern der gewählten Verfahren abhängen.

Im Rahmen der ökologischen Bewertung wurden als Leitindikatoren die Treibhausgasemissionen (THG) und der kumulierte Energieaufwand (KEA) betrachtet, die wesentlich von verfahrenstechnischen Parametern der gewählten Verfahren abhängen.

Als Verfahren wurden die Pyrolyse und Wirbelschichtvergasung betrachtet. Weiterhin wurde eine hybride Recyclingkette aus Pyrolyse mit nachgeschalteter Flugstromvergasung untersucht. Die Pyrolyse ist in diesem kombinierten Recyclingkonzept weniger als maßgeblicher Konversionsschritt, sondern eher als thermochemische Stoffstromvorbereitung für die Flugstromvergasung anzusehen. Insgesamt wurden durch den Einbezug verschiedener Synthesegasqualitäten sechs verschiedene Verwertungswege bewertet.

Es zeigte sich, dass die verschiedenen Verfahrenskombinationen sich deutlich hinsichtlich der Treibhausgasemissionen und des kumulierten Energieaufwandes unterscheiden. Einen sehr wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben insb. auch die zu berücksichtigenden Gutschriften für die Produkte der thermochemischen Verfahren.

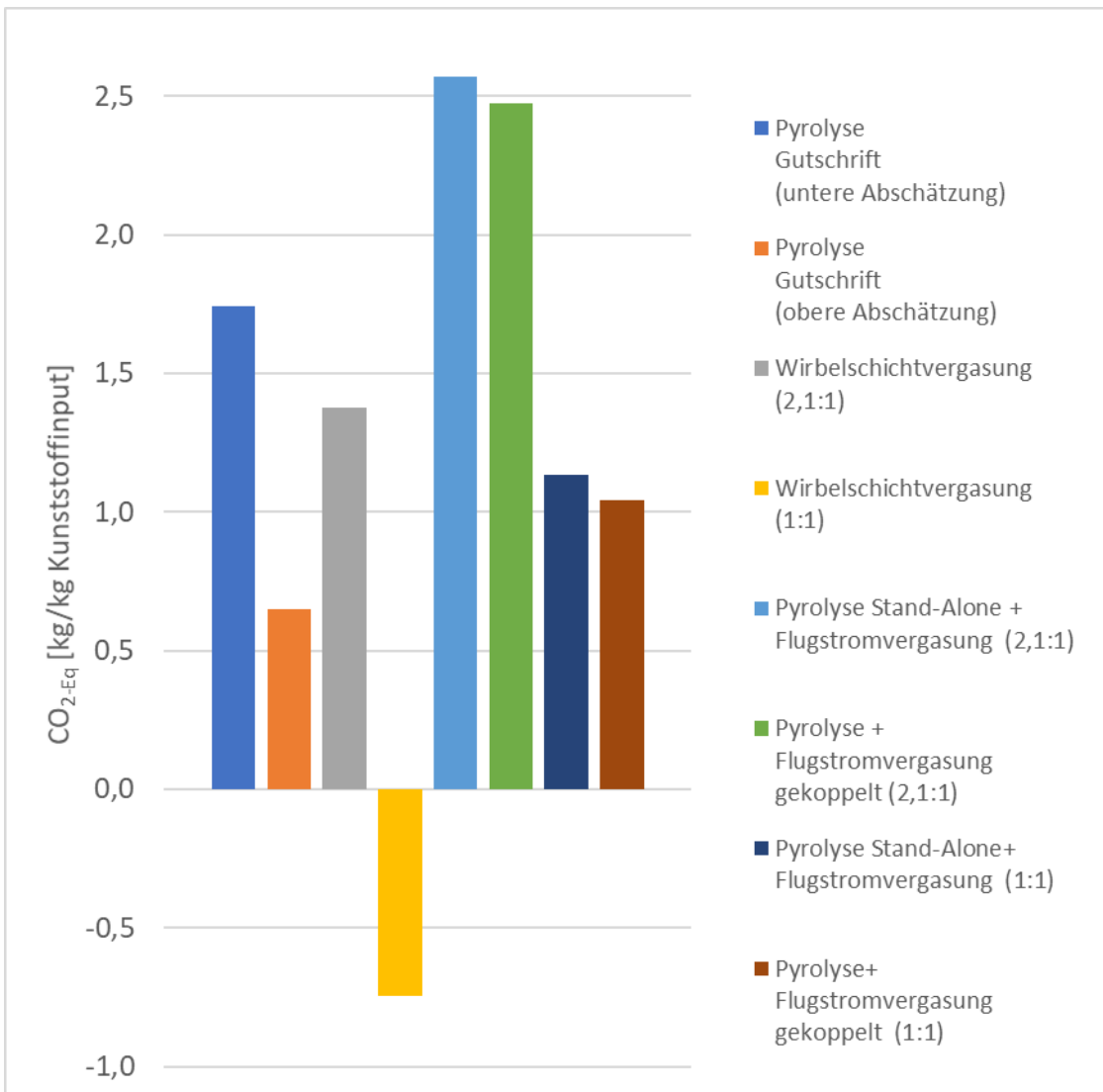


Abbildung 12: Treibhausgasemissionen der Anlagen mit Aufbereitung und Transport mit Aufwendungen und Gutschrift (Quelle: Wuppertal Institut)

Neben dem eigentlichen thermochemischen Verfahren wurden auch die Aufbereitung und der Transport der Altkunststoffe betrachtet. Es zeigte sich hierbei auch, dass die Schritte der mechanischen Aufbereitung und des Transports hinsichtlich der Ergebnisse gegenüber dem thermochemischen Verfahren nachrangig sind.

Es wurde auch untersucht, ob der zunehmende Einsatz von erneuerbaren Energien bei der Elektrizitätserzeugung einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis haben wird. Hierbei zeigt sich, dass dieser Einfluss nur gering ist, da die Herstellungsprozesse der Werkstoffe und der für die Gutschriften genutzten Stoffe, wie auch die Verfahren des chemischen Recyclings selbst nur einen geringen Bedarf an elektrischer Energie haben und als Rohstoff und Energieträger von den eingesetzten fossilen Brennstoffen oder Abfällen dominiert werden.

Die ökonomische Bewertung konnte aufgrund der nur grob zu ermittelnden Kosten nur abgeschätzt werden.

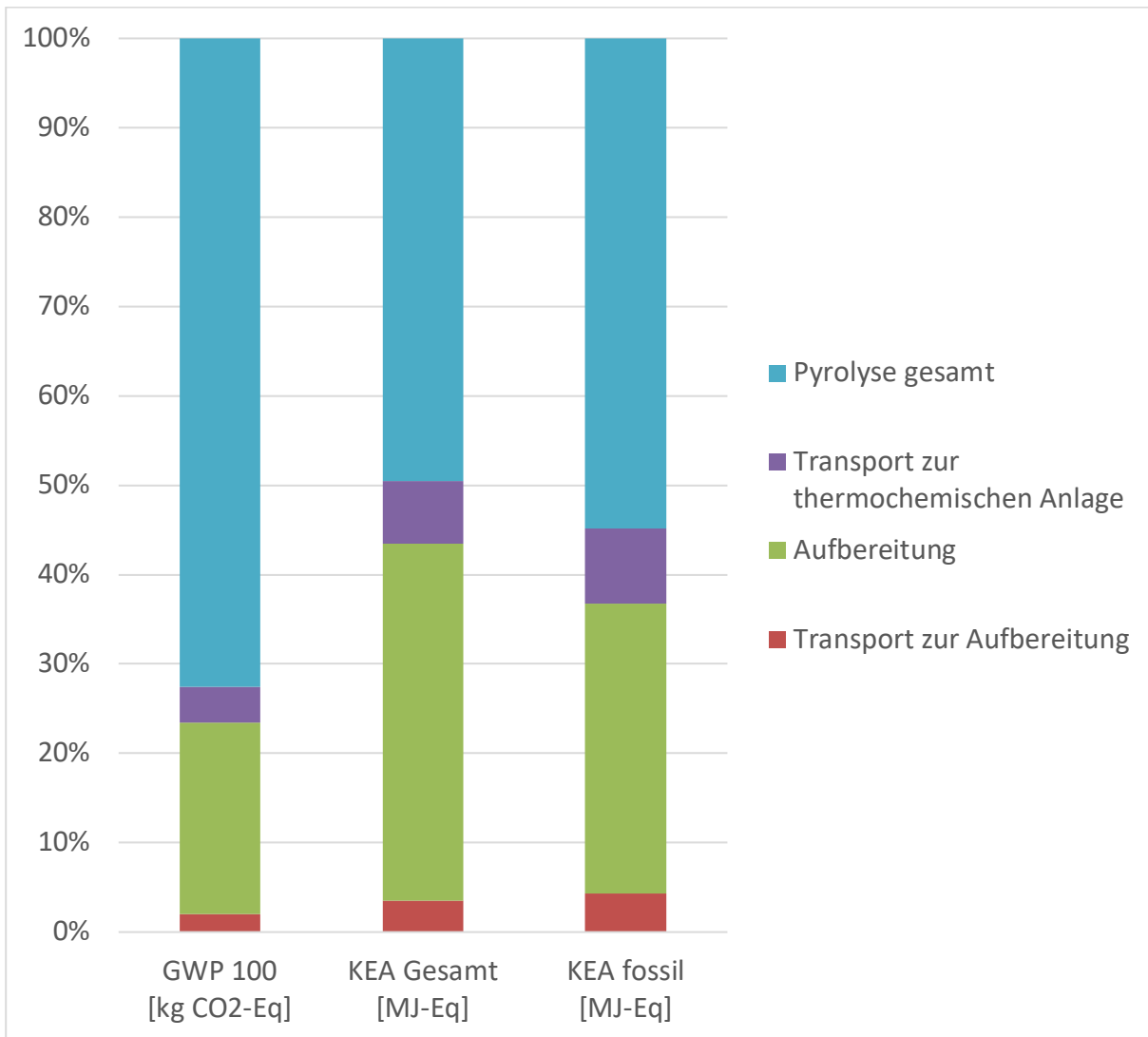


Abbildung 13: Beitrag der verschiedenen Schritte im Recyclingprozess zum Gesamtaufwand (Quelle: Wuppertal Institut)

## AP 5 und AP 6: DECHEMA e.V.

### AP 5 Konzept und Empfehlungen für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft kunststoffhaltiger Bauprodukte

Ziel von AP 5 war die Erstellung eines Konzepts, das darstellt, welche Erkenntnisse im Verbundprojekt KUBA im Hinblick auf eine nachhaltige Kreislaufführung von Kunststoffabfällen aus dem Baubereich gewonnen werden konnten und wie eine solche Kreislaufführung gestaltet und umgesetzt werden kann. In KUBA wurde hierzu schwerpunktmäßig das Beispiel der Kreislaufführung von Kohlenstoff mittels chemischem Recycling (insbesondere die im Projekt KUBA untersuchten Verfahren Pyrolyse, Vergasung sowie Kombinationen beider Verfahren) betrachtet. Dabei wurden die verschiedenen Abschnitte der Wertschöpfungskette (1) Produktion incl. Produktdesign, (2) Einbau und Nutzung, (3) Demontage und Rückbau, (4) (Erfassungs-)Logistik sowie (5) Aufbereitung und Verwertung (durch chemisches Recycling) näher betrachtet. Die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 1 – 4 dienten als Grundlage für die Analyse und Darstellung des Status quo der einzelnen Abschnitte der Wertschöpfungskette kunststoffhaltiger Bauprodukte und die weiterführenden Erkenntnisse, die durch die Forschungsarbeiten im Projekt KUBA gewonnen werden konnten. Für jeden Abschnitt wurden die jeweils involvierten Akteure genannt und Vorschläge formuliert im Hin-



blick auf eine Vernetzung mit weiteren Akteuren vor- und nachgelagerter Abschnitte der Wertschöpfungskette.

Übergreifende, regulatorische Rahmenbedingungen mit Bezug zum Gebäudesektor auf europäischer Ebene, wie z.B. die im Green Deal vorgesehenen Aktivitäten für energie- und ressourcenschonendes Bauen und Renovieren (u.a. die geplante „Renovierungswelle“ (COM(2020) 662 final), oder nationaler Ebene, wie z.B. das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm, wurden aufgeführt. Darüber hinaus wurden spezifisch für jeden Abschnitt der Wertschöpfungskette auch relevante, regulatorische Rahmenbedingungen untergliedert nach Vorgaben (a) des europäischen Rechts, (b) nationalen Richtlinien, Gesetzen und Verordnungen sowie (c) bestehender Normen und Standards aufgelistet.

Abschließend wurden Empfehlungen zu Handlungs- und Forschungsbedarf in das Konzept eingearbeitet.

In Zusammenarbeit mit den anderen KUBA Partnern wurde am 23.01.2020 ein Stakeholder Workshop mit rd. 40 Teilnehmenden durchgeführt. Ziel der Veranstaltung war, von unterschiedlichen Interessensgruppen Rückmeldungen zu den bisherigen Ergebnissen der Arbeitspakete einzuholen und bestehenden Forschungs- und Handlungsbedarf auszuloten.

Externe Teilnehmende waren VertreterInnen von folgender Institutionen: Arcadis Germany GmbH, Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V., Deutsche Umwelthilfe e.V., Fachvereinigung Extruderschäumstoff (FPX e.V.), Rewindo GmbH, Trägerverein Umwelttechnologie-Cluster Bayern e.V., Umweltbundesamt und Zentralverband Deutsches Baugewerbe e.V..

Nach einer Vorstellung und Diskussion der bisherigen Ergebnisse der KUBA Arbeitspakete folgte ein intensiver Austausch anhand von Leitfragen an Thementischen zu (1) Produktion/ Einbau, (2) Demontage/ Rückbau/ Logistik/ Aufbereitung und (3) Verwertung.

Dabei wurden von den Teilnehmenden folgende Themen, Aspekte und Bedarfe geäußert:

Zu (1) Produktion/ Einbau:

Um eine hohe Rezyklierbarkeit von Kunststoffen im Bausektor zu erreichen:

- Schaffung eines Commitments unter allen Beteiligten für ein „Design für Nachhaltigkeit“ und Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit bei Materialinnovationen
- Förderung der Kooperation zwischen den beteiligten Akteuren
- Ggf. Reduzierung der aktuell großen Vielfalt an Bauprodukten
- Reduzierung (verklebter) Verbindungen in Gebäudeteilen, bspw. durch „Klettverschlussystem“
- Herstellung modularer Bauteile und recyclinggerechter Produkte/ Konstruktionen zur Erhöhung der Rückbaubarkeit, z. B. demontagegerechtes Design für Wärmedämmverbundsysteme (WDVS)
- Schaffung einer Bauproduktedatenbank (Gebäudepass, BIM) zwecks Lieferung von Informationen für den Rückbau und die Nachnutzung von Bauprodukten/Bauteilen
- Etablierung von Anreizsystemen für die Herstellung recyclinggerechter bzw. ressourceneffizienter Gebäude /Bauprodukte; Stringente Bewertung der Recyclingfähigkeit von Bauprodukten; Erhöhung der Akzeptanz von Rezyklaten

Zu (2) Demontage/ Rückbau/ Logistik/ Aufbereitung:

- Einbringen der Thematik des zirkulären Bauens in die Ausbildung von Architekten und Handwerkern
- Schaffung eines bundeseinheitlichen stringenten Vollzugs und Einführung bundeseinheitlicher Rückbaustandards
- Bereitstellung unterschiedlicher Rückholssysteme (Hol-/Bringsystem) zur Erleichterung der Einbringung in den Kreislauf; Einführung eines Pfandsystems vor dem Hintergrund der Ressourcensicherung
- Einsatz modularer Bauteile zur Erhöhung der Rückbaubarkeit
- Erhöhung der Herstellerverantwortung

Zu (3) Verwertung

- Einstufung des chemischen Recyclings als Ergänzung zu limitiertem mechanischen/ werkstofflichen Recycling; Neudefinition der Rezyklatquote (z.B. Inkludieren des chemischen Recyclings)
- Sektorübergreifende Betrachtung von Systemen mit Blick auf chemisches Recycling, d.h. Betrachtung sämtlicher Abfallströme, nicht nur der Bauabfälle, um das Verfahren ökonomisch sinnvoll betreiben zu können.
- Vorantreiben innovativer Rohstoffnutzung aus Recyclingverfahren (z.B. Polymere, CO<sub>2</sub> etc.)
- Optimierung der sortenreinen Trennung und Verwertung von Mischfraktionen
- Ökobilanziert-basierte Selektion von Technologien
- Verstärkte Anwendung modularer Systeme

## AP 6 Projektmanagement

Ziel von AP 6 war die interne Projektkoordination sowie eine Unterstützung des Transfers der Projektergebnisse. Letzteres geschieht im Rahmen der Veröffentlichung des Konzepts aus AP 5 sowie durch verschiedene Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit

Seit Projektstart wurden folgende Aktivitäten im Rahmen von AP 6 seitens der DECHEMA durchgeführt:

- Entwurf und Koordination des Kooperationsvertrags zwischen den KUBA Partnern
- Erstellung und Abstimmung einer Übersichtspräsentation zu KUBA, welche den KUBA Projektpartner für die Vorstellung des Projektes zur Verfügung gestellt wird.
- Herausgabe einer Pressemitteilung zum Start des Projekts (06.02.2019, [https://dechema.de/06\\_2019\\_d.html](https://dechema.de/06_2019_d.html))
- Bericht zum Projektstart von KUBA in „DECHEMA aktuell“, Ausgabe 03/2019 (Journal für DECHEMA-Mitglieder)
- Bericht zu KUBA im DECHEMA Tätigkeitsbericht 2018 ([https://dechema.de/dechema\\_media/Downloads/Mitglied/T%C3%A4tigkeitsbericht/Taetigkeitsbericht\\_2018.pdf](https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Mitglied/T%C3%A4tigkeitsbericht/Taetigkeitsbericht_2018.pdf), S. 56/60)

- Poster zum Projekt KUBA beim Jahrestreffen der DECHEMA-Fachgruppen „Rohstoffe“ sowie „Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung“ (18.-19.03.2019, Frankfurt am Main)
- Poster zum Projekt KUBA am Stand des DECHEMA-Fokusthemas „Rohstoffe“ beim „DECHEMA-Tag“ (23.05.2019 in Frankfurt am Main)
- Poster zum Projekt KUBA bei der 10. ProcessNet-Jahrestagung und 34. DECHEMA-Jahrestagung der Biotechnologen 2020 (21.-24.09.2020, Web-Konferenz)
- Herausgabe einer Pressemitteilung zum Ende des Projekts (14.12.2020, [https://dechema.de/66\\_2020\\_d.html](https://dechema.de/66_2020_d.html))
- Bericht zu KUBA im DECHEMA Tätigkeitsbericht 2020 (Veröffentlichung erfolgt in 2021)
- Planung, Durchführung und Dokumentation von fünf Treffen der KUBA Projektpartner:
  - 06.12.2018 bei DECHEMA e.V. in Frankfurt am Main als Kick-off Veranstaltung zum Projektstart
  - 14.05.2019 bei INEOS Styrolution Group GmbH in Frankfurt am Main
  - 07.11.2019 bei der Arbeitsgemeinschaft PVC und UMWELT e.V. (AGPU) in Bonn
  - 29.04.2020 geplant bei PlasticsEurope Deutschland e.V., durchgeführt als Web-Konferenz
  - 06.08.2020 als Web-Konferenz
- Planung, Durchführung und Dokumentation von 15 Telefonkonferenzen mit den KUBA Projektpartnern

## **7. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,**

### **AP 1: FH Münster, IWARU**

Die Ausgaben für die Haushaltsjahre bewegen sich im Rahmen des ursprünglichen Gesamtfinanzierungsplanes. Der überwiegende Anteil der Fördermittel wurde als Personalmittel (Pos. 0812, 0817, 0822) für die konkrete Projektumsetzung (u.a. Vorbereitung, Aus- und Bewertung der Erhebungen und Recherchen), inkl. Unterstützung durch studentische Hilfskräfte, verwendet. Als sächliche Verwaltungskosten sind Reisekosten (Pos. 0846), u.a. für die Projekttreffen, angefallen.

Der genaue Nachweis über die Verwendung der finanziellen Mittel ist den zahlenmäßigen Berichten des Dezernats Finanzen der FH Münster zu entnehmen.

### **AP 2: Fraunhofer IML**

Die für die Durchführung des Vorhabens beantragten Personalkosten wurden wie geplant verwendet. Die geplanten Sachmittel wurden nicht abgerufen, da die Produktion von Druckerzeugen sich im Projektverlauf als nicht notwendig erwiesen hat. Aufgrund der Covid-19-Pandemie fanden deutlich weniger externe Veranstaltungen in Präsenzform statt, auf denen derartiges Material hätte verwendet werden können. Die beantragten Reisemittel wurden zu etwa 50% abgerufen. Aufgrund der Covid-19-Pandemie fanden im Projektzeitraum weniger Reisen für Baustellenbesuche und Konsortialtreffen statt. Konsortialtreffen wurden abweichend von der ursprünglichen Planung nicht als Präsenzmeetings, sondern virtuell durchgeführt.

Die vollständigen Details zur Mittelverwendung finden sich im zahlenmäßigen Nachweis.

### **AP 3.1 und AP 3.2: RWTH Aachen University, ANTS**

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises laut Verwendungsnachweis sind Personalkosten, Reisekosten und Sachkosten. Die für die Durchführung des Vorhabens beantragten Kostenpositionen wurden wie geplant verwendet.

### **AP 3.3: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

Die Zuwendungen, bestehend aus Fördermitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und Drittmitteln, die von Covestro Deutschland AG und BASF SE bereitgestellt wurden, sind vollständig für die geplante Arbeit des KIT innerhalb des Projekts genutzt worden. Die Kosten setzen sich hauptsächlich aus Personalkosten zusammen. Darüber hinaus sind Sachkosten bspw. für Verbrauchsmaterialien, projektbezogene Dienstreisen oder als Analysenkosten angefallen.

### **AP 4: Wuppertal Institut**

Die für die Durchführung des Vorhabens beantragten Personalkosten wurden wie geplant verwendet. Die Reisemittel wurden nicht im vorgesehenen Umfang abgerufen, da aufgrund der Covid 19-Pandemie weniger externe Veranstaltungen stattfanden.

Die genauen Angaben zur Mittelverwendung finden sich im zahlenmäßigen Nachweis.

### **AP 5 und AP 6: DECHEMA e.V.**

Die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises neben den Personalkosten stellt die Durchführung (v.a. Catering) des Stakeholder Workshops am 23.01.2020 dar.

## **8. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,**

### **AP 1: FH Münster, IWARU**

Die durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen. Sie entsprechen der im Projektantrag detailliert dargelegten Planung und die im Arbeitsplan formulierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet. Darüber hinaus mussten keine zusätzlichen Ressourcen zur Durchführung des Vorhabens aufgewandt werden.

### **AP 2: Fraunhofer IML**

Die im Rahmen des Projektes KUBA durchgeführten Arbeiten wurden mit einem angemessenen und notwendigen Ressourcenaufwand durchgeführt. Die im Rahmen der Projektbeantragung kalkulierten Mittel wurden entsprechend der Planung verwendet und das angestrebte Forschungsziel erreicht. Es wurden keine zusätzlichen Ressourcen für die Durchführung des Vorhabens verwendet.

### **AP 3.1 und AP 3.2: RWTH Aachen University, ANTS**

Die im Projektantrag geplanten Arbeiten sowie die dafür veranschlagten Kostenpositionen waren erforderlich und angemessen. Die vorgesehenen Arbeiten, welche dem Projektantrag zu entnehmen sind, wurden erfolgreich bearbeitet. Darüber hinaus mussten keine zusätzlichen Ressourcen zur Durchführung des Vorhabens aufgewandt werden.

### **AP 3.3: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

Um die Prozessketten für das chemische Recycling samt der charakteristischen Kenngrößen in AP 3.3 darstellen zu können, war eine fundierte Datenbasis von herausragender Bedeutung. Ziel war es, die Prozessketten-Bilanzierung möglichst vergleichbar zum Recycling des realen Abfallaufkommens im Baubereich zu gestalten, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Anwendung zu ermöglichen. Daher wurde Modell-WDVS des Projektpartners Sto SE & Co. KGaA als Einsatzstoff für die mechanische Aufbereitung verwendet und somit beispielsweise die Problematik mineralischer Bestandteile praxisnah abgebildet.

Die Auswahl dieses Ausgangsproduktes führte zur Notwendigkeit von experimentellen Untersuchungen und Simulationen für die thermochemische Konversion, da eine Datenbasis zur Prozessbewertung auf Grundlage von Literaturstudien nur unter weitreichenden Annahmen möglich wäre. Damit wäre die Vergleichbarkeit mit realen Anwendungen nur bedingt gewährleistet gewesen. Die Simulation zur Vergasung auf Grundlage von Einsatzstoffanalysen und institutseigenen Erfahrungen im Bereich der thermochemischen Umwandlung minderte den experimentellen Aufwand ohne die Datenbasis zu schwächen. Für Recyclingschritte mittels Pyrolyse waren zwingend Laborversuche nötig, um etwaige Vorbehandlungsschritte abschätzen zu können. Der eigentliche Pyrolyse-Konversionsschritt konnte durch die Untersuchungen im Technikumsmaßstab repräsentativ bewertet werden, da aufgrund des, im Vergleich zum Labormaßstab, höheren Durchsatzes, der Einfluss von Inhomogenitäten im Einsatzstoff ausgeglichen wird. Die Versuche waren dadurch allerdings auch mit einem höheren technischen und finanziellen Aufwand verbunden und mussten daher im Rahmen des VCI/PED-Projekts finanziert werden (siehe Berichtsteil I - Kapitel 5 oder Berichtsteil II – Kapitel 6). Detaillierte Analysen der Produktfraktionen hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung ließen Rückschlüsse auf die Kohlenstoff-Anteile zu, woraus neben den Gesamtmassen- und Energiebilanz auch eine Kohlenstoffbilanz ermittelt werden konnte. Auf diesen Daten aufbauend war letztlich erst eine fundierte Bilanzierung der Prozessketten und damit auch die Bewertung durch das Wuppertal Institut innerhalb des AP 4 möglich.

### **AP 4: Wuppertal Institut**

Die durchgeführten Arbeiten bauten aufeinander auf und haben durchgängig zum Erkenntnisgewinn beigetragen. Dies betrifft alle betrachteten Aspekte:

- Der Abgleich mit früheren Bewertungen
- Die grundsätzliche Einschätzung von Hindernissen insb. beim mechanischen Recycling und der damit verbundenen Frage der zur Verfügung stehenden Menge für ein chemisches Recycling
- Die Identifikation von Störstoffen
- Die perspektivische Entwicklung von Umweltbelastungen der betrachteten Verfahren
- Die durchgeführten Befragungen haben zur Fundierung der Arbeiten beigetragen

Schadstoffe und Additive spielen häufig eine relevante Rolle in Hinblick auf das Recycling. Sie können ein Recycling, insbesondere bei langlebigen Produkten erschweren. Dabei ist es wichtig zu berücksichtigen, dass die Problemstoffe keine abgeschlossene Gruppe darstellen, sondern es davon auszugehen ist, dass auch zukünftige weitere Stoffe hinzukommen. Daher ist es wichtig, Strategien zu entwickeln, die entweder Möglichkeiten zur Ausschleusung bieten oder etwa Kaskadierungen erfolgen können, die einen Einsatz derartiger Stoffe dort zulassen, wo hinsichtlich des jeweiligen Störstoffes weniger hohe Anforderungen bestehen.

Die ökologische und ökonomische Bewertung der entwickelten Verfahren stellt einen wesentlichen Schritt für die Beurteilung der Verfahren und ihrer Weiterentwicklung dar. Hierbei konnten im Rahmen der Arbeiten auch deutliche Unterschiede zwischen den Verfahren ermittelt werden.

Dynamisierung in Hinblick auf veränderten Strommix: Dieser hat anders als ursprünglich erwartet in dem konkreten Fall keinen großen Einfluss auf die Bewertung der Verfahren.

#### **AP 5 und AP 6: DECHEMA e.V.**

Die durchgeführten Arbeiten waren angemessen und notwendig, um die im Projektantrag dargelegten Ziele zu erreichen.

Die Durchführung des Stakeholder Workshops war notwendig, um zu diesem Zeitpunkt, an dem die Arbeiten im Projekt zwar schon fortgeschritten, aber noch nicht abgeschlossen waren, die Einschätzung wichtiger Stakeholder abzufragen und diese in die weitere Projektbearbeitung integrieren zu können. Für eine gute Abstimmung unter den KUBA-Partnern war ein regelmäßiger Austausch über Projekttreffen und monatliche Telefonkonferenzen notwendig.

Um auf das Projekt KUBA und die hier stattfindenden Arbeiten aufmerksam zu machen, wurden Informationen zum Projekt in Form von Berichten und Postern auf Veranstaltungen veröffentlicht.

### **9. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,**

#### **AP 1: FH Münster, IWARU**

##### *Wirtschaftliche Erfolgsaussichten*

- Verbesserung künftiger Projektakquise durch die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse (u.a. Beteiligung an der BMBF-Ausschreibung KuRT Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Kunststoffrecyclingtechnologie, Juli 2020)
- Erweiterung des Netzwerkes an potenzielle Projektpartnern für zukünftige Projekte
- Schaffung von Qualifizierungsstellen für wissenschaftliches Personal

##### *Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten*

- Anwendung in der Lehre (u. a. in den Bachelor- und Mastermodulen im Fachbereich Bauingenieurwesen)
- Weitere Betrachtung ausgewählter Fragestellungen im Rahmen des Forschungskollegs VERBUND.NRW (ab 2021)
- Weitere forschungsbezogene Qualifizierung der hierüber finanzierten Beschäftigten

- Ausbau der Fähigkeit des wissenschaftlichen Arbeitens bei den studentischen Hilfskräften durch deren Einbindung in die Recherche und Berechnungen
- Publikation einer nationalen Veröffentlichung (in 2021)

*Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit*

- inhaltlicher Transfer der gewonnenen Erkenntnisse in weitere praxisbezogene Projekte. Zielsetzung hierbei ist kurz- und mittelfristig die Entwicklung von Konzepten zur Steigerung der Ressourceneffizienz für weitere Stoffströme aus dem Baubereich. Damit wird mittel- und langfristig eine Erweiterung der vorhandenen Kompetenzfelder angestrebt

**AP 2: Fraunhofer IML**

*Wirtschaftliche Erfolgsaussichten*

- Verbesserung zukünftiger Projektakquisitionen von öffentlich geförderten oder industriefinanzierten Projekten durch die im Projekt gewonnenen Ergebnisse und angewendeten Methoden
- Fortentwicklung des existierenden Netzwerkes von Akteuren aus dem Bereich der Circular Economy für Kunststoffe

*Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten*

- Einbringen der Forschungsergebnisse in weitere Forschungsprojekte am Fraunhofer IML und Fortentwicklung des Forschungsfeldes Circular Economy mit dem Schwerpunkt Kunststoffe
- Publikation einer nationalen Veröffentlichung (in 2021)

*Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit*

- Durch den Eingang der Projektergebnisse sowie die zu ihrer Erreichung angewendeten und entwickelten Methodiken über das abgeschlossene Projekt hinaus tragen sie zu Forschungsarbeiten in den Themengebieten Sammlungs- und Erfassungssysteme sowie Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe z. B. im Rahmen des Fraunhofer Cluster of Excellence Circular Plastics Economy CCPE des Fraunhofer IML bei
- Ferner wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse im Rahmen der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit anderen Stoffströmen geprüft und Methodiken in entsprechenden durch die Industrie oder öffentliche Hand finanzierten Forschungsprojekten angewendet

**AP 3.1 und AP 3.2: RWTH Aachen University, ANTS**

*Wirtschaftliche Erfolgsaussichten*

- Das ANTS arbeitet aktiv an der Fortschreibung der Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Kreislaufwirtschaft in der Bauwirtschaft. Im Rahmen der BMBF-Ausschreibung „KuRT“ wurde ein Projektantrag, der auf den Ergebnissen von KUBA aufbaut, mit erarbeitet und eingereicht
- Durch das Forschungsprojekt konnte das ANTS seine Vernetzung mit anderen Hochschulen, Verbänden und Unternehmen der Wirtschaft deutlich stärken

#### *Wissenschaftliche Erfolgsaussichten*

- Die im Projektverlauf generierten Daten werden intern zum Aufbau einer Datenbank u.a. als Grundlage für die detailliertere Erstellung von Ökobilanzen verwendet
- Als universitäre Einrichtung mit entsprechendem Lehrauftrag werden die Ergebnisse in aufbereiteter Form zur Verbesserung bzw. Aktualisierung der Lehrveranstaltungen eingesetzt
- Zudem wird angestrebt, die Erkenntnisse des Vorhabens in einer Fachzeitschrift in 2021 zu publizieren
- Im Rahmen des eingeworbenen Forschungskollegs NRW soll die Thematik der Verbundwerkstoffe unter technischen und ökobilanziellen Gesichtspunkten weiter vertieft werden (ab 2021)

#### *Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit*

- Durch den Know-how Gewinn bei aufbereitungstechnischen Aufschluss- und Sortierthemen konnte ANTS seine Expertise im Bereich technischer Verarbeitungsprozesse von kunststoffhaltigen Abfallströmen weiter vertiefen
- Die Verknüpfung von technischer und ökologischer Expertise zu o.g. Themenfeldern bietet für die Zukunft gute Möglichkeiten für die interdisziplinäre Zusammenarbeit bei Projekten mit dem Fokus auf insbesondere recyclingkritische Verbundwerkstoffe

### **AP 3.3: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

#### *Wirtschaftliche Erfolgsaussichten*

- Die Arbeiten aus AP 3.3 bieten eine Datengrundlage zur Bewertung von Recyclingtechnologien für die Akteure der chemischen Industrie und Abfallwirtschaft. Mit dem ganzheitlichen Bewertungscharakter des KUBA-Projekts können erstmals kombinierte Prozessvarianten aus abgestimmtem mechanischem und chemischem Recycling betrachtet werden, was in Bezug auf Kreislaufwirtschaft ein wichtiges Vorgehen für Kunststoffabfälle aus dem Baubereich darstellt. Damit wird für diesen Bereich der bisher nicht recycelbaren Kunststoffe ein potentieller Recyclingweg aufgezeigt und eine Basis für weitergehende techno-ökonomische Betrachtungen gelegt.

#### *Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten*

- Die Arbeiten in AP 3.3 tragen maßgeblich dazu bei, die Expertise im Bereich des chemischen Recyclings realer Kunststoffabfälle auszubauen. Die Ergebnisse und Erfahrungen ergänzen andere Arbeiten des Instituts auf dem Gebiet des rohstofflichen Recyclings von mineralischen Bauabfällen und der Pyrolyse verschiedener Kunststoffe und kunststoffhaltiger Abfälle. Dadurch kann ein wichtiger Beitrag am Übergang beider verfahrenstechnischer Prozesse geleistet werden und ein weiterer Fortschritt bezüglich des wissenschaftlichen Institutsziels, der Erforschung von Möglichkeiten zur Schließung des anthropogenen Kohlenstoffkreislaufs, erzielt werden.
- Gleichzeitig erweitern die Publikationen die öffentlich verfügbare Datenbasis, was neue Möglichkeiten für tiefergehende Forschung oder vergleichende Studien im chemischen Recycling bietet. Darüber hinaus nutzt das Institut für Technische Chemie die Erkenntnisse aus dem Forschungshaben, indem es diese in den Lehrbetrieb einbindet und so Studierenden einen Einblick in die Forschungsarbeit und den aktuellen Stand der Wissenschaft bietet.



#### *Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit*

- Für eine Realisierung ist insbesondere Technologieentwicklung im Bereich der Pyrolyse erforderlich, um zu einer Demonstration im größeren Maßstab zu gelangen. Partner des KUBA-Projektkonsortiums entwickeln hierzu zielgerichtet Anschlussvorhaben. Im Rahmen der BMBF-Ausschreibung „KuRT“ wurde ein Projektantrag eingereicht.
- Die wissenschaftlichen Erkenntnisse fließen durch Publikationen, Beiträge bei Fachkonferenzen oder anderen Plattformen des fachlichen Austauschs in den wissenschaftlichen Diskurs ein, um die Allgemeinheit für dieses wichtige Thema weiter zu sensibilisieren und neue Forschung und Entwicklungen im chemischen Recycling von kunststoffhaltigen Abfallstoffen anzuregen.

#### **AP 4: Wuppertal Institut**

##### *Wirtschaftliche Erfolgsaussichten*

- Als gemeinnütziges Forschungsinstitut verfolgt das Wuppertal Institut keine wirtschaftlichen Verwertungsinteressen der Forschungsergebnisse, es ist jedoch an wissenschaftlichem Erkenntnisgewinn interessiert

##### *Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten*

- Die Ergebnisse schaffen eine Grundlage zur besseren Einschätzung des ökologischen und ökonomischen Nutzens verschiedener Recyclingverfahren und verbreitern damit die Entscheidungsgrundlage bei der Auswahl von Recyclingverfahren
- Es ist vorgesehen die Projektergebnisse in einem englischsprachigen Journal zu veröffentlichen (2021)

##### *Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit*

- Es ist vorgesehen, die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse für die Akquise und Bearbeitung weiterführender Projekte und Untersuchungen zu verwenden. Die Ergebnisse werden in die Arbeiten des Wuppertal Instituts zum chemischen Recycling von Kunststoffen einfließen und dazu beitragen, eine breitere Grundlage für die ökologische und ökonomische Bewertung von Recyclingverfahren schaffen.

#### **AP 5 und AP 6: DECHEMA e.V.**

##### *Wirtschaftliche Erfolgsaussichten*

- Mittel-/langfristig kann das Thema in die Tagungsveranstaltungen der DECHEMA aufgenommen werden, um so weiterhin eine Plattform für einen Austausch zu weiteren wissenschaftlichen Fortschritten und perspektivisch einer wirtschaftlichen Umsetzung der Forschungsergebnisse und -erkenntnissen zu bieten. Beispielsweise ist bei der „ACHEMA Pulse“ am 15.-16.06.2021 eine Highlight Session zum Thema „Chemisches Recycling“ geplant.

##### *Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten*

- Durch die Durchführung der Arbeiten in KUBA konnten bei der DECHEMA die bestehenden Kompetenzen auf den Gebieten der Betrachtung und Bewertung von Rahmenbedingungen, der Ableitung von Empfehlungen zu Handlungs- und Forschungsbedarf sowie der Koordination von Forschungsprojekten ausgeweitet werden durch thematisch neue Aspekte der

nachhaltigen Nutzung von Kunststoffen aus der Bauwirtschaft und Gebäuden und der Zusammenführung der Ergebnisse in einem übergreifenden Konzept. Auf wissenschaftlich-technischer Ebene besteht für DECHEMA kurzfristig die Möglichkeit, entsprechende Vorträge bei Fachtagungen und Konferenzen zu halten. Kurz-/langfristig ermöglicht die Arbeit in KUBA eine verbesserte Zusammenarbeit mit Akteuren der nachhaltigen Kunststoffwertungskette im Baubereich, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen und Transferstellen.

- Mittel-/langfristig schafft die Arbeit in KUBA Know-how zur Kompetenzerhaltung bei der DECHEMA. Die Projektergebnisse können, soweit öffentlich kommunizierbar, in geeigneten Gremien der DECHEMA, insbesondere die DECHEMA-ProcessNet-Fachgruppen „Rohstoffe“ und „Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung“ eingebunden werden. Über die o.g. Einbindung in Gremien und Veranstaltungen werden branchenübergreifende Nutzungsfelder eröffnet und die Verbreitung des Know-how aus dem Projekt vorangetrieben.

#### *Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit*

- Für die DECHEMA besteht die Möglichkeit, die gewonnenen Erkenntnisse für das Initiieren weiterer Kooperationsprojekte auf nationaler und internationaler Ebene, wie z.B. der BMBF-Bekanntmachung „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Kunststoffrecyclingtechnologien (KuRT)“ zu nutzen. Zudem kann die Thematik z. B. in Form von praxisorientierten Veranstaltungen fortzuführen, bei welchen auch öffentliche Stellen über die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse informiert werden. Hierfür ist für Januar 2021 ein Fachgespräch geplant.
- Zudem erfolgt auch eine Integration und Weiterentwicklung der Ergebnisse in den DECHEMA-ProcessNet-Fachgruppen „Rohstoffe“ und „Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung“ und das Thema wird im Rahmen der jährlich stattfindenden Vortragsveranstaltung der Fachgruppen adressiert.
- Darüber hinaus dienen die gewonnenen Erkenntnisse und neuen Kontakte aus KUBA kurz- / mittelfristig der Weiterentwicklung des DECHEMA-Fokusthemas Rohstoffe und ergänzen die Schwerpunkte, die bisher hier bearbeitet werden, um Aspekte der nachhaltigen Nutzung von Kunststoffen aus der Bauwirtschaft und Gebäuden.

### **10. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,**

#### **AP 1: FH Münster, IWARU**

Im Rahmen der Informationsrecherchen wurden vier relevante Projekte mit einem thematischen Bezug zu dem hier dargestellten Vorhaben identifiziert:

- Conversio-Studie: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019 ([www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html](http://www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html))
- Conversio-Studie: Kunststoffrelevante Abfallströme in Deutschland 2019 ([www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html](http://www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html))
- Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (ENOB:dataNWG; [www.datanwg.de](http://www.datanwg.de))
- Conversio-Studie: Waste generation, waste streams and recycling potentials of HBCD-containing EPS/XPS waste in Europe and forecast model up to 2050 (unveröffentlicht)

Relevante Ergebnisse wurden bei der Bearbeitung des vorliegenden Projekts berücksichtigt. Darüber hinaus fand ein regelmäßiger Austausch mit den assoziierten Projektpartnern sowie Fachkollegen auf diversen Veranstaltungen (Seminaren, Tagungen, Fachkolloquien) sowie im Rahmen von Arbeitskreissitzungen statt. Sich hierbei ergebende, für das KUBA-Projekt relevante Erkenntnisse, sind eingeflossen.

## **AP 2: Fraunhofer IML**

Das auf EU-Ebene zeitlich teilweise parallel verlaufende und kürzlich abgeschlossene COLLECTORS Project [1] adressiert ebenfalls die Rolle der (Getrennt-)Erfassung, fokussiert dabei neben Bau- und Abbruchabfällen auch andere Stoffströme. Im Bereich der Bau- und Abbruchabfälle wurden zwei Fallstudien durchgeführt, in deren Rahmen mittels einer Kosten-Nutzen-Analyse Vorteile der Nutzung differenzierter Systeme für die Erfassung nachgewiesen werden konnten. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Anwendungsfall in KUBA ist allerdings nicht direkt möglich, da im Rahmen des COLLECTORS Project einerseits Fallstudienbasiert gearbeitet wurde und entsprechende Verallgemeinerungen schwierig sind. Andererseits erfolgte eine ganzheitliche Betrachtung des anfallende Stoffstroms der Bau- und Abbruchabfälle inkl. des massenmäßig sehr bedeutenden Mineralikanteils [2].

Ferner konnten im Projektverlauf verschiedene Weiterentwicklungen auf dem Feld der zur Unterstützung und Verbesserung von Erfassung und Rückführlogistik eingesetzten Technologien beobachtet werden. Insbesondere ist der Zugang zu Informations- und Kommunikationstechnologie einfacher geworden und Hard- und Software sind bei gleichen oder niedrigeren Kostenniveaus leistungsfähiger geworden. Beispiele hierfür sind 5G- und Narrowband-IoT- basierte Sensorikdevices, die mit deutlich geringeren Kosten verbunden sind als noch zur Zeit der Beantragung des Projektes. Die Nutzung dieser Technologien ermöglicht eine echtzeitnahe, aktorsübergreifende Vernetzung und Weitergabe von Informationen. Auf diese Weise lassen sich die in der Potenzialanalyse identifizierten Vorteile durch Einführung von (bspw.) Nachverfolgungssystemen zur effizienteren Logistikkabwicklung, Integration und Planung von Supply Chain-Prozessen einfacher und kostengünstiger realisieren als zu Beginn der Projektbearbeitung. Von einer weiteren Kostenreduktion ist in diesem Kontext auszugehen.

## **AP 3.1 und AP 3.2: RWTH Aachen University, ANTS**

Im Mai 2019 wurde ein Abschlussbericht des Projektes „Recycling von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS)“ veröffentlicht. Förderkennzeichen L7516026-16028. Laufzeit: 01.06.2016 – 31.12.2018. Mitwirkende Institutionen waren das Institut für interdisziplinäre Innovationen der technischen Hochschule Nürnberg und das Fraunhofer Institut für chemische Technologie.

Inhaltlich wurden orientierende Versuche zum mechanischen Recycling von WDVS durchgeführt, um geeignete Technologien für ein Recycling von WDVS zu identifizieren. Jedoch wurde, im Gegensatz zu den durchgeführten praktischen Versuchen in AP 3, das Augenmerk auf eine grundsätzliche technische Machbarkeit in Korngrößenbereichen um 1 mm gelegt. Die Aspekte der mechanischen Prozesskettengestaltung und des Up-Scaling, welcher Teil des KUBA-Projektes waren, wurden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Ebenso wurden Arbeitsinhalte der Arbeitspakete 1 und 2 des KUBA-Projektes, welche sich mit der Identifizierung von Abfallmenge und Logistik befassen, im vorgenannten Projekt nicht betrachtet.

### **AP 3.3: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

Dem KIT sind keine neuen Ergebnisse auf dem Forschungsgebiet des Vorhabens durch andere Stellen bekannt.

### **AP 4: Wuppertal Institut**

Ziel des Vorhabens war insbesondere die konkrete Beurteilung der entwickelten Verfahren.

Generell wurden und werden derzeit an verschiedenen Stellen weitere Arbeiten zur Beurteilung des chemischen Recyclings vorangetrieben. Dies erfolgt in verschiedenen Projekten etwa:

- Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes, Forschungskennzahl 3716 33 325 0 im Auftrag des Umweltbundesamtes
- SCI4climate.NRW, Wissenschaftliches Kompetenzzentrum NRW für eine klimaneutrale und zukunftsfähige Industrie gefördert vom Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen

## **11. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6.**

### **AP 1: FH Münster, IWARU**

Nachfolgend werden die bereits erfolgten und geplanten Vorträge/Veröffentlichungen, die aus dem Projekt heraus entstanden sind bzw. in die Daten aus dem Projekt eingeflossen sind, aufgelistet.

#### **Erfolgte Vorträge**

- Walter, G.: Circular Economy-eine Herausforderung für Tief- und Straßenbau?!, Seminar: Geokunststoffe im Straßen- und Ingenieurbau, Münster, 03.03.2020
- Flamme, S.: Herausforderung für eine Kreislaufführung. Cradle to Cradle Fachforum. Berlin, 27.11.2019.
- Flamme, S.: Ressourcenwende in der Bauwirtschaft – wohin strebt die Wissenschaft – wo muss geforscht und was muss entwickelt werden? Konferenz Ressourcenwirtschaft in der Bauwirtschaft, re!source Stiftung e.V., Berlin, 08.05.2019.
- Flamme, S.: Circular Economy – eine Herausforderung für die Geotechnik. 11. Geokunststoff-Kolloquium, Rheinsberg, 25.01.2019.
- Flamme, S., Lichtiginghagen-Wirths, M., Walther, G., Quicker, P.: Netzwerk zirkuläre Wertschöpfung: metabolon. Düsseldorf, 05.02.2019.
- Flamme, S., Stretz, C.J., Walter, G.: Ressourcen im anthropogenen Lager der Bauwirtschaft. In: Müll und Abfall, 3/2019, S. 143-149.
- Heller, N., Messow, E., **Flamme, S.**, Simons, M.: Verwertungswege für EPS-haltige Wärmedämmverbundsysteme. In: 16. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, 2019, Band 18, ISBN 978-3-9811142-7-0, S. 155-164.

#### **Geplante Veröffentlichungen**

- Kunststoffbestand im Baubereich, geplant in der Zeitschrift: Müll und Abfall, 2021

## **AP 2: Fraunhofer IML**

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens seitens Fraunhofer IML erstellten Ergebnisse werden im Rahmen des in Arbeitspaket 5 erstellten Konzeptes zur Umsetzung der Circular Economy für Kunststoffprodukte in der Bauwirtschaft und in Gebäuden veröffentlicht.

Methodische und inhaltliche Ergebnisse finden Eingang in die weitere Arbeit des Fraunhofer IML und fließen über diesen Weg auch mittelbar in weitere Veröffentlichungen ein. Separate Veröffentlichungen nur auf Basis der Ergebnisse aus dem Arbeitspaket 2 sind derzeit nicht in Planung.

Ferner erfolgt die Kommunikation der Projektergebnisse über Pressemitteilungen des Konsortiums sowie im Rahmen der Außenkommunikation des Fraunhofer IML (Website, Jahresberichte, etc.).

## **AP 3.1 und AP 3.2: RWTH Aachen, ANTS**

Geplante Veröffentlichung:

Nachfolgend werden die bereits erfolgten und geplanten Vorträge/Veröffentlichungen, die aus dem Projekt heraus entstanden sind bzw. in die Daten aus dem Projekt eingeflossen sind, aufgelistet.

- Simons, M.; Vortrag zum Thema: Untersuchungen zur mechanischen Vorkonzentraterzeugung als Prozessschritt zur stofflichen Verwertung von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS); Fachtagung Aufbereitung und Recycling; Freiberg; 7. und 8. November 2019
- Heller, N., Messow, E., Flamme, S., Simons, M.: Verwertungswege für EPS-haltige Wärmedämmverbundsysteme. In: 16. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, 2019, Band 18, ISBN 978-3-9811142-7-0, S. 155-164.

Es ist u.a. geplant, mit dem KIT eine gemeinsame Veröffentlichung zum technischen Verwertungskonzept in einer Fachzeitschrift zu veröffentlichen.

## **AP 3.3: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

Das KIT erarbeitet derzeit in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen eine Veröffentlichung der experimentellen Ergebnisse der erstmals dargestellten vollständigen Prozesskette zum chemischen Recycling von WDVS.

Darüber hinaus veröffentlicht das KIT im Rahmen des mit dem Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) und PlasticsEurope Deutschland e.V. (PED) durchgeführten Projekts „Bewertungsgrundlagen der Pyrolyse von gemischten Kunststoffabfällen“ die Ergebnisse der Pyrolyseversuche im Technikumsmaßstab. Einige Zwischenergebnisse sind mit Einverständnis von VCI und PED, sowie in Absprache mit dem Projektkonsortium, bereits bei der ProcessNet-Jahrestagung am 24.09.2020 veröffentlicht worden [2].

Die Endergebnisse des VCI-PED-Projekts sollen weiterhin als Beitrag auf der Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz ursprünglich angesetzt für Januar 2021, nun aber verschoben auf Juni 2021, veröffentlicht werden. Die Daten zur Pyrolyse des Vorkonzentrats aus polystyrolbasierten WDVS, die auch in diesem Projekt verwendet werden, sind hierbei enthalten.

#### **AP 4: Wuppertal Institut**

Bisher erfolgte keine Veröffentlichung von Projektergebnissen.

Eine Veröffentlichung der Projektergebnissen in einem englischsprachigen peer-reviewed Journal (open access) ist geplant.

#### **AP 5 und AP 6: DECHEMA e.V.**

Folgende Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit wurden durchgeführt bzw. sind geplant:

- Herausgabe einer Pressemitteilung zum Start des Projekts (06.02.2019, [https://dechema.de/06\\_2019\\_d.html](https://dechema.de/06_2019_d.html))
- Bericht zum Projektstart von KUBA in „DECHEMA aktuell“, Ausgabe 03/2019 (Journal für DECHEMA-Mitglieder)
- Bericht zu KUBA im DECHEMA Tätigkeitsbericht 2018 ([https://dechema.de/dechema\\_media/Downloads/Mitglied/T%C3%A4tigkeitsbericht/Taetigkeitsbericht\\_2018.pdf](https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Mitglied/T%C3%A4tigkeitsbericht/Taetigkeitsbericht_2018.pdf), S. 56/60)
- Poster zum Projekt KUBA beim Jahrestreffen der DECHEMA-Fachgruppen „Rohstoffe“ sowie „Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung“ (18.-19.03.2019, Frankfurt am Main)
- Poster zum Projekt KUBA am Stand des DECHEMA-Fokusthemas „Rohstoffe“ beim „DECHEMA-Tag“ (23.05.2019 in Frankfurt am Main)
- Poster zum Projekt KUBA bei der 10. ProcessNet-Jahrestagung und 34. DECHEMA-Jahrestagung der Biotechnologen 2020 (21.-24.09.2020, Web-Konferenz)
- Herausgabe einer Pressemitteilung zum Ende des Projekts (14.12.2020, [https://dechema.de/66\\_2020\\_d.html](https://dechema.de/66_2020_d.html))
- Bericht zu KUBA im DECHEMA Tätigkeitsbericht 2020 (Veröffentlichung erfolgt in 2021)