

TEXTE

151/2021

Förderung einer hochwertigen Verwertung von Kunststoffen aus Abbruchabfällen sowie der Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten im Sinne der europäischen Kunststoffstrategie

TEXTE 151/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl FKZ 3719 34 3140
FB000597

Förderung einer hochwertigen Verwertung von Kunststoffen aus Abbruchabfällen sowie der Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten im Sinne der europäischen Kunststoffstrategie

von

Dr. Phillip Bendix, Dr. Holger Berg, János Sebestyén,
Michael Ritthoff, Laura Perschel
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH,
Wuppertal

Daniela Eckert, Robin Kocina, Dr. Hermann Achenbach
SKZ – KFE gGmbH, Würzburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal

Abschlussdatum:

April 2021

Redaktion:

Fachgebiet III 1.6 Kunststoffe und Verpackungen
Dr. Petra Weißhaupt

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, November 2021

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

Kurzbeschreibung: Förderung einer hochwertigen Verwertung von Kunststoffen aus Abbruchabfällen sowie der Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten im Sinne der europäischen Kunststoffstrategie

Dieser Bericht beleuchtet die Kreislaufführung von Kunststoffen in ihrem zweitgrößten Anwendungsbereich, den Bauprodukten. Er untersucht Produktion, Rücknahme und Recycling von Bauprodukten aus Kunststoff, sowie den Einsatz von Kunststoffrezyklaten in Bauprodukten. Zusätzlich werden Kunststoffverpackungen von Bauprodukten behandelt. Die aktuelle Produktion von Baukunststoffen wird nach Mengen, Sorten und Produkten differenziert dargestellt, ebenso wie das sich entwickelnde anthropogene Kunststofflager. Die mengenmäßig relevanten Kunststoffsorten sind Polyvinylchlorid (PVC), Polyethylen (PE), expandiertes Polystyrol (EPS) und Polyurethan (PUR). Sie sind vor allem in Rohren, Profilen und Dämmungen verbaut. Die verschiedenen Rücknahmesysteme für Baukunststoffe werden vergleichend dargestellt und ihr Beitrag zum Recycling bewertet. Einzelne dieser Rücknahmesysteme ermöglichen ein hochwertiges Recycling. Die Recyclingtechnologien für Bauprodukte werden vorgestellt und die Thematik von Additiven als Hürden für ein hochwertiges Recycling behandelt. Die Chancen und Hindernisse des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten werden aus der Schnittmenge der verfügbaren Technologien, des Rezyklatangebotes und der Anforderungen an Bauprodukte aus Kunststoff abgeleitet. In Abhängigkeit einiger Faktoren, wie z. B. Rezyklatquellen, Degradation oder Produktanforderungen, muss im Einzelfall abgewogen werden, ob bzw. wie viel Recyclingmaterial eingesetzt werden kann. Grundsätzlich besteht aber Potenzial für die Steigerung des Rezyklateinsatzes. Der Einsatz von Kunststoffen als Verpackungsmaterial für Bauprodukte wird dargestellt und die Möglichkeit des Rezyklateinsatzes in diesen Verpackungen beleuchtet. Der Bericht schließt mit Empfehlungen an unterschiedliche Akteure, wie der Rezyklateinsatz in Bauprodukten und deren Verpackungen gefördert werden kann. Wichtige Punkte sind hierbei die Einführung einer Rezyklatquote für Folien als Bauproduktverpackungen und die Beschreibung von Recyclingmöglichkeiten und Rezyklatgehalt in der technischen Dokumentation von Bauprodukten.

Abstract: Promoting high-quality recycling of plastics from demolition waste and strengthening the use of recycled materials in construction products in line with the European Plastics Strategy

This report highlights the key aspects of a circular economy for plastics for their second largest application, construction products. It covers production, take-back and recycling of construction products made of plastics, as well as the use of plastic recyclates in construction products. In addition, plastic packaging of construction products is covered. The current production of construction plastics is presented differentiated by quantities, grades and products, as well as the resulting anthropogenic plastic stockpile. The plastic types relevant in terms of quantity are polyvinyl chloride (PVC), polyethylene (PE), expanded polystyrene (EPS) and polyurethane (PUR). They are mainly used in pipes, profiles and insulation products. The various take-back systems for construction plastics are compared and their contribution to recycling evaluated. Some of these take-back systems enable high-quality recycling. Recycling technologies for construction products are presented and the issue of additives as barriers to high-quality recycling is addressed. Opportunities and barriers to the use of recycled plastics in construction products are derived from the intersection of available technologies, recyclate supply, and technical requirements for construction products. Depending on some factors, such as recycled material sources, degradation or product requirements, it has to be weighed up in each individual case whether or how much recycled material can be used. In principle, however, there is potential for expanding the use of recyclates. The use of plastics as packaging material for construction products is presented and the possibility of using recycled plastics in this packaging is highlighted. The report concludes with recommendations to various stakeholders

on how to promote the use of recyclates in construction products and their packaging. Important points here are the introduction of a recycle quota for films as construction product packaging and the description of recycling possibilities and recycle content in the technical documentation of construction products.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis	15
Zusammenfassung.....	19
Summary	25
1 Einleitung.....	30
2 Marktrecherche für Bauprodukte aus Kunststoff in Deutschland	31
2.1 Methodik.....	31
2.1.1 Vorgehensweise bzgl. der Erstellung der Produktliste für Bauprodukte aus Kunststoff.....	31
2.1.2 Vorgehensweise bzgl. der Einschätzung aktueller Marktmengen.....	32
2.1.3 Vorgehensweise bzgl. der Betrachtung zum anthropogenen Lager.....	34
2.2 Erstellung der Produktliste für Bauprodukte aus Kunststoff	35
2.2.1 Navigation durch das Supplement.....	36
2.3 Einschätzung aktueller Marktmengen	37
2.3.1 Bauprodukte aus GfK.....	42
2.4 Betrachtungen zum anthropogenen Lager	43
2.5 Zusammenfassung	49
3 Rücknahmesysteme allgemein.....	51
3.1 Methodik.....	51
3.1.1 Literatur und Internetrecherche.....	52
3.1.2 Expert*inneninterviews	52
3.2 Literaturübersicht	52
3.3 Ergebnisse der Expert*inneninterviews	55
3.4 Rechtliche Lage hinsichtlich freiwilliger Rücknahmen von Abfällen.....	58
3.5 Analyse bestehender Rücknahmesysteme	59
3.5.1 Beschreibungen der Rücknahmesysteme.....	60
3.5.2 Beurteilung der freiwilligen Rücknahmesysteme	69
3.5.2.1 Rücknahme von PVC-Abfällen	69
3.5.2.2 Rücknahme von Bodenbelägen	70
3.5.2.3 Rücknahme von Rohren.....	71
3.5.2.4 Rücknahme von Agrarfolien	71
3.5.2.5 Rücknahme von Dämmmaterialien	72
4 Verwertungstechniken	73

4.1	Kunststoffkreislauf in der Baubranche.....	73
4.1.1	Mengenrelevante Kunststoffsorten.....	74
4.2	Schadstoffbelastungen und -entfrachtung	75
4.2.1	Additive in der Kunststoffverarbeitung	75
4.2.1.1	Stabilisatoren	76
4.2.1.2	Weichmacher	77
4.2.1.3	Pigmente	77
4.2.1.4	Biozide.....	77
4.2.1.5	Flammschutzmittel	78
4.2.2	Glasfasern und GFK.....	78
4.2.3	Schlussfolgerungen	79
4.3	Aufbereitungs- und Verwertungstechniken	80
4.3.1	Abfallerfassung und -Vorbehandlung	80
4.3.2	Sortierung und Reinigung	81
4.3.2.1	Zerkleinern	81
4.3.2.2	Reinigen	82
4.3.2.3	Sortieren	82
4.3.3	Recompounding von Thermoplasten	83
4.3.4	Werkstoffliches Recycling der für die Baubranche wichtigsten Kunststoffe	85
4.3.4.1	Recycling von Polyvinylchlorid	85
4.3.4.2	Recycling von Polyethylen	86
4.3.4.3	Recycling von Polypropylen	86
4.3.4.4	Recycling von Polystyrol	86
4.3.4.5	Recycling von Polyamid	87
4.3.4.6	Recycling von Polyurethan.....	87
4.3.4.7	Recycling von Bitumen.....	88
4.4	Bauproduktspezifische Recyclingverfahren	88
4.4.1	Rohre.....	88
4.4.2	Fenster-, Rollläden- und Türprofile.....	88
4.4.3	Dämmstoffe	88
4.4.4	PVC-Bodenbeläge.....	90
4.4.5	Kabelisolierungen	90
4.4.6	Textile Bodenbeläge	91
4.5	Recycling von GFK	91

4.5.1	Eigenschaften von GFK	91
4.5.2	Recycling	93
4.5.2.1	Mechanisches Recycling von GFK	94
4.5.2.2	Chemisches Recycling von GFK	95
4.5.2.3	Einsatz von GFK-Abfällen als Sekundärbrennstoff in Zementwerken	98
4.6	Zusammenfassung und Empfehlungen	101
5	Rezyklateinsatz in Bauprodukten aus Kunststoff	104
5.1	Allgemeines	104
5.2	Kunststoffabfall: Qualität und Quantität	104
5.3	Rezyklateinsatz	111
5.3.1	Grundanforderungen an Bauwerke nach der europäischen Bauproduktenverordnung EU-BauPVO	111
5.3.2	Allgemeine Voraussetzungen für den Einsatz von Rezyklaten	112
5.3.3	Einsatz von Rezyklaten in Rohren	115
5.3.3.1	Einschätzungen des Kunststoffrohrverbandes zum Rezyklateinsatz in Rohren	129
5.3.4	Rezyklateinsatz zur Herstellung von Fensterprofilen	130
5.3.5	Rezyklateinsatz bei der Herstellung von Dämmmaterialien	132
5.3.6	Rezyklateinsatz in sonstigen Bauprodukten	132
5.4	Produktkennzeichnung für die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen	136
5.5	Zusammenfassung und Empfehlungen	140
6	Kunststoffverpackungen für Bauprodukte	144
6.1	Einführung	144
6.2	Betrachtungsrahmen und Begriffsdefinitionen	144
6.2.1.1	Definition und Kategorisierung von Bauprodukten	144
6.2.1.2	Legaldefinition des Verpackungsbegriffs	145
6.2.1.3	Technische Kategorisierung von Verpackungen	146
6.2.2	Für das Verpacken von Bauprodukten eingesetzte Packmittel und Kunststoffe	148
6.2.3	Stoffstrombild für die eingesetzten Verpackungen	150
6.2.4	Abschätzung des Verpackungsaufkommens durch Bauprodukte	153
6.2.4.1	Quantifizierung des Verpackungsaufkommens auf unterschiedlichen Ebenen	153
6.2.4.2	Darstellung der Datenlage	154
6.2.4.3	Ergebnisse	156
6.3	Ökologische Steigerungspotenziale	157
6.3.1	Abfallvermeidung und Wiederverwendung	157

6.3.1.1	Verpackungsverzicht und optimiertes Verpackungsdesign.....	157
6.3.1.2	Wiederverwendbarkeit und Mehrwegsysteme.....	158
6.3.2	Werkstoffliche Verwertung	162
6.3.2.1	Recyclingfähigkeit	163
6.3.2.2	Getrennthaltung von Kunststoffverpackungsabfällen.....	165
6.3.2.3	Sortierung und Recycling von Kunststoffverpackungsabfällen	166
6.3.3	Rezyklateinsatz.....	168
6.3.3.1	Politische und ökologische Relevanz des Einsatzes von Kunststoffrezyklaten.....	168
6.3.3.2	Möglichkeiten des Einsatzes von Kunststoffrezyklaten in Bauproduktverpackungen	168
6.3.3.3	Beispiele für den Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen	172
6.3.3.4	Abschätzung des Mengenpotenzials für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten in Bauproduktverpackungen	175
6.4	Rezyklatquote für Folienprodukte	176
6.5	Empfehlungen und Maßnahmen	179
7	Empfehlungen	182
7.1	Technische Dokumentation / Produktkennzeichnung.....	182
7.2	Rezyklatquote für Folien für Bauproduktverpackungen.....	183
7.3	Anwendung des Design-for-Recycling	183
7.4	Erzeugung reiner Abfallströme	184
7.5	Regulierung von Additiven.....	185
7.6	Preisliche Konkurrenz der Rezyklate ermöglichen.....	185
7.7	Weitere Maßnahmen.....	186
8	Quellenverzeichnis	188
A	Anhang – Produktliste	204
B	Liste der relevanten Regularien	221

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Strukturierung der Produktliste am Beispiel der Flüssigkeitskunststoff-Abdichtungen aus PUR	32
Abbildung 2:	Ermittelte Produktionsmengen der vier aggregierten Anwendungsbereiche im Jahr 2017 in Tonnen	37
Abbildung 3:	Ermittelte verbaute Mengen der vier aggregierten Anwendungsbereiche im Jahr 2017 in Tonnen	38
Abbildung 4:	Verbaute Kunststoffmenge des Teilbereichs <i>Rohre</i> im Jahr 2017 in Tonnen	39
Abbildung 5:	Verbaute Kunststoffmenge des Teilbereichs <i>Profile</i> im Jahr 2017 in Tonnen	39
Abbildung 6:	Verbaute Kunststoffmenge des Teilbereichs Dämmung im Jahr 2017 in Tonnen	40
Abbildung 7:	Verbaute Kunststoffmenge des Teilbereichs <i>Sonstiges</i> im Jahr 2017 in Tonnen	41
Abbildung 8:	Ermittelte verbaute Menge nach Kunststoffsorte im Jahr 2017 in Tonnen	42
Abbildung 9:	Entwicklung der im Rahmen von Bau- und Abbruchabfällen getrennt erfassten Kunststoffabfälle (Abfallschlüssel 170203), angefallen im Inland zwischen 2005 und 2017	44
Abbildung 10:	Entwicklung der im Rahmen von Bau- und Abbrucharbeiten angefallenen gemischten Bauabfälle (Abfallschlüssel 170904, angenommener Kunststoffanteil 15 %), angefallen im Inland zwischen 2005 und 2017	44
Abbildung 11:	Entwicklung der im Rahmen von Bau- und Abbrucharbeiten angefallenen Dämmmaterial-Abfälle (Abfallschlüssel 170603 und 170604, angenommener Kunststoffanteil 12 %), angefallen im Inland zwischen 2005 und 2017	45
Abbildung 12:	Entwicklung der im Rahmen von Bau- und Abbrucharbeiten angefallenen Kabel- Abfälle (Abfallschlüssel 170411, angenommener Kunststoffanteil 30 %), angefallen im Inland zwischen 2005 und 2017	45
Abbildung 13:	Entwicklung der im Bereich der Landwirtschaft, des Gartenbaus, der Teichwirtschaft, der Forstwirtschaft, der Jagd und Fischerei angefallenen Kunststoffabfälle (Abfallschlüssel 020104, ohne Verpackungen), angefallen im Inland zwischen 2005 und 2017	46
Abbildung 14:	Jährlich verbaute Menge an Bauprodukten aus Kunststoff (Input) für den Zeitraum 2003 bis 2017 einschließlich geschätzter Entwicklung des Inputs bzgl. des anthropogenen Lagers bis ins Jahr 2030	49
Abbildung 16:	Ermitteltes Abfallaufkommen von ausgedienten Bauprodukten aus Kunststoff (Output) für den Zeitraum 2005 bis 2017	

	einschließlich geschätzter Entwicklung des Outputs bzgl. des anthropogenen Lagers bis ins Jahr 2030	49
Abbildung 16:	Kunststoffkreislauf in der Baubranche	74
Abbildung 17:	Beispielhafter Ablauf der Abfallvorbehandlung gemischter Bau- und Abbruchabfälle	81
Abbildung 18:	Lage der Bindemittel, hydraulischen Zusatzstoffe und Gläsern für Glasfasern im System $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (Angaben in Masse-%)	100
Abbildung 19:	Anteilige Entwicklung der Verwertungsart von Kunststoffabfällen aus allen anderen Bereichen als dem Baubereich im Zeitraum von 2007 bis 2017	106
Abbildung 20:	Anteilige Entwicklung der Verwertungsart von Kunststoffabfällen aus dem Baubereich im Zeitraum von 2007 bis 2017	107
Abbildung 21:	Kunststoffabfälle 2017 nach Kunststoffsorte und -herkunft in Kilotonnen	108
Abbildung 22:	Zeitstand-Innendruckverhalten an Rohren aus unterschiedlich häufig extrudiertem PE.....	114
Abbildung 23:	Fensterprofilsystem mit Rezyklatanteil durch Einbringung von Rezyklat in den Profilkern.....	131
Abbildung 24:	Stoffstrombild der Wertschöpfungskette von Kunststoffverpackungen, die zum Verpacken von Bauprodukten verwendet werden.	152

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Nutzungsdauern von Bauteilen und -produkten aus Kunststoffen	47
Tabelle 2:	Vergleich der Möglichkeiten der Wiederverwertung nach erfolgter Rücknahme nach (Thierry u. a. 1995).....	54
Tabelle 3:	Vergleich der für Rücknahmesysteme verwendeten Rückwärtslogistik mit normaler Vorwärtslogistik nach (Hallmann und Jäger 2010).....	55
Tabelle 4:	Mengenmäßig im Jahr 2017 meistverbaute Kunststoffsorten in vorwiegend aus Kunststoff gefertigten Bauprodukten, sowie deren wichtigen Anwendungsgebiete. Quelle: Kapitel 2.	75
Tabelle 5:	Liste von Sortierschritten für die Sortierung von Bauabfällen .	83
Tabelle 6:	Zusammensetzung von Gläsern für Glasfasern (v. Kamptz 1991)	93
Tabelle 7:	Anforderung an den Alkaligehalt (als Na_2O -Äquivalent) von Zementen nach (DIN 1164-10)	99
Tabelle 8:	Typische Alkaligehalt von Gläsern für Glasfasern	99

Tabelle 9:	Kunststoffabfälle 2017 nach Anfallort, vorhandener Abfallmenge und Art der erfolgten Abfallbehandlung (Lindner 2018).....	109
Tabelle 10:	Verträglichkeitsmatrix für die Mischbarkeit verschiedener Kunststoffe	113
Tabelle 11:	Beispielhafte Anforderungen an Kunststoffrohre für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen aus PVC-U, entnommen aus DIN EN 1401.....	116
Tabelle 12:	Beispielhafte Anforderungen für Rohrleitungssysteme mit profilierter Wandung aus PVC-U, PP und PE unter spezieller Berücksichtigung der Anforderungen an Rezyklate und Rücklaufmaterialien, entnommen aus DIN EN 13476.....	117
Tabelle 13:	Beispielhafte Anforderungen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme zum Ableiten von Abwasser (niedriger und hoher Temperatur) innerhalb der Gebäudestruktur aus PE unter spezieller Berücksichtigung der Anforderungen an Rezyklate und Rücklaufmaterialien, entnommen aus DIN EN 1519-1.....	119
Tabelle 14:	Beispielhafte Anforderungen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen aus PP unter spezieller Berücksichtigung der Anforderungen an Rezyklate und Rücklaufmaterialien, entnommen aus DIN EN 1852-1.....	120
Tabelle 15:	Beispielhafte Anforderungen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Warm- und Kaltwasserinstallation aus PP unter spezieller Berücksichtigung der Anforderungen an Rezyklate und Rücklaufmaterialien, entnommen aus DIN EN 15874-2.....	122
Tabelle 16:	Beispielhafte Anforderungen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Gasversorgung aus PE unter spezieller Berücksichtigung der Anforderungen an Rezyklate und Rücklaufmaterialien, entnommen aus DIN EN 1555-2 ...	123
Tabelle 17:	Beispielhafte Anforderungen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen - PVC-U, PP, PE: Anforderungen an Schächte und Zubehörteile mit geringer Einbautiefe, entnommen aus DIN EN 13598.....	125
Tabelle 18:	Beispielhafte Anforderungen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen - PVC-U, PP, PE: Anforderungen an Schächte und Zubehörteile mit geringer Einbautiefe unter spezieller Berücksichtigung der	

	Anforderungen an Rezyklate und Rücklaufmaterialien, entnommen aus DIN EN 13598	126
Tabelle 19:	Bauprodukte aus Acrylnitril-Copolymeren inkl. Normen	135
Tabelle 20:	Bauprodukte aus Polyamid inkl. Normen.....	135
Tabelle 21:	Bauprodukte aus Polycarbonat bzw. Polymethylmethacrylat inkl. Normen	136
Tabelle 22:	Inhalte einer Leistungserklärung nach Artikel 4 der Bauproduktenverordnung	138
Tabelle 23:	Inhalte eines technischen Datenblatts	139
Tabelle 24:	Möglicher Zusatzabschnitt "Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen" in der Leistungserklärung und in Technischen Datenblättern	140
Tabelle 25:	Produktgruppen und Produktgruppennummer mit Beispielen nach (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020a).....	145
Tabelle 26:	Verpackungskategorien nach VerpackG, Verpackungsfunktionen nach (Pfohl 2018) und Beispiele für eingesetzte Packmittel	148
Tabelle 27:	Packmittel und Anwendung nach Produktkategorien nach (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020a) und typischerweise dafür verwendete Kunststoffe (Niaounakis, 2020; R. Beswick & D. J. Dunn, 2002; Valpak, 2013)	149
Tabelle 28:	Berechnungsmethode des Aufkommens von Verpackungen (eigene Darstellung nach (Schüler, 2020).....	154
Tabelle 29:	Herstellungsmenge von Non-food-Kunststoffverpackungen im Jahr 2017 (eigene Darstellung nach Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung, 2020)	155
Tabelle 30:	Eignung von überwiegend im Non-Food-Bereich eingesetzten Kunststoffverpackungen für den Rezyklateinsatz, differenziert nach überwiegender Anfallstelle. (Eigene Darstellung nach Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung, 2019)	169
Tabelle 31:	Beispiele für den Einsatz von Rezyklaten in Kunststoffverpackungen.....	172
Tabelle 32:	Produktionsmengen, aktueller und potenzieller Rezyklateinsatz bei moderaten Einschränkungen	176

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Langform
€	Euro
%	Prozent
°C	Grad Celsius
a	Jahr
Ω	Oberflächenwiderstand
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
a.n.g	anders nicht genannt
AGPU	Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt e.V.
AGVU	Arbeitsgemeinschaft Verpackung + Umwelt
AVV	Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis
BauPVO	VERORDNUNG (EU) Nr. 305/2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten (EU-Bauproduktenverordnung)
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BGBI	Bundesgesetzblatt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BNB System	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BOPP	biaxially oriented polypropylene
bzw	beziehungsweise
cm	Zentimeter, 10^{-2} m
CMEPD	Circularity Module für Umwelt-Produktdeklarationen
CEN	Europäisches Komitee für Normung; französisch: Comité Européen de Normalisation
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
d.h.	deshalb
DIN	Deutsches Institut für Normung
EAD	European Assessment Documents
EBS	Ersatzbrennstoff
ElektroG	Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektroaltgeräten
EN	Europäische Norm
EPAL	European Pallet Association
EPD	Umweltproduktdeklaration (en: environmental product declaration)
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
EPS	Expandiertes Polystyrol; auch PS-E
ERDE	Initiative Erntekunststoffe Recycling Deutschland
EU	Europäische Union

Abkürzung	Langform
e. V.	eingetragener Verein
EVOH	Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer
FIBC	Flexible Intermediate Bulk Container
g	Gramm
GewAbfV	Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GVM	Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH
h	Stunde (en: hour)
HBCD	1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan
hEN	Harmonisierte Europäische Normen
IBC	Intermediate Bulk Container
i. d. R.	in der Regel
IK	Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V.
ISO	Internationale Organisation für Normung
KDP	Kunststoff Düsseldorfer Palette
kg	Kilogramm
KI	Kanzerogenitätsindex
kN	Kilonewton
KRV	Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie
KrWG	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen
kt	Kilotonnen, Gg, 10^9 g
K-Wert	Konstante, unabhängig von der Konzentration der Polymerlösung und charakteristisch für das untersuchte Polymer, die ein Maß für den durchschnittlichen Polymerisationsgrad ist
LCA	life cycle analysis
LBO	Landesbauordnung
m	Meter
MBO	Musterbauordnung
MFR	Schmelze-Massefließrate (en: melt mass-flow rate)
mg	Milligramm, 10^{-3} kg
Min	Minute
Mio.	Millionen
mm	Millimeter, 10^{-3} m
MOP	maximal zulässiger Betriebsdruck (en: maximum operating pressure)
MPa	Megapascal, 10^6 Pa
MTV	Mehrwegtransportverpackung
MVVTB	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen

Abkürzung	Langform
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk
NIR	Nahinfrarot
OIT	Oxidations Induktionszeit (en: oxidation induction time)
örE	öffentlich-rechtliche Entsorger
Pa	Pascal
PA	Polyamid
PA6	Polycaprolactam
PA66	Poly[imino(1,6-dioxohexamethylen) iminohexamethylen]
PBDE	polybromierte Diphenylether
p _c	kritischer Druck (en: critical pressure)
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte, high-density polyethylen
PE-LD	Polyethylen niederer Dichte, low-density polyethylen
PE-LLD	lineares Polyethylen niederer Dichte, linear low density polytehylen
PET	Polyethylenterephthalat
PET-A	Amorphes Polyethylenterephthalat
PET-G	Polyethylenterephthalat Glycol
PM	produzierte Menge
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen
PO	Polyolefin
POP	Persistent Organic Pollutants
POP Verordnung	Verordnung (EU) 2019/1021 über persistente organische Schadstoffe
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
PVC-C	Nachchloriertes-PVC, Polyvinylchlorid chlorinated
PVC-U	Weich-PVC, Polyvinylchlorid unplasticized
PVC-P	Hart-PVC, Polyvinylchlorid plasticized
REACH	Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) und zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur
RoHS	Restriction of Hazardous Substances; Europäische Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten
SAN	Styrol-Acrylnitril
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk
SDR	Durchmesser/Wanddicken-Verhältnis (en: standard dimension ratio)

Abkürzung	Langform
SN	Nenn-Ringsteifigkeit (en: nominal ring stiffness)
t	Tonne
TIR	statistische Schlagzähigkeitsbruchrate [en: true impact rate]
TPU	thermoplastisches Polyurethan
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TRK	Technische Richtkonzentration
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VerpackG	Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen
vgl.	vergleiche
VIS	Aus dem Englischen: visible. Hier im Sinne von sichtbarem Licht.
VM	Verbaute Menge
VST	Vicat-Erweichungstemperatur (en: vicat softening temperature)
XML	Extensible Markup Language
XPS	Extrudiertes Polystyrol

Zusammenfassung

Nach den Verpackungen sind Bauprodukte das zweitgrößte Einsatzgebiet von Kunststoffen. Die Menge an Kunststoff, die in Bauprodukten verwendet wird, steigt jährlich an und übertrifft die Menge an entsorgten Bauprodukten, sodass das anthropogene Lager an Kunststoffen wächst. Diese Kunststoffe werden erst in der Zukunft als Abfall anfallen und müssen dann einer ressourceneffizienten Verwertung zugeführt werden. Dieser Bericht betrachtet die zur Förderung einer hochwertigen Verwertung notwendigen Aspekte der Produktion und des Recyclings von Baukunststoffen.

Grundlage für ein hochwertiges Recycling der Kunststoffe ist das Wissen über Mengen und Kunststofftypen der derzeit verbauten Produkte. Die Daten wurden in diesem Vorhaben erhoben, die Ergebnisse hierzu sind in Kapitel 2 dargestellt. Eine weitere Grundlage für ein hochwertiges Recycling sind möglichst reine Abfallströme, die das Recycling erleichtern. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, ist die Rücknahme der Kunststoffprodukte nach ihrer Nutzungsphase durch ein herstellergestütztes Rücknahmesystem. Kapitel 3 erläutert daher grundlegende Erwägungen zu Rücknahmesystemen für Bauprodukte und stellt vorhandene Systeme vor. Kapitel 4 gibt eine Übersicht über die beim Recycling verwendeten technischen Prozesse, sowie über den Umgang mit Schadstoffen in Kunststoffabfällen. Im Sinne einer hochwertigen Verwertung sollen die Kunststoffabfälle aus Bauprodukten möglichst recycelt und in einer gleichwertigen Anwendung wiedereingesetzt werden. Hierzu beschreibt Kapitel 5 die Möglichkeiten und Grenzen des Rezyklateinsatzes. Auch für Verpackungen von Bauprodukten wird Kunststoff eingesetzt. Kapitel 6 gibt eine Übersicht über die hier verwendeten Produkte, Kunststoffsorten und Mengen sowie über die Möglichkeit des Rezyklateinsatzes in diesen Verpackungen. Abschließend werden aus den vorangegangenen Kapiteln abzuleitende Empfehlungen für eine Förderung der hochwertigen Verwertung in Kapitel 7 vorgestellt.

Kapitel 2 - Marktrecherche für Bauprodukte aus Kunststoff

In Kapitel 2 wird eine umfassende Produktliste mit überwiegend aus Kunststoffen gefertigten Bauprodukten dargestellt. Als Grundlage dient die Liste der harmonisierten Spezifikationen (hEN und EAD) nach europäischer Bauproduktenverordnung (EU) Nr. 305/2011, sowie die Musterverwaltungsvorschrift für Technische Baubestimmungen (speziell die Teile B, C und D). Zudem wird auf Fachliteratur sowie Hersteller- und Händlerangaben zurückgegriffen. Die im xls-Format als Supplement beigefügte Liste umfasst mehr als 240 Bauprodukte und untergliedert sich in vier unterschiedliche Ebenen. Während Ebene 1 als höchste Aggregationsebene in *Rohre*, *Fensterprofile*, *Dämmmaterialien* und *Sonstiges* unterscheidet, werden diese Anwendungsbereiche unter Auflistung spezifischer Bauprodukte bis hin zu Ebene 4 immer feiner aufgeschlüsselt und weiterführende Informationen, wie relevante Normen und verwendete Kunststoffsorten aufgeführt.

Es werden die aktuell produzierten, sowie verbauten Marktmengen der betrachteten Bauprodukte dargestellt. Als Quellen dienten entsprechende Verbands- und Branchenstatistiken, Daten aus der Fachliteratur sowie des Statistischen Bundesamtes. Die für Deutschland ermittelte Produktionsmenge an Bauprodukten aus Kunststoff beträgt für das Jahr 2017 rund 3,3 Mio. t., die verbaute Menge hingegen beträgt circa 2,6 Mio. t. Betrachtet man die prozentuale Aufteilung der verbauten Mengen, so sind jeweils 30 % auf die Anwendungsbereiche *Rohre* sowie *Sonstiges* zurückzuführen, 22 % auf *Profile* und rund 18 % auf *Dämmmaterialien*. In Rohren kommen überwiegend Polyethylen (PE) und Polyvinylchlorid unplasticized (PVC-U), unter der Bezeichnung Hart-PVC bekannt, zum Einsatz. Auch bei Profilen ist PVC-U mit Abstand der am meisten verwendete Kunststoff, gefolgt von Polyethylen (PE). Als Dämmstoff kommt vor allem expandiertes Polystyrol (EPS) zum Einsatz, gefolgt von

Polyurethan (PUR) und extrudiertes Polystyrol (XPS). Die dominierenden Kunststoffsorten des Anwendungsbereichs Sonstiges sind PVC und Bitumen. Fasst man alle vier genannten Anwendungsbereiche zusammen ist PVC der am häufigsten eingesetzte Kunststoff in Bauprodukten.

Neben der Ermittlung der Marktmengen und deren Aufteilung nach Anwendungsart sowie Kunststoffsorte, erfolgt die Abschätzung des anthropogenen Kunststofflagers im Bausektor. Die Berechnungen hierfür basieren auf Daten der Conversio-Studie sowie der Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes. Insgesamt wird für den Zeitraum zwischen 2005 und 2017 von einer Inputmenge in das anthropogene Lager von rund 30,3 Mio. t an Kunststoffen ausgegangen. Die Outputmenge beläuft sich hingegen für den gleichen Zeitraum auf etwa 7,9 Mio. t. Für den Zeitraum von 2005 bis 2017 kann der Zuwachs des anthropogenen Lagers somit auf rund 22,4 Mio. t geschätzt werden, was einem durchschnittlichen jährlichen Zuwachs von 1,7 Mio. t Kunststoffen entspricht. Hochrechnungen zeigen, dass sich die Outputmenge des anthropogenen Lagers bis 2030, gegenüber der Menge des Outputs im Jahr 2005, in etwa verdoppeln wird.

Die vergleichsweise langen Nutzungsdauern von Bauprodukten führen dazu, dass derzeit rücklaufende Abfallströme Kunststoffe enthalten, die Jahrzehnte alt sind, während gegenwärtig verbaute (Kunststoff-)Materialien erst in mehreren Jahrzehnten im Abfallstrom wiederzufinden sein werden. Diese Tatsache und insbesondere die in alten Produkten enthaltenen unbekannten oder gefährlichen Inhaltsstoffe erschweren das werkstoffliche Recycling von Bauprodukten aus Kunststoff. Im Einzelfall ist daher eine fundierte Überprüfung der Sinnhaftigkeit eines Recyclings bzw. der Rückführung dieser Kunststoffe erforderlich.

Kapitel 3 - Rücknahmesysteme

Kapitel 3 behandelt Rücknahmesysteme für Bauprodukte aus Kunststoffen. Durch diese Systeme werden Produkte nach der Nutzungsphase zurückgenommen und dem Recycling zugeführt. Idealerweise wird das so gewonnene Rezyklat im Kreis geführt, aber auch ein Downcycling zu Produkten mit geringeren Anforderungen an das Material ist möglich. Rücknahmesysteme werden in diesem Vorhaben genauer untersucht, da hier das Potenzial für sehr reine Stoffströme besteht. Diese bilden die Grundlage für eine Verarbeitung zu hochwertigen Rezyklaten.

Folgende Kriterien für den erfolgreichen Betrieb eines Rücknahmesystems wurden aus Experteninterviews abgeleitet: Ausreichend hohe und örtlich konzentrierte Mengen an Material, Möglichkeit des selektiven Rückbaus für die zurückgenommenen Produkte, keine Kontamination der Materialien z. B. mit gesundheitsgefährdenden Additiven oder qualitätsmindernden Verunreinigungen, sowie ein wirtschaftlich betreibbares Recyclingverfahren. Außerdem wurden von den Experten folgende Hürden für die Etablierung der Recyclingsysteme genannt: schwierige technische und ökonomische Realisierbarkeit der Schadstoffentfrachtung, die oft schwankend dargestellten Eigenschaften des Rezyklats im Vergleich zu Neuware, die schlechte Qualifikation der Mitarbeitenden, die Rechtsprechung zum Umgang mit Schadstoffen.

Die relevanten Normen, besonders für den Rezyklateinsatz, werden im Kontext der Rücknahmesysteme vorgestellt. Rechtlich bestehen keine akuten, substantiellen Hindernisse für den Betrieb von Rücknahmesystemen.

Es werden zwölf verschiedene Rücknahmesysteme dargestellt. Sie sind vor allem den Bereichen Bodenbeläge, Rohre und PVC-Produkte zuzurechnen. Mit Ausnahme der Agrarfolien bewegen sich die rückgenommenen Mengen im einstelligen Prozentbereich der Produktionsmengen. Die Rücknahmesysteme werden anhand der verarbeiteten Produkte und Materialien, der zurückgenommenen Mengen und anhand des Recycling- und Logistikprozesses einzeln

charakterisiert. Besonders für den Bereich des PVC-Recyclings sind verschiedene Rücknahmesysteme mit hochwertigem Recycling etabliert.

Das Recycling von Bodenbelägen ist anspruchsvoll, kann aber durch Rücknahmesysteme ermöglicht werden. Die hierfür existierenden Rücknahmelösungen sind allerdings herstellerepezifisch. Eine herstellerübergreifende, branchenweite Lösung wäre vorteilhaft. Gerade in Kombination mit einer recyclinggerechten Produktgestaltung (Design-for-Recycling) böte ein solches Rücknahmesystem noch ungehobenes Potenzial.

Im Rohrbereich sind die technologischen Grundlagen für ein hochwertiges Recycling gelegt, auch ein funktionierendes Rücknahmesystem existiert. Allerdings stellt sich hier der Rückbau nach der Nutzungsphase meist als wirtschaftlich schwer darstellbar heraus. Die Rücknahme von Dämmmaterialien findet, abgesehen von Baustellenabfällen, nicht statt.

Kapitel 4 - Verwertungstechniken

Kapitel 4 gibt einen Überblick über die im Baubereich angewendeten Aufbereitungs- und Verwertungstechniken. Als Verwertungsoptionen werden in diesem Bericht das werkstoffliche und das chemische Recycling behandelt. Die energetische Verwertung zählt entsprechend der Recyclingdefinition des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) nicht zum Recycling. Der Fokus dieses Kapitels liegt auf dem werkstofflichen Recycling durch Sortieren und Recompoundieren. Lösungsmittelbasierte Verfahren werden aufgezeigt, falls Sie im spezifischen Kontext relevant sind, wie z. B. für Polycaprolactam (PA6, Polyamid 6) aus Teppich-Fasern. Die einzelnen Schritte der Abfallerfassung und Vorbehandlung für im Baubereich anfallende Abfälle werden erläutert. Hierzu zählen die Zerkleinerung, Reinigung und Sortierung der Abfälle. Darauf folgt einer der zentralen Prozessschritte, das Recompoundieren. Dessen einzelne Teilschritte, wie z. B. Plastifizieren, Schmelzfiltrieren oder Granulieren, sowie ihre Bedeutung im Recycling von Baukunststoffen werden erläutert.

Für die in Kapitel 2 als mengenmäßig am relevantesten identifizierten Kunststoffsorten wird das werkstoffliche Recycling vorgestellt und auf die für Baukunststoffe spezifischen Besonderheiten eingegangen. Ergänzend wird das werkstoffliche Recycling der wichtigsten Produktgruppen beschrieben. Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) ist ein für das Recycling besonders anspruchsvoller Werkstoff. Die Recyclingoptionen des werkstofflichen Recyclings, der Verwendung als Zuschlagstoff und des chemischen Recyclings werden beschrieben. Eine Verwendung als Zuschlagstoff wäre möglich, birgt allerdings auch Risiken und das Aufbereitungsverfahren ist angesichts der Zerkleinerung bis auf sehr geringe Korngrößen energieaufwendig.

Die Möglichkeit der Verwendung als Ersatzbrennstoff wird zwar hinsichtlich des Brennwertes der GFK als möglich angesehen, kann aber aufgrund der Glaszusammensetzung und deren Einfluss auf die Zementqualität nur in speziellen Fällen erfolgreich eingesetzt werden.

Kapitel 5 - Rezyklateinsatz in Bauprodukten aus Kunststoff

Im Kapitel 5 erfolgt die Ermittlung des Einsatzpotentials von Rezyklaten in Bauprodukten aus Kunststoff. Hierfür wird zunächst eine Bewertung hinsichtlich Qualität und Quantität der anfallenden Kunststoffabfälle durchgeführt, denn die Qualität von Rezyklaten wird maßgeblich von der Beschaffenheit der aufzubereitenden Abfälle bestimmt. Sortenreinheit, die Reduktion von Störstoffen und Verunreinigungen, sowie Unversehrtheit der Polymerketten sind wichtige Parameter zur Beurteilung der Inputqualität. Auch die Anwendung von Design-for-Recycling-Konzepten bei der Produktentwicklung begünstigt die Wiederverwertung und schafft eine gute Ausgangsbasis für die Herstellung hochwertiger Rezyklate. Prinzipiell kann davon ausgegangen werden, dass Kunststoffabfälle aus dem Post-Industrial-Bereich (d.h. bei Produzenten und Verarbeitern angefallener Abfall) als qualitativ hochwertiger einzustufen sind als aus dem Post-

Consumer-Bereich. Die quantitative Erfassung der im Jahr 2017 insgesamt aus allen Anwendungsbereichen angefallenen Kunststoffabfälle beläuft sich auf 6.154 kt, wovon rund 5.201 kt dem Post-Consumer-Bereich und rund 953 kt dem Post-Industrial-Bereich zugeordnet werden können. 52,7 % dieser Kunststoffabfälle wurden energetisch verwertet und somit dem Materialkreislauf entzogen, 46,7 % wurden der stofflichen Verwertung zugeführt (Lindner und Schmidt 2018).

Die recherchierten Zahlen zeigen für unterschiedliche Werkstoffe ein Ungleichgewicht vorhandener Abfälle und benötigter Qualitäten bzw. Kunststoffsorten im Bauwesen auf. Ob ein Transfer von Rezyklaten aus baufremden Anwendungsbereichen sinnvoll sein kann, ist vor dem Hintergrund des zusätzlich nötigen Additiveinsatzes sowie der Mengenerhaltung im jeweiligen System im Einzelfall zu hinterfragen. Grundsätzlich sollte eine echte Kreislaufführung angestrebt werden. Dies bedeutet im Idealfall über Rücknahmesysteme den jeweiligen Material- und Produktkreislauf geschlossen zu halten, wie es bei PVC bereits gut funktioniert. Der PVC-Recyclingkreislauf führt zu relativ hohen baubereichenspezifischen Rezyklateinsatzquoten, wenn auch hier die Nachfrage noch nicht völlig bedient werden kann. Das Angebot an qualitativ passendem Rezyklat muss daher der spezifischen Nachfrage entsprechend vergrößert werden. Dies gilt auch für andere Kunststoffsorten.

Ferner werden die Voraussetzungen für den Einsatz von Rezyklaten zur Herstellung von Bauprodukten dargestellt. Dazu müssen die aktuellen chemikalienrechtlichen Anforderungen erfüllt werden. Der Rezyklateinsatz muss den Grundanforderungen der europäischen Bauproduktenverordnung (BauPVO) sowie den Vorgaben der harmonisierten Spezifikationen genügen. Zugleich sind Kundenwünsche zu erfüllen. Die BauPVO fordert u. a., dass eine nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen gegeben ist. Konkret bedeutet dies, dass das Bauwerk bzw. die enthaltenen Rohstoffe nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden müssen. Auch muss das Bauwerk dauerhaft sein und für dessen Errichtung umweltverträgliche Roh- und Sekundärstoffe verwendet werden. Dauerhaftigkeit, Recyclingfähigkeit und Rezyklateinsatz sind Eigenschaften, die durch den Gesetzgeber zwar grundsätzlich Berücksichtigung finden, die normative und produktspezifische Konkretisierung bleibt jedoch oftmals aus. Prinzipiell erlauben bereits viele Normen den Rezyklateinsatz, jedoch wird der Einsatz von derartigem Sekundärmaterial von Verarbeiter- und Kundenseite häufig noch kritisch gesehen. Nachfolgend wird das Rezyklateinsatzpotential der vier untersuchten Anwendungsbereiche *Rohre, Profile, Dämmung* und *Sonstiges* aufgezeigt.

Rohre

Die Vielfalt an Rohren- und Rohrsystemen ist groß, weshalb je nach Anwendungsfall entsprechende Qualitätsanforderungen erfüllt werden müssen. Diese umfassen beispielsweise mechanische Eigenschaften oder auch die Farbe. Die aktuellen Normen geben hier bereits sehr gute Anhaltspunkte hinsichtlich der Möglichkeiten des Rezyklateinsatzes. Bei druckbelasteten Rohren lassen die Normen keinen Einsatz von Rezyklat oder Rücklaufmaterial zu, bei drucklosen Rohren hingegen sind bis zu 20 % gestattet. Dies gilt natürlich nur unter der Voraussetzung, dass alle Anforderungen wie beispielsweise Mechanik oder Optik hinreichend erfüllt werden. Auch die verwendete Kunststoffsorte wirkt sich limitierend auf die Möglichkeiten des Rezyklateinsatzes aus. Eine nachträgliche Stabilisierung von PVC ist relativ einfach durchzuführen, weshalb ein erneuter Einsatz als Rezyklat gut möglich ist. Bei Polyolefinen (PO) gestaltet sich dies schwieriger. Aus diesem Grund lassen die Normen hier nur Rücklaufmaterial und Rezyklate aus Rohren und Rohrformteilen zu. Mit über 1 Mio. t stellen Rohre und Rohrsysteme mengenmäßig den größten Anteil an den untersuchten Bauprodukten dar. Das Angebot an Rezyklaten kann aktuell nicht die Nachfrage der Unternehmen decken, weshalb das Rezyklateinsatzpotential hier noch nicht ausgeschöpft ist.

Fensterprofile

Bei der Fensterprofilproduktion kommen aktuell 18 % Rezyklate zum Einsatz, zudem hat sich bereits ein gut funktionierender Materialkreislauf etabliert. Laut Experten ist das Rezyklateinsatzpotential mit 50–70 % jedoch weitaus höher. Die Gründe für das noch ungenutzte Potenzial sind vielschichtig. Zum einen sind hier wirtschaftliche Ursachen zu nennen. So sind die Entwicklung und Anwendung von geeigneten Technologien sehr kostenintensiv. Auch die hohen Preise für Rezyklate mindern deren verstärkten Einsatz. Zum anderen limitieren auch die aktuellen Normen den Rezyklateinsatz. Prinzipiell werden hohe Anforderungen bzgl. Bewitterung und UV-Stabilität an Fensterprofile gestellt. Im Profilkern dürfen Rezyklate eingesetzt werden, in der Außenwandung gestatten es die Vorgaben nicht. Auch der Trend in Richtung Verbundsysteme schmälert die gute Recyclingfähigkeit von Altfenstern. Analog zu den Rohren kann auch bei den Fensterprofilen die Nachfrage nach Rezyklaten nicht durch das bestehende Angebot abgedeckt werden.

Dämmmaterialien

Im Vergleich zu Rohren und Fensterprofilen ist die aktuelle Situation bei Dämmmaterialien hinsichtlich Rezyklateinsatz grundsätzlich als schlechter zu bewerten. Entsprechende Rücknahmesysteme sind noch nicht etabliert, da die Rückbaumengen gegenwärtig zu gering sind. Auch kommt es beim Einsatz von Rezyklat zu signifikanten Qualitätseinbußen. Ein werkstoffliches Recycling ist daher bei Dämmmaterialien nicht ideal, weshalb rohstoffliche Verfahren aussichtsreicher erscheinen.

Sonstiges

Die Anwendungsbereiche für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten bei den sonstigen Bauprodukten sind sehr divers. Viele Anwendungen im Straßen- sowie Garten- und Landschaftsbau sind bereits etabliert und gut möglich. Auch Produkte entsprechend *Teil D der Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen* sind prinzipiell gut geeignet, da hier keine Verwendbarkeitsnachweise erbracht werden müssen und es hierfür keine anerkannten Regeln der Technik gibt. Ein weiterer Vorteil ist, dass aufgrund der relativ geringen Produktmengen die verfügbaren Rezyklatmengen nicht limitierend wirken, wie dies bei den Rohren und Fensterprofilen der Fall ist. Der Anwendungsbereich *Sonstiges* erweist sich demnach als aussichtsreich, was den Einsatz von Rezyklat in Bauprodukten anbelangt.

Kapitel 6 - Kunststoffverpackung für Bauprodukte

Kapitel 6 beschreibt die für Bauprodukte verwendeten Kunststoffverpackungen und ermittelt Möglichkeiten zur Kreislaufrückführung wie Vermeidung und verstärktem Rezyklateinsatz. Einen großen Anteil haben hier PE-Folien. Zunächst wird das Verpackungsaufkommen anhand der drei Ebenen Verpackungsmittelproduktion, Verpackungseinsatz und Verpackungsverbrauch abgeschätzt. Der Einsatz von Kunststoffen für Bauproduktverpackungen beträgt ca. 170 kt/a, die Produktion von Bauproduktverpackungen aus Kunststoff schätzungsweise 368 kt/a. Der Unterschied kommt einerseits durch den Exportüberhang zustande andererseits sind diese Zahlen aufgrund der spärlichen Datenlage nur als grobe Schätzungen zu interpretieren.

Sowohl Ansätze des Verpackungsverzichtes als auch eine Verbesserung des Verpackungsdesigns lassen sich für die Reduktion des Verpackungseinsatzes nutzen. Auch der Einsatz von Mehrweglösungen bietet Optionen für die Abfallvermeidung. Der ökologische Nutzen einer Mehrweglösung hängt dabei stark von ihrer Ausgestaltung ab.

Für die Recyclingfähigkeit der Verpackungen ist sowohl die Getrennthaltung der Abfälle als auch ein recyclinggerechtes Design notwendig. Teile des Verpackungsaufkommens werden über die Dualen Systeme entsorgt und dementsprechend recycelt. Der Großteil fällt hingegen unter die

Gewerbeabfallverordnung. Nach dieser besteht grundsätzlich die Pflicht, Kunststoffe von anderen Abfallfraktionen getrennt zu sammeln und zu befördern. Es wird allerdings häufig von den vorhandenen Ausnahmeregelungen Gebrauch gemacht. Für ausreichend getrennte und unverschmutzte Fraktionen der Bauverpackungen findet ein werkstoffliches Recycling statt. Für viele der Baustoffverpackungen kann auch Rezyklat zur Produktion verwendet werden. Zu den verschiedenen Produktkategorien und Kunststoffen werden Beispiele für Produkte mit Rezyklateinsatz genannt. Aufgrund der, im Vergleich zu Lebensmitteln, geringeren Anforderungen lässt sich im Bereich der Folien für Baustoffverpackungen vergleichsweise gut Rezyklat einsetzen. Ein Rezyklateinsatz von 30 % erscheint technisch machbar und sollte mittelfristig durch eine entsprechende Rezyklatquote festgelegt werden.

Kapitel 7 - Empfehlungen

In Kapitel 7 werden Empfehlungen zur Steigerung des Kunststoffrecyclings im Baubereich gegeben. Ein wichtiger und einfach umzusetzender Ansatz ist die Dokumentation der Recyclingfähigkeit und des Rezyklatgehaltes. Dies kann in der technischen Dokumentation der Produkte unter einem gesonderten Abschnitt „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“ erfolgen.

Des Weiteren kann in den als Bauproduktverpackung verwendeten Folien Rezyklat eingesetzt werden. Dies sollte als Rezyklatquote auch festgeschrieben werden. Durch die so entstehende Nachfrage wird die Transformation zu mehr Kreislaufführung ermöglicht und beschleunigt. Zudem wird empfohlen, Design-for-Recycling in das Produktdesign einzubeziehen und die Getrennthaltung der Abfälle konsequent umzusetzen, um reine, recyclingfähige Abfallströme zu schaffen.

Summary

The construction sector is the second largest consumer of plastics after the packaging sector. The amount of plastics used in construction products is increasing every year and exceeds the amount of construction products disposed of. Thus, an anthropogenic stockpile of plastics is building up. In the future, these amounts will resurface as waste and then need to be recycled in a resource-efficient way. This report analyses the aspects of the production and recycling of construction plastics that are necessary to promote high-quality recovery.

The basis for high-quality recycling of plastics is knowledge about the quantities and types of plastics currently used. The necessary data was collected in this project, the results of which are presented in chapter 2. Another basis for high-quality recycling is waste streams that are as pure as possible and therefore facilitate recycling. One way to achieve this is to take back plastic products after their use phase through a suitable take-back system. Chapter 3 therefore explains basic considerations on take-back schemes for construction products and presents various take-back schemes that already exist. Chapter 4 gives an overview of the technical processes used in recycling, as well as the effects and handling of pollutants in plastic waste. For high-quality recycling, the resulting plastic waste from construction products should be recycled as far as possible and reused in an equivalent application. To this end, Chapter 5 describes the possibilities and limits of the use of recycled materials in construction products. Plastics are also used for the packaging of construction products. Chapter 6 provides an overview of the products, plastic types and quantities used here. It also analyses the possibility of using recyclates in packaging. Finally, recommendations to be derived from the previous chapters for the promotion of high-quality recycling are presented in chapter 7.

Chapter 2 - Market research for plastic construction products

Chapter 2 presents a comprehensive product list of construction products made predominantly of plastics. The list of harmonised specifications (hEN and EAD) according to the European Construction Products Regulation (EU) No. 305/2011, as well as the model administrative regulation for technical building regulations (especially parts B, C and D) serve as a basis. In addition, reference is made to technical literature as well as manufacturer and dealer information. The list, which is attached as a supplement, comprises more than 240 construction products and is divided into four different levels. Level 1, as the highest aggregation level, differentiates between *pipes*, *window profiles*, *insulation materials* and *others*, these application areas are broken down more and more finely by listing specific construction products up to level 4, and further information, such as relevant standards and types of plastic used.

The currently produced and installed market quantities of the construction products considered are presented. Corresponding association and industry statistics, data from specialist literature and the Federal Statistical Office served as sources. The calculated production volume of plastic construction products for 2017 in Germany is around 3.3 million tonnes, while the volume used is around 2.6 million tonnes. Looking at the percentage breakdown of the quantities used, 30 % each can be attributed to the application areas *pipes* and *other*, 22 % to *profiles* and around 18 % to *insulation materials*. Polyethylene (PE) and polyvinyl chloride unplasticised (PVC-U), known as rigid PVC, are predominantly used in pipes. PVC-U is also by far the most commonly used plastic for profiles, followed by polyethylene (PE). Expanded polystyrene (EPS) is the main insulation material used, followed by polyurethane (PUR) and extruded polystyrene (XPS). The dominant types of plastic in the application area are PVC and bitumen. If all four of these application areas are combined, PVC is the most frequently used plastic in construction products.

In addition to determining the market quantities and their breakdown by type of application and type of plastic, the anthropogenic plastic stockpile in the construction sector is estimated. The calculations for this are based on data from the Conversio study and the waste statistics of the Federal Statistical Office. Overall, an input quantity of around 30.3 million tonnes of plastics into the anthropogenic stockpile is assumed for the period between 2005 and 2017. The output quantity, on the other hand, amounts to about 7.9 million t for the same period. For the period from 2005 to 2017, the increase in the anthropogenic stockpile can thus be estimated at around 22.4 million tonnes, which corresponds to an average annual increase of 1.7 million tonnes of plastics. Projections show that the output quantity of the anthropogenic stockpile will roughly double by 2030 compared to the output quantity in 2005.

The comparatively long life of construction products means that currently returning waste streams contain plastics that are decades old, while currently used (plastics) materials will not be found in the waste stream for several decades. This fact, and in particular the unknown or hazardous ingredients contained in old products, make the mechanical recycling of plastic construction products more difficult. In individual cases, therefore, a well-founded review of the usefulness of recycling or the return of these plastics is necessary.

Chapter 3 - Take-back schemes

Chapter 3 deals with take-back schemes for plastic construction products. Through these systems, products are taken back after the use phase and recycled. Ideally, the recyclate obtained in this way is recycled, but downcycling to products with lower material requirements is also possible. Take-back schemes are being investigated in more detail in this project, as the potential for very pure material flows exists here. These form the basis for processing into high-quality recyclates.

The following criteria for the successful operation of a take-back system were derived from expert interviews: Sufficiently high and locally concentrated quantities of material, possibility of selective deconstruction for the products taken back, no contamination of the materials e.g. with additives hazardous to health or quality-reducing impurities, and an economically operable recycling process. In addition, the experts mentioned the following hurdles for the establishment of recycling systems: difficult technical and economic feasibility of the removal of pollutants, the often poorly defined properties of the recyclate compared to virgin material, the poor qualification of the employees, the jurisdiction on the handling of pollutants.

The relevant standards, especially for the use of recyclates, are presented in the context of take-back schemes. Legally, there are no acute, substantial obstacles to the operation of take-back-systems.

Twelve different take-back schemes are analysed. They are mainly attributable to the areas of floor coverings, pipes and PVC products. With the exception of agricultural films, the quantities taken back are in the single-digit percentage range of the production quantities. The take-back schemes are characterised individually on the basis of the products and materials processed, the quantities taken back and on the basis of the recycling and logistics process. Especially for the area of PVC recycling, various take-back schemes with high-quality recycling are established. The recycling of floor coverings is demanding but can be made possible by take-back schemes. However, the existing take-back solutions here are manufacturer-specific. A cross-manufacturer, industry-wide solution would be advantageous. Especially in combination with recycling-friendly product design (design for recycling), such a take-back system would offer untapped potential.

In the pipe sector, the technological foundations for high-quality recycling have been laid, and a functioning take-back system also exists. However, the dismantling after the use phase usually

proofs to be economically difficult. The return of insulation materials does not take place, apart from construction site waste.

Chapter 4 - Recycling technology

Chapter 4 provides an overview of the processing and recycling technology used in the construction sector. The recycling options available are mechanical and chemical recycling. In accordance with the recycling definition of the Circular Economy Act (KrWG), thermal energy recovery is not considered a recycling option. The focus of this chapter is on mechanical recycling through sorting and recompounding. Solvent-based processes are shown if they are relevant in the specific context, e.g. for PA6 from carpet fibres. The individual steps of waste collection and pre-treatment for waste generated in the construction sector are explained. This includes the shredding, cleaning and sorting of the waste. This is followed by one of the central process steps, recompounding. Its individual sub-steps, such as plasticising, melt filtering or granulating, as well as their importance in the recycling of construction plastics are explained.

Mechanical recycling is presented for the plastic types identified in Chapter 2 as the most relevant in terms of volume, and the specific features of construction plastics are discussed. In addition, the mechanical recycling of the most important product groups is described. Glass-fibre reinforced plastic (GRP) is a particularly demanding material for recycling. The recycling options of mechanical recycling, use as an aggregate, and chemical recycling are described. Use as an aggregate would be possible, but also involves risks and is energy-intensive since the GRP must be grinded down to fine particles.

The possible use as a substitute fuel is considered possible with regard to the calorific value of the GRP, but can only be used successfully in special cases due to the glass composition and its influence on e.g. cement quality.

Chapter 5 - Use of recycled material in plastic construction products

In Chapter 5, the potential use of recycled materials in plastic construction products is determined. For this purpose, an evaluation is first carried out with regard to the quality and quantity of the plastic waste produced, because the quality of recyclates is largely determined by the quality of the secondary raw materials used. Purity of type, reduction of impurities, as well as the integrity of the polymer chains are important parameters for assessing input quality. The application of design-for-recycling concepts in product development also favours recycling and creates a good starting point for the production of high-quality recyclates. In principle, it can be assumed that plastic waste from the post-industrial sector can be classified as being of higher quality than from the post-consumer sector. The quantitative recording of the plastic waste generated in 2017 amounts to 6,154 kt, of which around 5,201 kt can be allocated to the post-consumer sector and around 953 kt to the post-industrial sector (i.e. waste generated by producers and processors). 52.7 % of this plastic waste is recycled for energy and thus removed from the material cycle, while 46.7 % was sent for material recycling.

The researched figures show an imbalance of existing waste and required qualities or types of plastics in the construction industry for different materials. Whether a transfer of secondary plastics from non-construction areas of application can make sense must be questioned on a case-by-case basis against the backdrop of the additional additives required and the conservation of quantities in the respective system. In principle, a genuine closed-loop system should be aimed for. Ideally, this means using take-back schemes to keep the respective material and product cycle closed, which already works well with PVC. The PVC recycling loop leads to relatively high construction sector-specific recyclate use rates, even if demand cannot yet be fully met. The supply of qualitatively suitable recyclate must therefore be increased to meet the specific demand. This also applies to other types of plastics.

Furthermore, the prerequisites for the use of recyclates in the manufacture of construction products are presented. On the one hand, the use of recycled materials must be in line with the basic requirements of the European Construction Products Regulation (CPR), and on the other hand, standards and customer requirements must be met. The CPR requires, among other things, that the use of natural resources is sustainable. In concrete terms, this means that the structure or the raw materials it contains must be reused or recycled after demolition. The structure must also be durable and environmentally compatible raw and secondary materials must be used for its construction. Durability, recyclability and the use of recycled materials are properties that are generally taken into account by the legislator, but normative and product-specific concretisation is often lacking. In principle, many standards already allow the use of recycled material, but the use of such is often still viewed critically by plastic processors and customers. In the following, the potential for the use of recycled material in the four areas of application examined - *pipes, profiles, insulation* and *other* - is shown.

Tubes

The variety of pipe and tube systems is large, which is why corresponding quality requirements must be met depending on the application. These include, for example, mechanical properties or colour. Current standards already provide very good indications regarding the use of recycled material. In the case of pressurised pipes, the standards do not permit the use of recycle or returned material, whereas up to 20 % is permitted for non-pressurised pipes. Of course, this only applies under the condition that all requirements such as mechanics or optics are sufficiently fulfilled. The type of plastic used also has a limiting effect on the possibilities of using recycled material. Subsequent stabilisation of PVC is relatively easy to carry out, which is why it is possible to use it again as a recycle. This is more difficult with polyolefins. For this reason, the standards only permit return material and recyclates from pipes and pipe fittings. With more than 1 million tonnes, pipes and pipe systems represent the largest share of the construction products examined in terms of volume. The supply of recyclates cannot currently meet the demand from companies, which is why the potential for using recyclates here has not yet been exhausted.

Window profiles

Currently, 18 % of recycled materials are used in window profile production, and a well-functioning material cycle has already been established. According to experts, however, the potential for using 50-70% recycled material is much higher. The reasons for the still unused potential are complex. On the one hand, there are economic reasons. The development and application of suitable technologies are very cost-intensive. The high prices for recyclates also reduce their increased use. On the other hand, current standards also limit the use of recyclates. In principle, high demands are made on window profiles with regard to weathering and UV stability. Recyclates may be used in the profile core, but the corresponding standard does not permit this in the outer wall. The trend towards composite systems also reduces the good recyclability of old windows. As with pipes, the demand for recycled material in window profiles cannot be met by the existing supply.

Insulation materials

Compared to pipes and window profiles, the current situation for insulation materials with regard to the use of recyclates is fundamentally worse. Appropriate take-back schemes have not yet been established because the quantities of recycled material are currently too small. The use of recycled material also leads to significant quality losses. Mechanical recycling is therefore not ideal for insulation materials, which is why raw material processes appear more promising.

Other

The areas of application for the use of plastic recyclates in other construction products are very diverse. Many applications in road construction and garden and landscape construction are already established and well possible. Products in accordance with *Part D of the Model Administrative Regulation on Technical Building Regulations* are also suitable in principle, as no proof of usability has to be provided here and there are no recognised rules of technology for this. Another advantage is that due to the relatively small product quantities, the available recycle quantities do not have a limiting effect, as is the case with pipes and window profiles. The *other* application area thus proves to be promising as far as the use of recycle in construction products is concerned.

Chapter 6 - Plastic packaging for construction products

Chapter 6 describes plastic packaging used for construction products and identifies possibilities for a more circular use, such as avoidance and increased use of recycled materials. PE films have a large share here. First, the packaging volume is estimated on the basis of the three levels of packaging production, packaging use and packaging consumption. The use of plastics for construction product packaging amounts to approx. 170 kt/a, the production of construction product packaging made of plastics to an estimated 368 kt/a. On the one hand, the difference is due to the export surplus; on the other hand, these figures can only be interpreted as rough estimates due to the sparse data available.

Both approaches of eliminating packaging and improving packaging design can be used to reduce the amount of packaging plastic. The use of reusable solutions also offers options for waste avoidance. The ecological benefit of a reusable solution strongly depends on its design.

The recyclability of packaging depends on both the separation of waste and a design that is suitable for recycling. Some of the packaging is disposed of via the German dual systems and recycled accordingly. The majority, on the other hand, is covered by the law for commercial waste. According to this law, there is a basic obligation to collect and transport plastics separately from other waste fractions. However, existing exemptions are often used. Material recycling takes place for sufficiently separated and uncontaminated fractions of construction packaging. For many of the construction packaging materials, recycle can also be used for production. Examples of products using recycled material are given for the various product categories and plastics. Due to the lower requirements compared to food, recycled material can be used comparatively well in the area of films for construction material packaging. A recycle use of 30 % seems technically feasible and should be mandatory in the medium term by using a corresponding recycle quota.

Chapter 7 - Recommendations

In chapter 7, recommendations are given on how to increase plastic recycling in the construction sector. An important and easy-to-implement approach is to document the recyclability and recycle content. This can be done in the technical documentation of the products under a separate section "Recyclability".

Furthermore, recycle can be used in the films used as construction product packaging. This should also be determined within a recycled material quota. The demand thus created will enable and accelerate the transformation to more closed-loop recycling.

In addition, it is recommended to include design-for-recycling in the product design and to consistently implement the separation of waste in order to create pure, recyclable waste streams.

1 Einleitung

Nach dem Verpackungssektor ist der Bausektor der zweitgrößte Verbraucher an Kunststoffen in Europa. Die Menge an Kunststoff, die in Bauprodukten verwendet wird, steigt dabei jährlich an und übertrifft die Menge an entsorgten Bauprodukten, sodass auch das anthropogene Lager wächst. Diese Kunststoffe werden in den kommenden Jahrzehnten als Abfälle anfallen und müssen dann einer ressourceneffizienten Verwertung zugeführt werden. Dieser Bericht betrachtet die zur Förderung einer hochwertigen Verwertung notwendigen Aspekte der Produktion und des Recyclings von Baukunststoffen.

Grundlage für ein hochwertiges Recycling von Kunststoffen ist das Wissen über Mengen und Kunststoffsorten der vorhandenen Produkte. Die hierzu notwendigen Daten wurden in diesem Vorhaben erhoben, sie sind in Kapitel 2 dargestellt. Eine weitere Grundlage für ein hochwertiges Recycling sind möglichst reine Abfallströme, die das Recycling erleichtern bzw. erst erlauben. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, ist die Rücknahme der Kunststoffprodukte nach Ihrer Nutzungsphase durch ein geeignetes Rücknahmesystem. Kapitel 3 erläutert daher grundlegende Erwägungen zu Rücknahmesystemen für Bauprodukte und stellt verschiedene bereits existierende Rücknahmesysteme vor. Möglichkeiten für weitere Systeme werden ebenfalls abgeleitet. Kapitel 4 gibt eine Übersicht über die beim Recycling verwendeten technischen Prozesse sowie über den Umgang mit Schadstoffen in Kunststoffabfällen. Für ein hochwertiges Recycling sollen die anfallenden Kunststoffabfälle aus Bauprodukten möglichst recycelt und in einer gleichwertigen Anwendung wiedereingesetzt werden. Hierzu beschreibt Kapitel 5 die Möglichkeiten und Grenzen des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten. Auch für die Verpackung von Bauprodukten wird Kunststoff eingesetzt. Kapitel 6 gibt eine Übersicht über die hier verwendeten Produkte, Kunststofftypen und Mengen sowie über die Möglichkeit des Rezyklateinsatzes in solchen Verpackungen. Abschließend werden aus den vorangegangenen Kapiteln abzuleitende Empfehlungen für eine Förderung der hochwertigen Verwertung in Kapitel 7 vorgestellt.

2 Marktrecherche für Bauprodukte aus Kunststoff in Deutschland

Die Grundlage der Forschungen ist eine umfassende Produktliste der vorwiegend oder oftmals aus Kunststoffen gefertigten Bauprodukte. Hierfür wurden ausführliche Literatur- und Internetrecherchen, aber auch Befragungen von Expert*innen, Verbänden, Herstellern und anderen Stakeholdern durchgeführt. Für die recherchierten Bauprodukte wurde eine Einteilung in thermoplastische Kunststoffe, duroplastische Kunststoffe, Elastomere und Verbundwerkstoffe vorgenommen. Durch die Ermittlung aktueller Marktmengen, das Abfallaufkommens sowie Wachstumsraten der dem Baubereich zuordenbaren Kunststoffprodukte, sind zudem Rückschlüsse auf Entwicklungen im anthropogenen Lager innerhalb der letzten Jahre möglich. Die erstellte Produktliste ist sehr umfangreich (siehe Anhang). Die Ergebnisse dieser Recherche wurden vollumfänglich in einer Datentabelle in Form einer xlsx-Datei, welche als Supplement zum vorliegenden Bericht veröffentlicht wird, aufbereitet. Zudem erfolgt eine detaillierte Beschreibung der Inhalte und Funktionalitäten des Supplements. Die Ergebnisse des Kapitels 2 bilden die Grundlage für die nachfolgenden Arbeiten der Studie.

2.1 Methodik

2.1.1 Vorgehensweise bzgl. der Erstellung der Produktliste für Bauprodukte aus Kunststoff

Als Grundlage für die Erstellung der umfassenden Produktliste von Bauprodukten aus Kunststoff dienten zunächst die Listen der harmonisierten Spezifikationen (hEN und EAD) nach europäischer Bauproduktenverordnung (EU) Nr. 305/2011 sowie die Musterverwaltungsvorschrift für Technische Baubestimmungen (speziell die Teile B, C und D) (Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) 2017; Europäische Kommission 2018b).

Die oben genannten Listen und Verordnungen wurden im Hinblick auf vorwiegend aus Kunststoffen gefertigte (bzw. bitumenbasierte) Bauprodukte gesichtet, betreffende Bauprodukte erfasst und in die Produktliste aufgenommen. Die Detailgenauigkeit der gelisteten Bauprodukte variierte hierbei deutlich, besonders im Hinblick auf die Konkretisierung verwendeter Kunststoffsorten zur Herstellung entsprechender Bauprodukte.

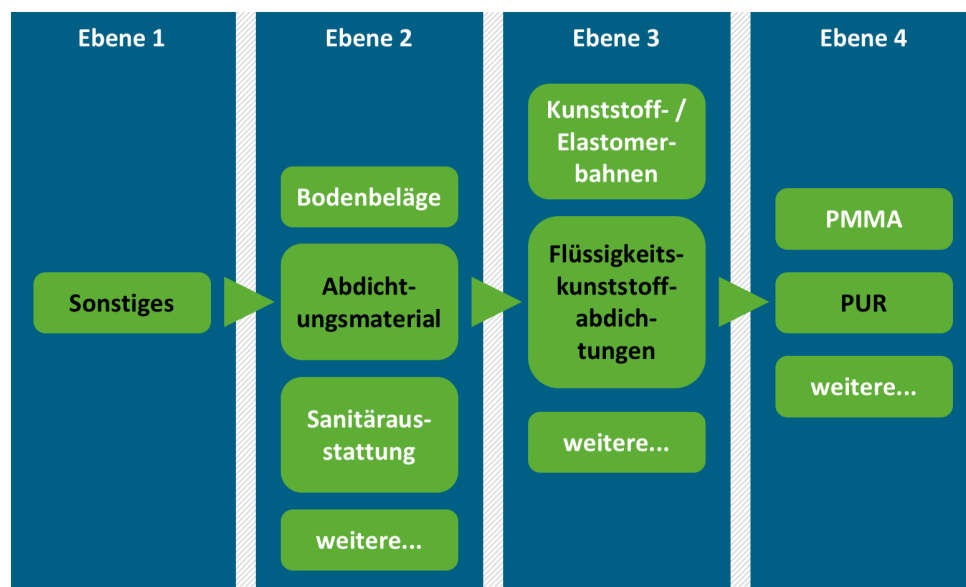
So weist die Musterverwaltungsvorschrift für Technische Baubestimmungen beispielsweise bei Kunststoff-Rohrleitungssystemen eine hohe Detailschärfe bezüglich der üblicherweise verwendeten Kunststoffsorten (z. B. Polyvinylchlorid (PVC), Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), etc.) auf, und die Daten konnten direkt in die Produktpalette übertragen werden (Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) 2017). Für einen Großteil der recherchierten Bauprodukte war jedoch eine derartige Detailschärfe hinsichtlich der eingesetzten Kunststoffe innerhalb der harmonisierten Listen, Bestimmungen und Normen nicht vorhanden. Lagen für ein Bauprodukt aus Kunststoff keine detaillierten Informationen zum üblicherweise verwendeten Werkstoff vor, wurden ergänzende Literatur- und Internetrecherchen durchgeführt. Hierbei gesammelte Daten stammen fast ausschließlich aus der Fachliteratur oder es wurde auf Hersteller- sowie Händlerangaben zurückgegriffen.

Um die Übersichtlichkeit der erstellten Produktliste sicherzustellen, erfolgte eine Einteilung der recherchierten Bauprodukte auf vier Ebenen. Im Folgenden wird die Ebenenstruktur – beginnend mit der untersten Ebene 4 – kurz skizziert:

Ebene 4 enthält über 240 recherchierte Bauprodukte aus Kunststoff (hierbei handelt es sich nicht um herstellerspezifische Bauprodukte), für welche sowohl die Art der Anwendung als auch

der eingesetzte Kunststoff ermittelt wurde. Es handelt sich dabei um die Ebene mit dem höchsten Detaillierungsgrad. Diese Bauprodukte ordnen sich zunächst über 50 übergeordneten Produktkategorien auf Ebene 3 unter, welche wiederum in 14 erneut übergeordnete Produktkategorien auf Ebene 2 gegliedert werden können. Die 14 Produktkategorien verteilen sich schließlich auf die vorhandenen vier Bereiche Rohre, Dämmung, Profile und Sonstiges der Ebene 1. Nachstehende Abbildung 1 zeigt die Strukturierung der erstellten Produktliste von Bauprodukten aus Kunststoffen in Deutschland am Beispiel der Flüssigkeitskunststoff-Abdichtung aus Polyurethan (PUR) auf:

Abbildung 1: Strukturierung der Produktliste am Beispiel der Flüssigkeitskunststoff-Abdichtungen aus PUR



Quelle: Eigene Darstellung SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Die vorgenommene Gliederung hat neben der Schaffung von Übersichtlichkeit weitere Vorteile. Für viele der detaillierten, materialspezifischen Produkte der Ebene 4 (z. B. Duschwannen aus Polymethylmethacrylat (PMMA)) liegen keine eigenen, separaten Angaben über aktuelle Marktmengen vor, stattdessen aber für allgemeine Produktarten auf der übergeordneten Ebene 3 (z. B. für Bade- und Duschwannen allgemein). Zudem erlaubt die Aufteilung auf die vier Teilbereiche Rohre, Dämmung, Profile und Sonstiges einen Vergleich der ermittelten Mengen mit der Conversio-Studie „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017“, in welcher Bauprodukte aus Kunststoff in ähnlicher Weise aufgeteilt wurden (Lindner und Schmidt 2018). Auf diese Weise ist später ein Vergleich der ermittelten Daten der vorliegenden Studie mit der Conversio-Studie möglich.

2.1.2 Vorgehensweise bzgl. der Einschätzung aktueller Marktmengen

Nach der Ermittlung der unterschiedlichen Bauprodukte aus Kunststoffen erfolgte eine Einschätzung aktueller Marktmengen (im Sinne von produzierten und verbauten Mengen). Als Basis für die Produktionsmengen wurden hierfür vorerst Daten aus der Produktionsstatistik des Statistischen Bundesamtes nach dem Güterverzeichnis (9-Steller Daten) herangezogen (Destatis und Genesis-Online 2020b). Die 9-Steller Daten werden vierteljährig erhoben sowie veröffentlicht und geben Informationen über die in Deutschland produzierten Mengen von ausgewählten Gütern. In Abteilung 22 des Güterverzeichnisses finden sich Angaben über jährlich produzierte Mengen von Gummi- und Kunststoffwaren. Dem Baubereich zuordenbare

Produkte finden sich sowohl in der Güterklasse 2223 (Baubedarfsartikel aus Kunststoffen) als auch in der Güterklasse 2221 (Platten, Folien, Schläuche und Profile aus Kunststoffen) wieder.

Eine Sichtung und Auswertung ergab allerdings schnell, dass die Daten des Statistischen Bundesamtes für eine eindeutige Zuordnung der unterschiedlichen Produktionsmengen zu den jeweilig recherchierten Bauprodukten allein nicht ausreichend sind. Zwar können durch das Statistische Bundesamt erste Produktionsmengen zu unterschiedlichen Bauprodukten zur Verfügung gestellt werden, problematisch ist hierbei allerdings die vom Statistischen Bundesamt verwendete Struktur der Daten. In der Regel werden unter den neunstelligen Nummerierungen und Produktbezeichnungen mehrere, teilweise sehr unterschiedliche Bauprodukte aus Kunststoffen zusammengefasst. So werden beispielsweise Bodenbeläge, Wand- und Deckenverkleidungen aus Kunststoffen nicht getrennt, sondern als eine gemeinsame Mengenangabe aufgelistet, ohne möglichen Rückschluss der Verteilung auf die jeweiligen, einzelnen Bauprodukte. Auf Nachfrage beim Statistischen Bundesamt wurde bestätigt, dass für solche Fälle keine zusätzlichen Informationen vorliegen, welche eine genauere Zuordnung der Mengenangaben zu den einzelnen Bauprodukten ermöglichen. Zusätzlich ist den Daten der Produktionsstatistik nicht immer klar entnehmbar, für welche Güter- und Produktarten eine ausschließliche Verwendung im Baubereich vorliegt.

Weiterhin erschwert wurden die Mengenanalysen durch die unterschiedlichen, in der Produktionsstatistik verwendeten Einheiten. Zwar liegt ein Großteil der Angaben bereits in der benötigten Einheit Kilogramm oder metrische Tonne vor, speziell bei den Baubedarfsartikeln aus Kunststoffen erfolgt die Angabe jedoch häufig in Quadratmetern (z. B. bei den Bodenbelägen, Wand- und Deckenbekleidungen) oder in Stückzahlen (z. B. bei Badewannen, Duschen und Waschbecken). Angaben dieser Art erfordern die aufwändige Erstellung eigener Konvertierungsfaktoren, welche es erlauben, die vorhandenen Daten als Gewichtsangaben darzustellen, um so spätere Vergleiche unter den verschiedenen Bauprodukten zu ermöglichen. In zusätzlich erfolgten Literaturrecherchen konnte festgestellt werden, dass die Strukturierung der Daten des Statistischen Bundesamtes bereits in anderen Studien, welche sich mit ähnlichen Forschungsfragen beschäftigten, ein Problem darstellte, und daher auf andere Mengenangaben zurückgegriffen wurde (Deilmann u. a. 2014).

Für die Ermittlung der unterschiedlichen Produktionsmengen wurde daher neben den 9-Steller-Daten auch auf Branchen- und Verbandsstatistiken sowie vorhandene Fachliteratur zurückgegriffen. Die Qualität der Daten ist hierbei unterschiedlich und reicht von ausführlichen, jährlich durch die Verbände erhobenen Daten bis zu einzelnen Mengenangaben in Fachzeitschriften oder Pressemitteilungen zu ausgewählten Jahren.

Um von den Produktionsmengen auf verbaute Mengen zu schließen, wurde vereinfacht angenommen, dass die von Im- und Exporten bereinigten Produktionsmengen die inländisch verbauten Mengen darstellen. Um auf Im- und Exporte schließen zu können wurden einerseits Daten der Außenhandelsstatistik nach dem Warenverzeichnis des Statistischen Bundesamtes (Destatis und Genesis-Online 2020a), andererseits erneut Daten der Verbände und aus der Fachliteratur herangezogen. Hierbei ist anzumerken, dass die Daten zur Außenhandelsstatistik lediglich eine Zuordnung der Im- und Exportmengen zu 8-Steller-Daten zulassen, die der Produktionsstatistik entnommenen Produktionsmengen allerdings auf detaillierteren 9-Steller-Daten beruhen. Teilweise mussten die Im- und Exportmengen deshalb vereinfacht und anteilig nach der Produktionsmenge einzelner Produkte auf die jeweiligen Produktarten aufgeteilt werden.

Durch die Verwendung der unterschiedlichen Verbands- und Branchenstatistiken, den Daten aus der Fachliteratur und den Daten des Statistischen Bundesamtes konnte so eine erste

Ermittlung der aktuell produzierten und verbauten Mengen erfolgen. In Interviews mit Branchenexperten, Herstellern oder Verbänden konnten die so ermittelten Mengen anschließend bestätigt oder ergänzt werden.

2.1.3 Vorgehensweise bzgl. der Betrachtung zum anthropogenen Lager

Grundsätzlich existieren bereits vereinzelte Studien (bspw. (Schiller u. a. 2015) oder (Deilmann u. a. 2014)), die Größe und Zusammensetzung des inländisch vorhandenen anthropogenen Lagers zum Inhalt haben. Im Folgenden soll kurz erläutert werden, welche Erkenntnisse jenen Studien entnommen werden konnten und inwiefern diese für die hier zu erstellende Studie genutzt wurden. Es sei erwähnt, dass Kunststoffe in den beiden Studien nicht den alleinigen betrachteten Werkstoff darstellen und nicht in derselben Detailtiefe betrachtet wurden, wie es in dieser Arbeit der Fall ist. Gleichzeitig unterscheiden sich die Betrachtungsräume jener Studien deutlich vom in dieser Arbeit gewählten Betrachtungsraum.

Die auf den Werkstoff Kunststoff zurückzuführende Größe des anthropogenen Lagers wird von Schiller et al. (2015) für das Jahr 2010 auf insgesamt rund 254 Mio. t geschätzt. In der Studie erfolgte eine Unterteilung des Materiallagers in die Teilbereiche *Technische Infrastrukturen*, *Bauwerke des Hochbaus*, *Haustechnik* und *Langlebige Konsumgüter*. Rund 226 Mio. t sind hierbei auf den Teilbereich *Bauwerke des Hochbaus* zurückzuführen, während lediglich 12 Mio. t dem Bereich *Technische Infrastrukturen*, 1 Mio. t dem Bereich *Haustechnik* und 15 Mio. t dem Bereich *Langlebige Güter* zuzuordnen sind. Von den rund 226 Mio. t an Kunststoffen des Teilbereichs *Bauwerke des Hochbaus* werden im Rahmen der Studie 64 Mio. t der Anwendungsart *Dach- und Dichtungsbahnen*, 79 Mio. t *Fenster und Türen* sowie 83 Mio. t *Dämmmaterialien* zugeschrieben. Problematisch für eine Verwendung der Daten in dieser Arbeit ist etwa, dass für Rohrleitungssysteme aus Kunststoffen, obwohl diese einen Großteil der im Bauwesen eingesetzten Kunststoffmenge verbrauchen, kein separater Wert in einer ähnlichen Größenordnung angegeben wird. Gleichzeitig kann für die ermittelten anwendungsbezogenen Mengen nicht nachvollzogen werden, aus welchen unterschiedlichen Kunststoffen sich diese zusammensetzen (z. B. PVC, PE, Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK), etc.) (Schiller u. a. 2015).

In einer weiteren Untersuchung zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau schätzen Deilmann et al. (2014) das Materiallager des Hochbaus für 2010 insgesamt auf 15.256 Mio. t, wobei Kunststoffe hiervon mit 181 Mio. t rund 1,2 % ausmachen. In dieser Studie findet eine Unterteilung der Kunststoffe im anthropogenen Lager des Hochbaus in die drei Anwendungsarten *Dämmstoffe*, *Fenster und Türen* sowie *Sonstige Kunststoffe* (inklusive Leitungen und Bodenbeläge) statt. Hierbei werden der Anwendungsart *Dämmstoffe* rund 30 Mio. t, der Anwendungsart *Fenster und Türen*, 83 Mio. t und der Anwendungsart *Sonstige Kunststoffe* 68 Mio. t zugeordnet. Bezüglich der sich im anthropogenen Lager befindlichen Kunststoffsorten werden lediglich Richtwerte für PVC (rund 120 Mio. t) und PE (26 Mio. t) angegeben, welche jedoch wiederum keiner Anwendungsart zugeordnet werden können. Ein weiterer Unterschied, der eine Verwendung der Daten aus jener Studie innerhalb der eigenen, hier vorliegenden Studie erschwert, ist, dass auf Anwendungsbereiche des Bauwesens außerhalb des Hochbaus (z. B. Tiefbau, Garten- und Landschaftsbau) nicht näher eingegangen wird (Deilmann u. a. 2014).

Da für eine Betrachtung des aktuellen anthropogenen Lagers im Bereich der Kunststoffe im Bauwesen nicht genügend belastbare Daten vorlagen, wurde vorerst eine Betrachtung zur Lagerdynamik über einen Zeitraum von 2003 (inputseitig) bzw. 2005 (outputseitig) bis 2017 vorgenommen. Um eine erste Abschätzung vom jährlichen Zuwachs des Lagers zu bekommen, wurden einerseits diejenigen Mengen an Kunststoffen, die in den letzten Jahren in das anthropogene Lager hineinfließen (Inputmenge), andererseits diejenigen Mengen, die dem Lager entnommen wurden (Outputmenge), bestimmt.

Um jährliche Schwankungen der Inputmengen berücksichtigen zu können, wurde bei der inputseitigen Betrachtung die für 2017 ermittelte, verbaute Menge mit Daten zum Wachstum

der dem Baubereich zuordenbaren Kunststoffverarbeitung verrechnet. Diese wurden der im zweijährigen Rhythmus erscheinenden Untersuchung zum Kunststoffmarkt, durchgeführt durch die Consultic Marketing & Industrierberatung GmbH bzw. seit 2018 durch die Conversio Market & Strategy GmbH entnommen (Lindner und Schmidt 2018). Die inputseitige Entwicklung des anthropogenen Lagers konnte so, ausgehend von der eigens ermittelten verbauten Menge im Jahr 2017, rückwirkend bis 2003 berechnet werden.

Für die outputseitige Betrachtung des Lagers wurde auf Daten der Abfallstatistik (Fachserie 19) des Statistischen Bundesamtes zurückgegriffen (Destatis 2020). Folgende, den Bau- und Abbruchabfällen zugehörigen Abfallarten wurden hierbei als relevant angesehen: Kunststoffe (Abfallschlüssel 170203), gemischte Bau- und Abbruchabfälle (Abfallschlüssel 170904), Dämmmaterialien (Abfallschlüssel 170603, 170604), Kabelabfälle (Abfallschlüssel 170411) und Kunststoffabfälle (ohne Verpackungen) aus dem Bereich des Garten- und Landschaftsbaus (Abfallschlüssel 020104). Während für die unter Abfallschlüssel 170203 und Abfallschlüssel 020104 aufgeführten Abfälle angenommen werden kann, dass es sich ausschließlich um Kunststoffe handelt, wurde auf Basis unterschiedlicher Expertenaussagen sowie plausibler Annahmen für die anderen Abfallarten der entsprechende Kunststoffanteil abgeschätzt. Für die gemischten Bau- und Abbruchabfälle (Abfallschlüssel 170904) wurde der Kunststoffanteil nach der Auswertung geeigneter Fachliteratur und der Durchführung eines Experteninterviews auf 15 % geschätzt. Da neben Dämmmaterialien aus Kunststoff unter den Abfallschlüsseln 170603 und 170604 auch mineralische oder aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellte Dämmmaterialien entsorgt werden, wurde die vereinfachte Annahme getroffen, dass das Verhältnis der Produktionsmenge zwischen mineralischen, synthetischen und aus nachwachsenden Rohstoffen gefertigten Dämmmaterialien in etwa dem Verhältnis der Zusammensetzung in der entsprechenden Abfallfraktion entspricht. Der Kunststoffanteil der beiden Abfallschlüsselnummern wurde so auf rund 12 % geschätzt. Für Kabelmaterial-Abfälle konnte der Kunststoffanteil auf Basis eines durchgeführten Experteninterviews schließlich auf rund 30 % geschätzt werden. Die outputseitige Betrachtung des Lagers konnte so für den Zeitraum zwischen 2005 und 2017 vorgenommen werden (Dehne u. a. 2015; Destatis 2020).

Sowohl für die inputseitige als auch für die outputseitige Betrachtung wurde anschließend eine Abschätzung zukünftiger Entwicklungen vorgenommen, um so unter anderem auf die zukünftige Entwicklung der Rückflüsse aus dem Lager schließen zu können.

2.2 Erstellung der Produktliste für Bauprodukte aus Kunststoff

Das Ergebnis der Bauproduktenrecherche ist eine Produktliste für Bauprodukte aus Kunststoff, die in Form eines Supplements veröffentlicht ist. Diese Variante wurde gewählt, da so die Übersichtlichkeit sowie der volle Umfang der Ergebnisse sinnvoll genutzt werden können. Im Folgenden soll jedoch ein kurzer Überblick über die erstellte Produktliste gegeben werden. Die recherchierten Bauprodukte wurden vier Anwendungsbereichen zugeordnet. Diese sind nachstehend aufgeführt:

- Rohre
- Dämmung
- Profile
- Sonstiges

Der Anwendungsbereich Rohre umfasst nicht biegsame und biegsame Rohrleitungssysteme sowie Schächte. Es handelt sich um 25 unterschiedlich Produkte in Ebene 4. Dämmmaterialien umfassen 15 Bauprodukte der Wärme- und Schalldämmung in vierter Ebene, wobei 80 % davon

auf Wärmedämmprodukte zurückzuführen sind. Der Bereich der Profile setzt sich im Wesentlichen aus Bauprofilen, Rollläden, Türen und Fenstern zusammen und umfasst 12 Bauprodukte. Zudem gibt es den großen Bereich der sonstigen Bauprodukte, welcher aus circa weiteren 38 Bauprodukten besteht.

Die erstellte Produktliste ist ebenso in einer Tabelle in reduzierter Form im Anhang bis zur Ebene 4 inklusive der zugehörigen bautechnischen Normen dargestellt. Zudem ist jedem Bauprodukt der exakte Kunststofftyp zugeordnet. Die vollumfänglichen Ergebnisse sind jedoch dem Supplement zu entnehmen.

2.2.1 Navigation durch das Supplement

Ziel dieses Kapitels ist es, den potentiellen Nutzern einen Überblick über die Inhalte und Funktionalitäten des Supplements zu geben. Das Supplement ist in einem xlsx basierten Dateiformat umgesetzt und besteht aus sechs Tabellenblättern, die untenstehend aufgelistet sind und im Folgenden kurz beschrieben werden:

- ▶ Bauproduktliste gesamt (Tabellenblatt 1)
- ▶ Ebene 1 (Tabellenblatt 2)
- ▶ Ebene 2 (Tabellenblatt 3)
- ▶ Ebene 3 (Tabellenblatt 4)
- ▶ Ebene 4 (Tabellenblatt 5)
- ▶ EAD, hEN, MVVBT – DIN-Titel (Tabellenblatt 6)

Das **Tabellenblatt 1 “Bauproduktliste gesamt”** zeigt die ermittelten Bauprodukte auf und stellt deren Unterteilung in die Ebenen 1, 2, 3 und 4 dar. Dem Tabellenblatt können die Normen und technischen Regeln entnommen werden, welchen die betreffenden Bauprodukte unterliegen. Gleichzeitig wurden die für Bauprodukte üblicherweise verwendeten Kunststoffsorten benannt und dem jeweiligen Kunststofftyp (Thermoplast, Duroplast, Elastomer, Verbundmaterial) zugeordnet. Mit Hilfe der Filterfunktion kann beispielsweise nach ausgewählten Anwendungsbereichen, Kunststofftypen oder –sorten gesucht werden und die gewünschte Darstellung leicht eigenständig gewählt werden.

Das **Tabellenblatt 2 “Ebene 1”** zeigt, basierend auf Informationen aus den untergeordneten Tabellenblättern, die inländisch produzierten und verbauten Mengen von Bauprodukten aus Kunststoff in aggregierter Form. Anwendungsbezogen kann hierbei zwischen den vier gewählten Bereichen *Rohre*, *Dämmung*, *Profile* und *Sonstiges* unterschieden werden. Neben einer anwendungsbezogenen Aufteilung der ermittelten Mengen, findet im Tabellenblatt gleichzeitig eine Aufteilung nach Kunststoffsorten (z. B. PVC, GFK, PE, PP, ...) statt.

Das **Tabellenblatt 3 “Ebene 2”** zeigt 14 verschiedene, übergeordnete Produktarten, welche sich den Anwendungsbereichen *Rohre*, *Dämmung*, *Profile* und *Sonstiges* unterordnen. Für die unterschiedlichen übergeordneten Produktarten werden die ermittelten produzierten und verbauten Mengen, welche wiederum auf Informationen aus dem untergeordneten Tabellenblatt “Ebene 3” basieren, dargestellt. Gleichzeitig kann die Zuordnung zu Tabellenblatt “Ebene 1” nachvollzogen werden.

Das **Tabellenblatt 4 “Ebene 3”** zeigt 52 unterschiedliche untergeordnete Produktarten, welche die 14 Produktarten in Tabellenblatt “Ebene 2” weiter aufschlüsseln. Für die unterschiedlichen

untergeordneten Produktarten werden die ermittelten produzierten und verbauten Mengen, welche wiederum auf Informationen aus dem untergeordneten Tabellenblatt "Ebene 4" basieren, dargestellt. Gleichzeitig kann die Zuordnung zu den übergeordneten Produktarten im Tabellenblatt "Ebene 2" nachvollzogen werden.

Das **Tabellenblatt 5 "Ebene 4"** zeigt sämtliche im Rahmen des Projekts ermittelten Bauprodukte aus Kunststoffen im Detail auf. Neben detaillierten Informationen zu produzierten und verbauten Mengen können hier auch die unterschiedlichen zum Einsatz kommenden Kunststoffe identifiziert werden.

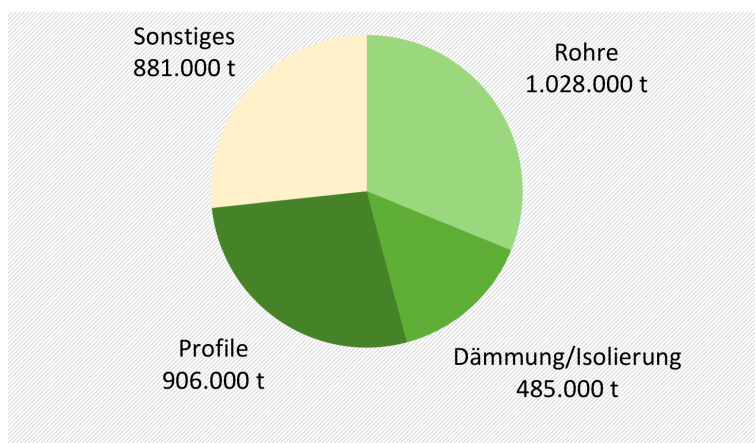
Zudem kann nachvollzogen werden, welche der gelisteten Produkte sich welchen Produkten des Tabellenblatts "Ebene 3" unterordnen.

Dem **Tabellenblatt 6 "Quellen: EAD, hEN, MVVBT – DIN-Titel"** können noch einmal separat die identifizierten technischen Regeln und Normen der Listen der harmonisierten Spezifikationen (hEN und EAD) nach europäischer Bauproduktenverordnung (EU) Nr. 305/2011 und der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVVBTB) entnommen werden, welche sich auf Bauprodukte aus Kunststoff beziehen. Die Listen der hEN und EAD werden kontinuierlich überarbeitet, weshalb darauf zu achten ist, stets die aktuelle Version heranzuziehen.

2.3 Einschätzung aktueller Marktmengen

Dieses Kapitel enthält die Ergebnisse der Evaluierung aktueller Marktmengen, wobei das Jahr 2017 als Bezugsjahr gewählt wurde. Die ermittelte Gesamtmenge an in Deutschland produzierten Bauprodukten aus Kunststoffen beträgt für das Jahr 2017 rund 3,30 Mio. t. und ist in der folgenden Abbildung 2 auf die vier aggregierten Anwendungsbereiche (Ebene 1) aufgeteilt dargestellt:

Abbildung 2: Ermittelte Produktionsmengen der vier aggregierten Anwendungsbereiche im Jahr 2017 in Tonnen

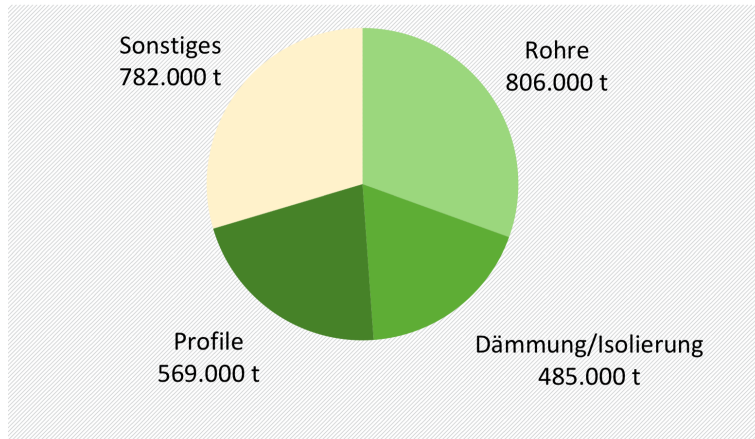


Quelle: Eigene Recherchen SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Berechnungsgrundlage ist dem Supplement zu entnehmen)

Die prozentuale Aufteilung setzt sich wie folgt zusammen: der Teilbereich *Rohre* macht mit 31 % den größten Anteil der Produktionsmenge aus, gefolgt von den Teilbereichen *Profile* und *Sonstiges* mit jeweils 27 %. Dämmmaterialien machen rund 15 % der gesamten Produktionsmenge aus.

Die verbaute Menge ergibt sich aus der produzierten Menge abzüglich des ermittelten Exportüberschusses von rund 0,66 Mio. t und beträgt für das Jahr 2017 rund 2,64 Mio. t. Die Aufteilung in die aggregierten Anwendungsbereiche ist in nachstehender Abbildung 3 dargestellt:

Abbildung 3: Ermittelte verbaute Mengen der vier aggregierten Anwendungsbereiche im Jahr 2017 in Tonnen



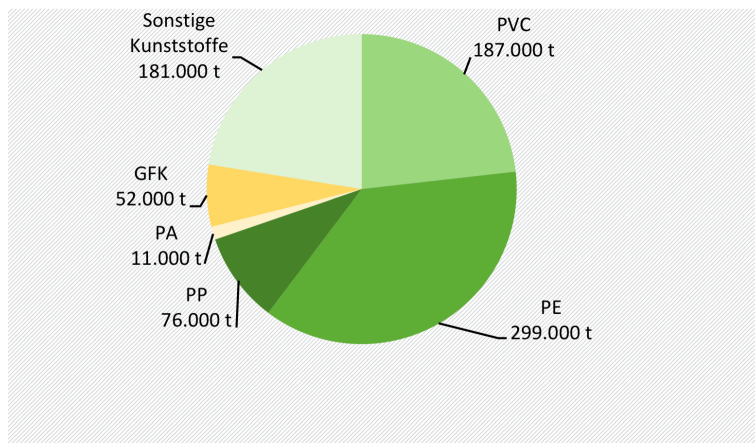
Quelle: Eigene Recherchen SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Berechnungsgrundlage ist dem Supplement zu entnehmen)

Betrachtet man die prozentuale Aufteilung der verbauten Mengen, so sind jeweils 30 % auf die Teilbereiche *Rohre* und *Sonstiges* zurückzuführen, 22 % auf *Profile* und rund 18 % auf Dämmmaterialien.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels erfolgt eine detailliertere Betrachtung der einzelnen aggregierten Anwendungsbereiche *Rohre*, *Dämmung*, *Profile* und *Sonstiges*.

Im Teilbereich *Rohre* stellt sich die Datenlage grundsätzlich als zufriedenstellend dar. Neben den Daten der Produktionsstatistik wurden hier vor allem die Statistiken des Fachverbands der Kunststoffrohr-Industrie als Ergänzung zur Ermittlung aktueller Marktmengen genutzt. Eine Sichtung und Auswertung der Daten ergab somit eine jährliche Produktionsmenge von rund 1,03 Mio. t Kunststoffrohren, wobei Rohre aus Polyethylen und Polyvinylchlorid den mengenmäßig größten Anteil ausmachen. Die verbaute Menge wurde auf rund 0,81 Mio. t jährlich geschätzt (hiervon rund 0,30 Mio. t PE, 0,19 Mio. t PVC, 0,08 Mio. t PP, 0,05 Mio. t GFK und 0,19 Mio. t nicht weiter definierbare Kunststoffe), dargestellt in Abbildung 4 (Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie e.V. (KRV) 2018; Destatis und Genesis-Online 2020b; Destatis und Genesis-Online 2020a).

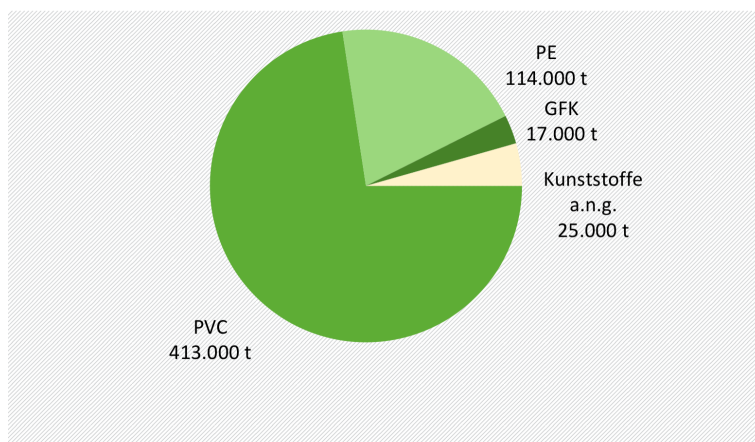
Abbildung 4: Verbaute Kunststoffmenge des Teilbereichs *Rohre* im Jahr 2017 in Tonnen



Quelle: Eigene Recherchen SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Berechnungsgrundlage ist dem Supplement zu entnehmen)

Für den Teilbereich *Profile* ergab sich eine Produktionsmenge im Jahr 2017 von rund 0,91 Mio. t. Das hier vorrangig verwendete Material ist PVC. Aufgrund eines sehr hohen Exportüberhangs innerhalb dieses Teilbereichs wurde die verbaute Menge auf rund 0,57 Mio. t geschätzt (hiervon rund 0,41 Mio. t PVC, 0,02 Mio. t GFK, 0,11 Mio. t PE, 0,03 Mio. t nicht weiter definierbare Kunststoffe) (Destatis und Genesis-Online 2020b; (Destatis und Genesis-Online 2020a). Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 visualisiert.

Abbildung 5: Verbaute Kunststoffmenge des Teilbereichs *Profile* im Jahr 2017 in Tonnen

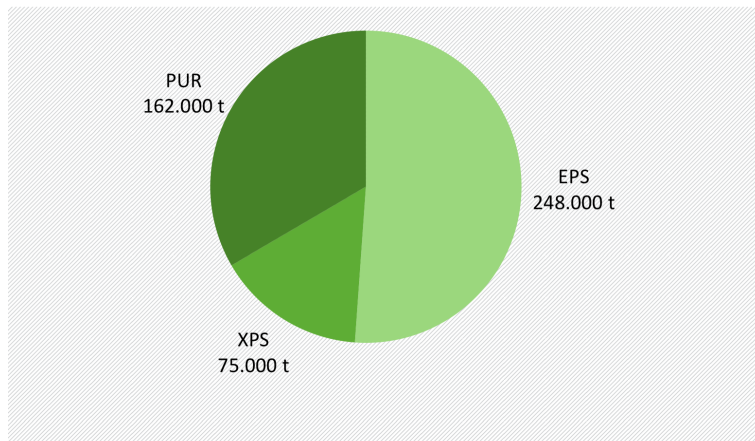


Quelle: Eigene Recherchen SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Berechnungsgrundlage ist dem Supplement zu entnehmen)

Im Teilbereich *Dämmung* wurden hauptsächlich Daten aus der Fachliteratur und von Verbänden (z. B. aus erfolgten Experteninterviews) genutzt (Bauzentrum München 2017; Bürger u. a. 2017; Sprengard u. a. 2014). Hierbei sei erwähnt, dass sich die recherchierten Informationen hauptsächlich auf die drei Dämmstoffarten Expandiertes Polystyrol (EPS), Extrudiertes Polystyrol (XPS) und PUR beziehen. Für andere Dämmstoffe (z. B. aus Phenolharz-Hartschaum oder Polyethylen-Schaum) lagen keine Informationen zu Marktmengen vor, wobei im Rahmen der Experteninterviews bestätigt wurde, dass diese bezüglich der gesamt verwendeten Menge von Dämmstoffen einen vernachlässigbaren Anteil ausmachen. Da Daten zu Mengen von Dämmstoffen ausschließlich in der Einheit m³ vorlagen, wurden entsprechende Konvertierungsfaktoren (basierend auf den Rohdichten der einzelnen Dämmstoffarten, entnommen aus der entsprechenden Fachliteratur) gebildet, um eine Umrechnung in Tonnen zu

erlauben. Die gesamte Produktionsmenge konnte für Dämmstoffe somit auf 0,49 Mio. t bestimmt werden. Da keine detaillierteren Daten zu Im- und Exporten vorlagen, wurde, basierend auf Informationen aus einem Experteninterview, davon ausgegangen, dass sich Im- und Exporte in etwa ausgleichen. Somit wird die verbaute Menge ebenfalls auf 0,49 Mio. t geschätzt (rund 0,25 Mio. t EPS, 0,08 Mio. t XPS, 0,16 Mio. t PUR), wie in Abbildung 6 dargestellt.

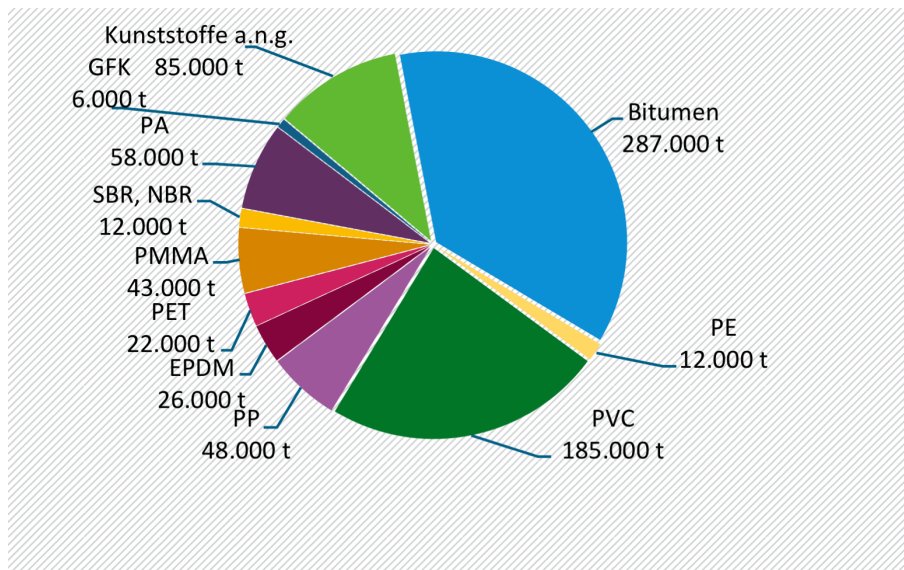
Abbildung 6: Verbaute Kunststoffmenge des Teilbereichs Dämmung im Jahr 2017 in Tonnen



Quelle: Eigene Recherchen SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Berechnungsgrundlage ist dem Supplement zu entnehmen)

Für den letzten Teilbereich *Sonstiges* sind vor allem die Produktionsmengen der Abdichtungsmaterialien, Bodenbeläge und Kabel besonders relevant. Aufgrund der Vielseitigkeit und der hohen Anzahl der unterschiedlichen Produkte des Teilbereichs stellte sich die Verfügbarkeit von Daten zu aktuellen Marktmengen der unterschiedlichen Bauprodukte als sehr heterogen dar. So wurde zur Einschätzung der Mengen von Abdichtungsbahnen, Bodenbelägen und Kabeln auf Daten aus der Fachliteratur oder entsprechenden Verbandstatistiken zurückgegriffen. Für Daten sonstiger Produkte, die dem Teilbereich *Sonstiges* angehören, wurde auf die Produktionsstatistik zurückgegriffen (Destatis und Genesis-Online 2020b). Die Produktionsmenge für den Teilbereich *Sonstiges* wurde somit auf rund 0,88 Mio. t eingeschätzt. Rund 0,29 Mio. t hiervon entfallen auf bitumenbasierte Dach- und Dichtungsbahnen. Die restliche Produktionsmenge ist vor allem auf Bodenbeläge (rund 0,20 Mio. t) (Deutsche Umwelthilfe e.V. (DUH) 2017; Wecobis Ökologisches Baustoffinformationssystem 2018), Kunststoff-Dach- und Dichtungsbahnen (0,14 Mio. t) (Ernst 2017; Eurobitume 2019) und Kabelmaterial (0,07 Mio. t) (Lindner 2014) zurückzuführen. Die dem Teilbereich zuordenbare verbaute Menge wurde auf rund 0,78 Mio. t geschätzt, wobei anzumerken ist, dass für Abdichtungsmaterialien und die Bodenbeläge keine Werte zu Im- und Exporten gefunden werden konnten. Mit rund 0,29 Mio. t ist ein großer Teil der verbauten Menge auf bitumenbasierte Dach- und Dichtungsbahnen zurückzuführen. Die verbauten 0,19 Mio. t PVC sind vorrangig auf die drei Anwendungsarten Dach- und Dichtungsbahnen, Bodenbeläge und Kabelmaterial zurückzuführen. Während etwa Polyamid (PA) (0,06 Mio. t), PP (0,05 Mio. t) und PMMA (0,04 Mio. t) weitere große Anteile des Teilbereichs ausmachen, konnten knapp 0,09 Mio. t keinem spezifischen Kunststoff zugeordnet werden. Die Daten sind in der folgenden Abbildung 7 visualisiert.

Abbildung 7: Verbaute Kunststoffmenge des Teilbereichs *Sonstiges* im Jahr 2017 in Tonnen

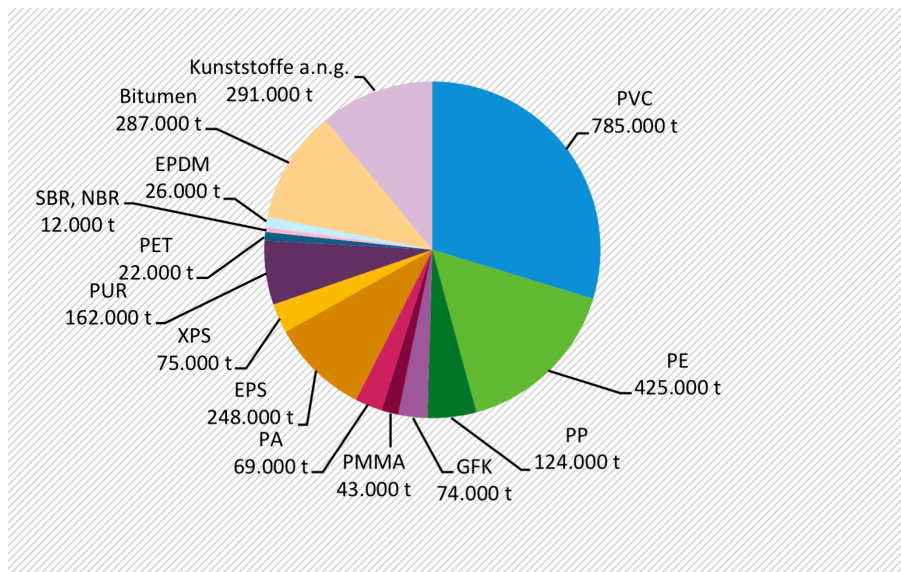


Quelle: Eigene Recherchen SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Berechnungsgrundlage ist dem Supplement zu entnehmen)

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass auch Agrar- oder Mulchfolien im Garten- und Landschaftsbau jährlich in durchaus relevanten Mengen inländisch produziert und verwendet werden. Da jedoch keine belastbare Datengrundlage zur Ermittlung der produzierten und verwendeten Menge gefunden werden konnte, können Marktmengen nur abgeschätzt werden. So gibt die Initiative Erntekunststoffe Recycling Deutschland (ERDE) an, dass sie im Jahr 2019 rund 20.500 t an Erntekunststoffen sammelte und werkstofflich verwerten konnte. Gleichzeitig gibt die Initiative an, dass sie aktuell bereits rund 35 % der in Umlauf gebrachten Silo- und Stretchfolien sammelt. Geht man für eine grobe Schätzung also davon aus, dass die 20.500 t rund 35 % der in Umlauf gebrachten Erntekunststoffe entsprechen, kann von einer insgesamt jährlich in Umlauf gebrachten Menge von rund 58.500 t ausgegangen werden (Initiative Erntekunststoffe Recycling Deutschland (ERDE) 2020). Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich die 20.500 t maßgeblich auf Silo- und Stretchfolien beziehen. Bislang werden nicht alle Agrarfolien zurückgenommen, weshalb diese auch keinem werkstofflichen Recycling zugeführt werden können. Beispielsweise befindet sich die Rücknahme von Spargelfolien erst im Anfangsstadium, Mulchfolien hingegen werden noch überhaupt nicht zurückgenommen.

Nach Aggregation der Teilbereiche Rohre, Profile, Dämmung und Sonstiges ergibt sich für die verbauten Mengen (2,64 Mio. t.) im Jahr 2017 folgende in Abbildung 8 dargestellte Aufteilung nach Kunststoffsorte:

Abbildung 8: Ermittelte verbaute Menge nach Kunststoffsorte im Jahr 2017 in Tonnen



Quelle: Eigene Recherchen SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Berechnungsgrundlage ist dem Supplement zu entnehmen)

Etwa 30 % der verbauten Menge sind auf den Kunststoff PVC und rund 16 % auf PE zurückzuführen. Weitere mengenmäßig besonders relevante Kunststoffe sind beispielsweise EPS (Anteil an PM 8 %, an VM 9 %), PUR (PM 5 %, VM 6 %), PP (PM 4 %, VM 5 %) oder GFK (PM 3 %, VM 3 %).

2.3.1 Bauprodukte aus GFK

Da auch Produkte aus glasfaserverstärkten Kunststoffen verbreitet sind, bezüglich einer möglichst hochwertigen Verwertung häufig allerdings noch eine große Herausforderung darstellen, sollen sie im Folgenden einer kurzen separaten Betrachtung unterzogen werden. Die in Europa produzierte Gesamtmenge wird für das Jahr 2019 mit rund 1,14 Mio. t angegeben. Rund 36 % hiervon sind auf den Anwendungsbereich *Bau/Infrastruktur* zurückzuführen (weitere Bereiche: *Transport* 34 %, *Elektro/Elektronik* 15 %, *Sport/Freizeit* 14 %, *Sonstige* 1 %) (Witten und Mathes 2019).

Als für GFK mengenmäßig besonders relevante Bauprodukte wurden speziell Rohrleitungssysteme und Profile identifiziert, gleichzeitig wird GFK im Baubereich in kleineren Mengen auch in etlichen unterschiedlichen anderen Bauprodukten des Teilbereichs *Sonstiges* (z. B. Behälter, Tanks, Wandverkleidungen, Beschläge) eingesetzt. Während die gesamte GFK-Produktionsmenge in Deutschland in den Jahren 2016 bis 2019 nach Witten und Mathes [2019] zwischen 220.000 und 229.000 t lag, wurde im Rahmen der hier erstellten Studie die insgesamt inländisch im Baubereich verbrauchte Menge an GFK-Bauprodukten für das Jahr 2017 auf rund 75.000 t geschätzt. Diese Einschätzung basiert unter anderem auf einem durchgeführten Experteninterview mit einem Ansprechpartner der Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (AVK). Sie ist als plausibel anzusehen, da der Anteil des Bau- und Infrastrukturbereichs in Deutschland niedriger einzuschätzen ist, als im oben erwähnten europaweiten Vergleich (AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. 2020). Gleichzeitig ist jedoch anzumerken, dass GFK-Produkte häufig in Form von Einzelanfertigungen oder in geringen Zahlen hergestellt werden (z. B. zur Anfertigung von Brücken, Wasserrutschen, Spielplatzrutschen oder größeren Silos) und nicht eindeutig nachvollziehbar ist, ob und inwiefern entsprechende Mengen in der Produktionsstatistik des Statistischen Bundesamtes erfasst sind.

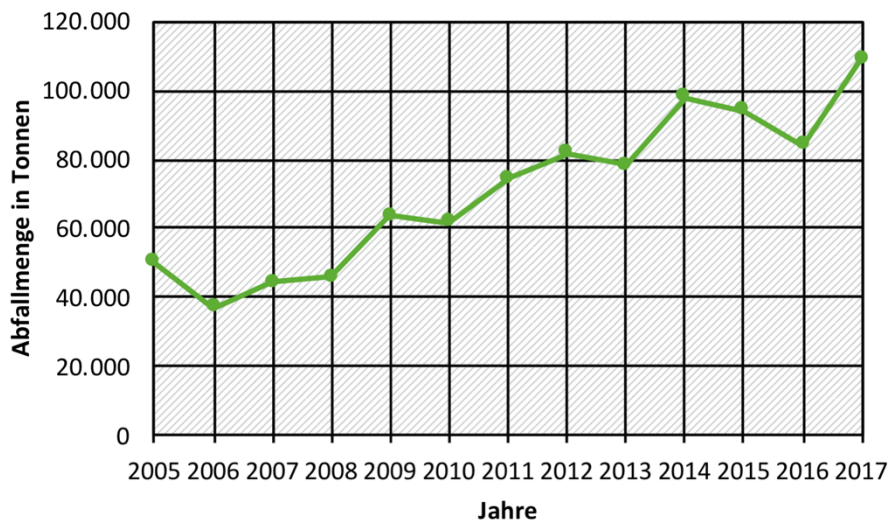
Zukünftig wird für alle Bereiche des GFK-Markts, also auch für den Bausektor, von einem Zuwachs ausgegangen. Große, weitere Potenziale für einen gesteigerten Einsatz von GFK können etwa für Rohrleitungssysteme (speziell in den Bereichen Neubau oder Kanalsanierung) identifiziert werden. Auch im Bereich der Brückensanierung und des Brückenbaus findet GFK seit einigen Jahren vermehrte Anwendung (Witten und Mathes 2019). Vorhandene Vorteile von GFK gegenüber den üblicherweise im Brückenbau verwendeten Werkstoffen sind etwa das geringere Gewicht (und die sich daraus ergebende stark vereinfachte und schnellere Brückeninstallation) und die hohe Beständigkeit gegenüber Korrosion. Gleichzeitig sind Brücken aus GFK zwar grundsätzlich teurer als Alternativen aus den üblicherweise beim Brückenbau verwendeten Werkstoffen, jedoch zeichnen sie sich über den gesamten Lebenszyklus gesehen auch durch eine erheblich geringere Wartungsanfälligkeit und dementsprechend geringere damit verbundene Kosten aus (Mottram und Henderson 2018).

2.4 Betrachtungen zum anthropogenen Lager

Insgesamt wird für den Zeitraum zwischen 2005 und 2017 von einer Inputmenge in das anthropogene Lager von rund 30,3 Mio. t an Kunststoffen ausgegangen (bitumenhaltige Dach- und Dichtungsbahnen hierbei zunächst vernachlässigt). Die Inputmenge unterliegt hierbei gewissen Schwankungen und steigt zwischen 2005 und 2007 um rund 12 % an und fällt anschließend in den Jahren 2008 und 2009 um insgesamt rund 17 %. Bis 2011 steigt die Menge erneut um rund 7 %, bevor sie bis 2015 um insgesamt etwas über 1 % fällt und schließlich bis 2017 um 4 % ansteigt. Besonders relevante Mengen sind hierbei PVC (rund 10,1 Mio. t) und PE (5,5 Mio. t). Zudem sind auch beachtliche Mengen auf die Kunststoffe PP (1,6 Mio. t), EPS (3,2 Mio.t) und PUR (2,1 Mio. t) zurückzuführen. Eine Menge von rund 3,7 Mio. t war erneut keinem spezifischen Kunststoff zuordenbar.

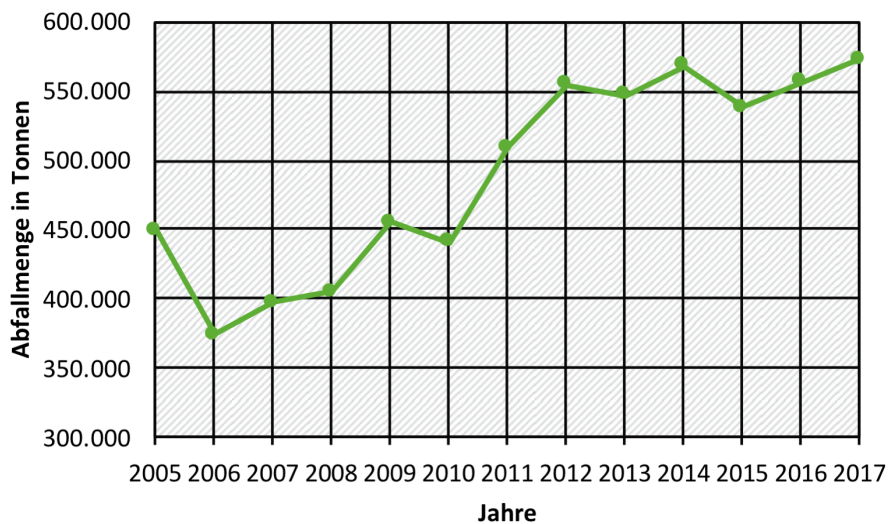
Output- bzw. abfallseitig, zeigt sich, dass bei allen betrachteten Abfallarten, trotz zwischenzeitlich geringer Rückgänge, im Zeitraum zwischen 2005 und 2017 ein tendenzielles Wachstum der Abfallmenge beobachtet werden konnte. Während für im Rahmen von Rückbauarbeiten getrennt erfasste Kunststoff-Abfälle (Abfallschlüssel 170203, gemischte Bau- und Abbruchabfälle; vgl. Abbildung 9 und Abfallschlüssel 170904; vgl. Abbildung 10), Dämmmaterial-Abfälle (Abfallschlüssel 170603 und 170604; vgl. Abbildung 11) und Kabelmaterialabfälle (Abfallschlüssel 170411, Abbildung 12) der für diese Arbeit relevante Anteil ermittelt werden konnte, stellte sich eine Einschätzung des für diese Arbeit relevanten Anteils der unter der Abfallschlüsselnummer Abfallschlüssel 020104 gelisteten Abfälle als weitaus schwieriger dar. Zwar ist davon auszugehen, dass ein gewisser Anteil dieser Abfallart auf Kunststoff-Abfälle des Garten- und Landschaftsbaus zurückzuführen ist, jedoch werden darunter beispielsweise auch Kunststoff-Abfälle der Teichwirtschaft, der Forstwirtschaft oder der Jagd und Fischerei entsorgt. Eine entsprechende Einschätzung, welcher Anteil der Abfallart als für diese Arbeit relevant anzusehen ist, konnte aufgrund mangelnder Information in der Fachliteratur nicht getroffen werden. Nichtsdestotrotz ist die Entwicklung der entsprechenden Abfallart im Folgenden in Abbildung 13 dargestellt und weist – genau wie die anderen Abfallarten – eine ähnlich steigende Tendenz auf.

Abbildung 9: Entwicklung der im Rahmen von Bau- und Abbruchabfällen getrennt erfassten Kunststoffabfälle (Abfallschlüssel 170203), angefallen im Inland zwischen 2005 und 2017



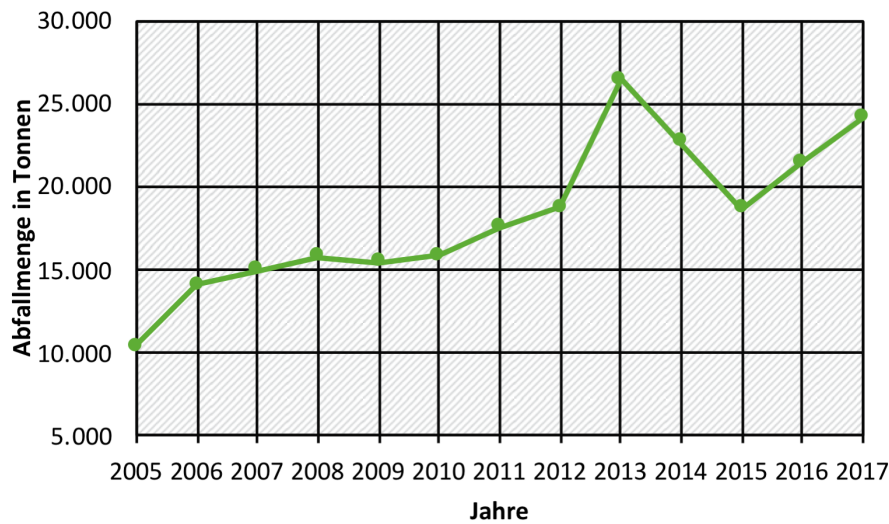
Quelle: Eigene Darstellung nach Destatis (2020) SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Abbildung 10: Entwicklung der im Rahmen von Bau- und Abbrucharbeiten angefallenen gemischten Bauabfälle (Abfallschlüssel 170904, angenommener Kunststoffanteil 15 %), angefallen im Inland zwischen 2005 und 2017



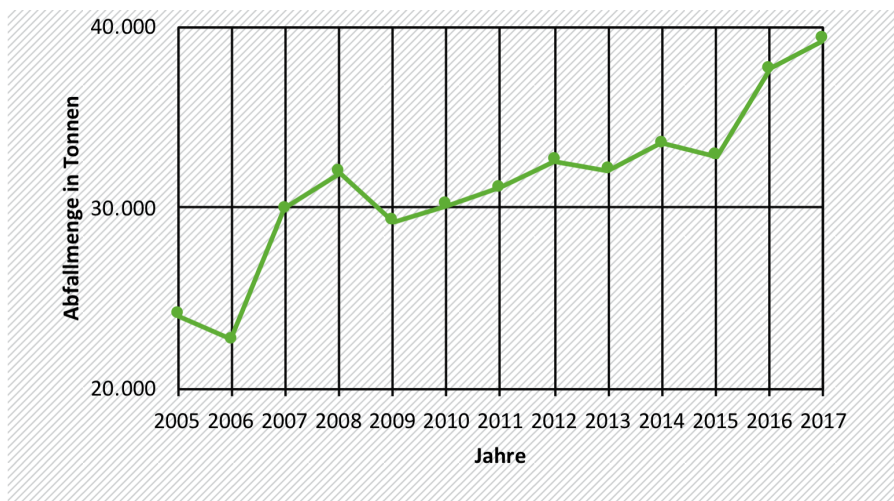
Quelle: Eigene Darstellung nach Destatis (2020) SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Abbildung 11: Entwicklung der im Rahmen von Bau- und Abbrucharbeiten angefallenen Dämmmaterial-Abfälle (Abfallschlüssel 170603 und 170604, angenommener Kunststoffanteil 12 %), angefallen im Inland zwischen 2005 und 2017



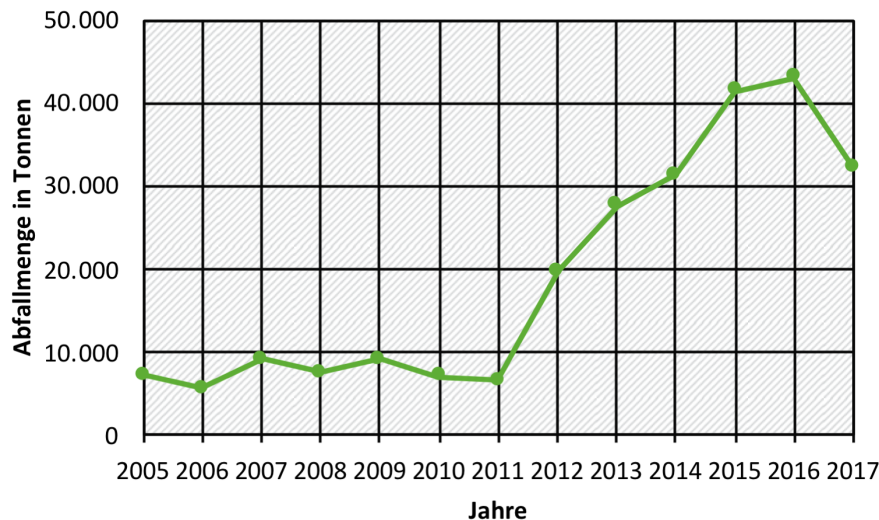
Quelle: Eigene Darstellung nach Destatis, 2020d SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Abbildung 12: Entwicklung der im Rahmen von Bau- und Abbrucharbeiten angefallenen Kabel-Abfälle (Abfallschlüssel 170411, angenommener Kunststoffanteil 30 %), angefallen im Inland zwischen 2005 und 2017



Quelle: Eigene Darstellung nach Destatis (2020) SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Abbildung 13: Entwicklung der im Bereich der Landwirtschaft, des Gartenbaus, der Teichwirtschaft, der Forstwirtschaft, der Jagd und Fischerei angefallenen Kunststoffabfälle (Abfallschlüssel 020104, ohne Verpackungen), angefallen im Inland zwischen 2005 und 2017



Quelle: Eigene Darstellung nach Destatis (2020) SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Insgesamt ergibt sich für den Zeitraum zwischen 2005 und 2017 eine Abfallmenge von rund 7,94 Mio. t (unter vorläufiger Vernachlässigung bitumenhaltiger Dach- und Dichtungsbahnen und der unter Abfallschlüssel 020104 gelisteten Abfälle). Mit 6,4 Mio. t sind die in den gemischten Bau- und Abbruchabfällen (Abfallschlüssel 170904) enthaltenen Kunststoffe für den größten Anteil der Abfallmasse verantwortlich. Lediglich 0,9 Mio. t Kunststoffe wurden getrennt erfasst (Abfallschlüssel 170203). Den Kabel-Abfällen (Abfallschlüssel 170411) konnten rund 0,4 Mio. t und den Dämmmaterialien (Abfallschlüssel 170603 und 170604) rund 0,2 Mio. t zugeordnet werden.

Der Netto-Input (d.h. der Lagerzuwachs) des anthropogenen Lagers im Zeitraum zwischen 2005 und 2017 kann somit auf rund 22,4 Mio. t geschätzt werden, was einem durchschnittlichen jährlichen Zuwachs von 1,7 Mio. t entspricht.

Zurückzuführen ist die große Differenz zwischen der verbrauchten und der als Abfall anfallenden Menge der Kunststoffe im Baubereich vor allem auf die branchenspezifischen Nutzungsdauern der unterschiedlichen Produktarten sowie einem vermehrten Einsatz des Werkstoffes im Baubereich seit erst wenigen Jahrzehnten. Verglichen zu Kunststoffprodukten aus anderen Bereichen, wie etwa dem Verpackungsbereich (typische Nutzungsdauern von wenigen Tagen oder Wochen), zeichnen sich Bauprodukte aus Kunststoff durch deutlich höhere Nutzungsdauern aus und verbleiben zum Teil mehrere Jahrzehnte im anthropogenen Lager (siehe Tabelle 1, in welcher vom BBSR angegebene Nutzungsdauern für ausgewählte Bauprodukte aus Kunststoff zur Erstellung von Lebenszyklusberechnungen dargestellt sind). Ein Großteil der aktuell im Rückbau anfallenden Abfälle wurde somit bereits vor vielen Jahrzehnten verbaut. Aktuell verbaute Kunststoffprodukte finden sich erst in mehreren Jahrzehnten im Abfallstrom wieder.

Für das in Verantwortung ziehen der Hersteller nach dem Polluter-Pays-Prinzip bzw. die Umsetzung von herstellergetragenen Rücknahme- und Verwertungssystemen für die derzeit

rücklaufenden Ströme stellt dieser Umstand ein großes Hemmnis dar. Auch die Sinnhaftigkeit des werkstofflichen Recyclings aktueller und aus heutiger Sicht teilweise auch schadstoffbelasteter Post-Consumer-Abfällen ist im Einzelfall und in Abhängigkeit der einstmals verwendeten Inhaltsstoffe zu überprüfen. Andererseits bietet Langlebigkeit als solche bereits ökologische Vorteile gegenüber der Verwendung von Kunststoff in Produkten mit kurzer Lebensdauer. Erfahrungswerte für Lebensdauern ausgewählter Kunststoffbauprodukte befinden sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Nutzungsdauern von Bauteilen und -produkten aus Kunststoffen

Produkt	Nutzungsdauer [Jahre]
Abdichtung gegen nicht drückendes Wasser	35
Außen-Standardtür (Kunststoff)	40
Außen-Fenster (Aluminium-Kunststoff-Komposit)	>50
Außen-Fenster (Kunststoff)	40
Außen-Beschläge	25–30
Rollläden	40
Außen-Dichtungsprofile (Fenster, Türen)	20
Außen-Dichtstoffe (Fenster, Türen)	12
Dichtungsbahnen, gegen drückendes Wasser, erdberührt	>50
Bitumenbahnen, gegen nichtdrückendes Wasser, erdberührt	40
Abdichtungen erdberührt, aus Hartschaumpatten, Polystyrol, Noppenbahnen (PP, PE), Wellplatten	40
Wärmedämmung, erdberührt, extrudiertes PS	40
Dämmschicht als Kerndämmung, PUR-Platten, PS	>50
Wärmedämmverbundsystem: PS-Platten, PUR-Platten	40
Acrylglasplatten (Außenwandbekleidung)	40
Polycarbonatplatten (Außenwandverkleidung)	30
Wandbekleidungen (Systeme): Kunststoff	40
Jalousien	25
Brüstungsbekleidung: Kunststoffplatten	40
Innentüren (Kunststoff)	>50
Innenfenster (Rahmen und Flügel)	>50
Innen-Beschläge	30 - >50
Innen-Dichtungsprofile (Fenster, Türen)	30
Innen-Dichtstoffe (Fenster, Türen)	20

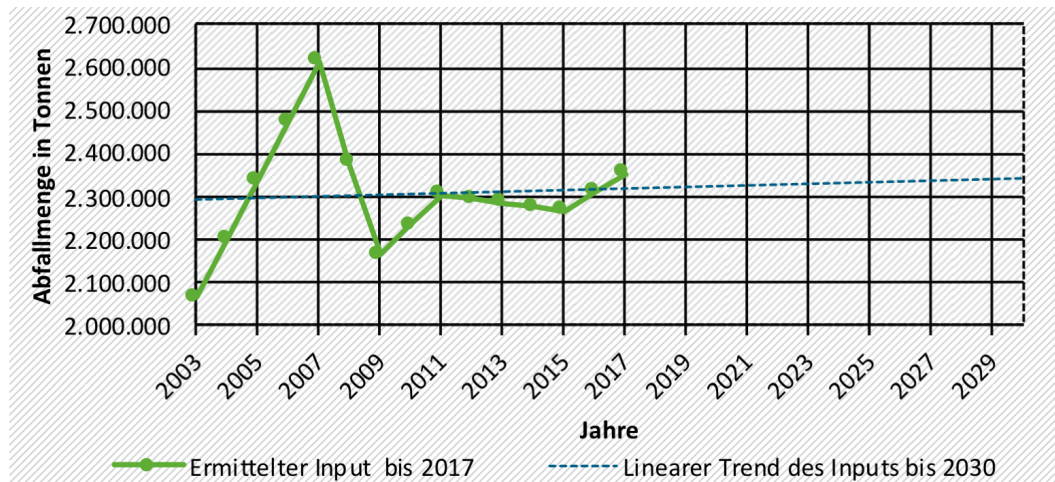
Produkt	Nutzungsdauer [Jahre]
Tapeten (Innenwand, Decke)	10
Trittschalldämmung	>50
Fußbodendämmung, Dämmung oberster Geschossdecke	>50
Textilbodenbeläge	10
PVC-Böden, Sportböden, Kautschukböden	20
Deckenbekleidungen (Kunststoff)	>50
Gitter und Roste (Kunststoff)	40
Dachfenster (Rahmen), Kunststoff	>50
Dachfenster (Rahmen), Kunststoff-Aluminium-Komposit	35
Lichtbänder	20
Lichtkuppeln	25
Dachausstiege und Luken	30
Abdichtungsbahn (Flachdach): Elastomerbahnen, Kunststoffbahnen, unterhalb Dämmung	40
Abdichtungsbahn (Flachdach): Bitumenbahnen unterhalb Dämmung	30
Abdichtungsbahnen (Flachdach): Bitumenbahnen, Elastomerbahnen, Kunststoffbahnen, oberhalb Dämmung mit schwerer Schutzschicht	30
Abdichtungsbahnen (Flachdach): Bitumenbahnen, Elastomerbahnen, Kunststoffbahnen, oberhalb Dämmung mit leichter Schutzschicht	20
Dachdeckungen: Bitumenschindeln, -wellplatten	25
Zwischensparrendämmung (XPS, EPS, PUR)	>50
Entwässerung (Dachrinne, Regenfallrohre, Dachabläufe): Kunststoff	20
Dachbekleidung: dampfdiffusionsoffene Kunststofffolien	30
Zwischen-, Auf- und Untersparrendämmung (PS, PUR)	>50

Quelle: Eigene Darstellung nach (Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR) 2017)

Neben den bereits ermittelten Entwicklungen der In- und Outputströme des anthropogenen Lagers in der Vergangenheit sind in den folgenden Abbildungen (Abbildung 14 und Abbildung 15) auch die zukünftig abgeschätzten Entwicklungen des anthropogenen Lagers dargestellt. Eine eindeutige Vorhersage inputseitiger Entwicklungen gestaltete sich teilweise als schwierig, da (wie beispielsweise zwischen 2003 und 2009) zum Teil starke, nur schwer vorhersehbare Entwicklungen des Kunststoffmarkts deutliche Auswirkungen auf die jährliche Inputmenge haben können. Beim Lageroutput hingegen ist eine deutlich steigende Tendenz der Kunststoff-Abfallmenge zu beobachten. So wird davon ausgegangen, dass sich die Menge des Outputs bis 2030, gegenüber der Menge des Outputs im Jahr 2005, in etwa verdoppelt.

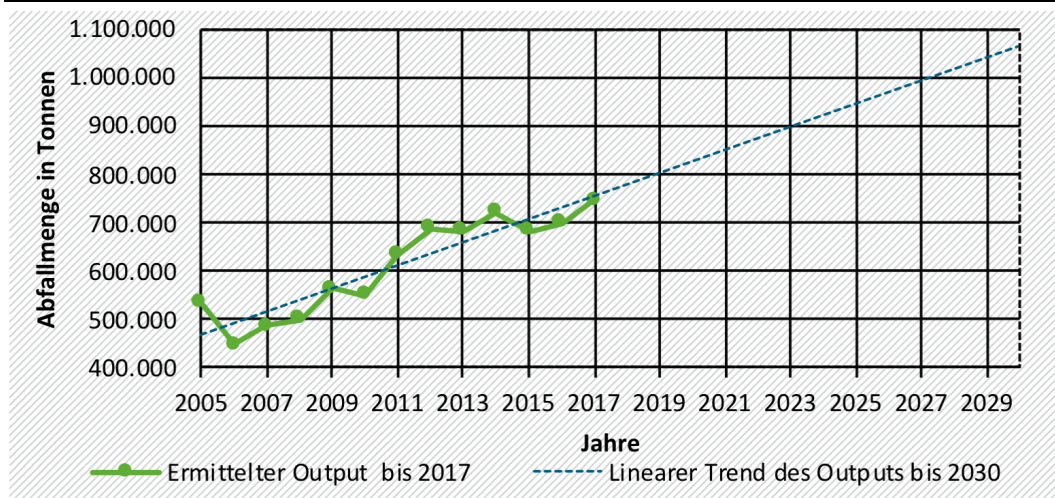
Berechnungsgrundlage, um die zukünftigen Entwicklungen der In- und Outputmengen des anthropogenen Lagers abzuschätzen, ist die lineare Regression.

Abbildung 14: Jährlich verbaute Menge an Bauprodukten aus Kunststoff (Input) für den Zeitraum 2003 bis 2017 einschließlich geschätzter Entwicklung des Inputs bzgl. des anthropogenen Lagers bis ins Jahr 2030



Quelle: Eigene Darstellung, SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Abbildung 15: Ermittelter Abfallaufkommen von ausgedienten Bauprodukten aus Kunststoff (Output) für den Zeitraum 2005 bis 2017 einschließlich geschätzter Entwicklung des Outputs bzgl. des anthropogenen Lagers bis ins Jahr 2030



Quelle: Eigene Darstellung, SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

2.5 Zusammenfassung

- In diesem Kapitel erfolgte die Erstellung einer umfassenden Produktliste mit überwiegend aus Kunststoffen gefertigter Bauprodukte. Die Liste umfasst mehr als 240 Bauprodukte und ist in Form einer xlsx-Datei-basierten Supplements veröffentlicht. Darüber hinaus wurden aktuelle Marktmengen sowie Entwicklungen zum anthropogenen Lager von Bauprodukten aus Kunststoff recherchiert und zusammengetragen.

- ▶ Die ermittelte Produktionsmenge an Bauprodukten aus Kunststoff beträgt für das Jahr 2017 rund 3,3 Mio. t, die verbaute Menge hingegen beträgt circa 2,6 Mio. t. Dabei ist PVC der am häufigsten verwendete Kunststoff.
- ▶ Insgesamt wird für den Zeitraum zwischen 2005 und 2017 von einer Inputmenge in das anthropogene Lager von rund 30,3 Mio. t an Kunststoffen ausgegangen. Die Outputmenge beläuft sich hingegen für den gleichen Zeitraum auf etwa 7,9 Mio. t.
- ▶ Der Netto-Input (d.h. der Lagerzuwachs) des anthropogenen Lagers im Zeitraum zwischen 2005 und 2017 kann somit auf rund 22,4 Mio. t geschätzt werden, was einem durchschnittlichen jährlichen Zuwachs von 1,7 Mio. t entspricht.
- ▶ Hochrechnungen zeigen, dass sich die Outputmenge des anthropogenen Lagers bis 2030, gegenüber der Menge des Outputs im Jahr 2005, in etwa verdoppeln wird.
- ▶ Die relativ langen Nutzungsdauern von Bauprodukten führen dazu, dass derzeit zurücklaufende Abfallströme Kunststoffe enthalten, die Jahrzehnte alt sind und aktuell verbaute (Kunststoff-)Materialien erst in mehreren Jahrzehnten im Abfallstrom wiederzufinden sind.
- ▶ Für die Übernahme von Herstellerverantwortung nach dem Polluter-Pays-Prinzip bzw. die Umsetzung von herstellernetragenen Rücknahme- und Verwertungssystemen ist die Tatsache, dass die derzeit rücklaufenden Abfallströme Jahrzehnte alt sind und unbekannte oder heute als Gefahrstoffe eingestufte Inhaltsstoffe enthalten, genauso wie der Umstand, dass heute in Umlauf gebrachte Produkte erst in mehreren Jahrzehnten als Anfälle anfallen, sehr hinderlich. Ein Umstand, der das werkstoffliche Recycling von Bauprodukten aus Kunststoff aktuell erschwert und im Einzelfall die Überprüfung der Vorteilhaftigkeit eines Recyclings bzw. der Rückführung dieser Kunststoffe erfordert.

3 Rücknahmesysteme allgemein

In Rücknahmesystemen werden gebrauchte Produkte nach Ihrer Nutzungsphase zurückgenommen. Die Rücknahme kann in verschiedenen Organisationsformen erfolgen: Pfandsysteme, Leihmodelle oder einfache Rücknahme. Die meisten in diesem Kapitel vorgestellten Rücknahmesysteme für Kunststoffprodukte aus dem Bausektor sind einfache Rücknahmesysteme ohne Pfand- oder Leihmodelle. Die lange Nutzungsdauer vieler der verbauten Kunststoffprodukte spricht in diesem Sektor eher für eine normale Produktrücknahme als für ein Pfand- oder Leihmodell. Anzumerken ist allerdings, dass in der Baubranche durchaus Kunststoffprodukte in der Logistik eingesetzt werden, die in Pfand- und Leih- bzw. Poolingsystemen organisiert sind. Zu nennen sind hier Kunststoffpaletten aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) aber auch Intermediate Bulk Container (IBC) und Flexible Intermediate Bulk Container (FIBC), sogenannte Big Bags. Letztere werden aber aufgrund der geringen Kosten meist als Einwegverpackung verwendet. Alle hier vorgestellten Rücknahmesysteme werden auf freiwilliger Basis betrieben.

Rücknahmesysteme bieten aus recyclingtechnischer Sicht den Vorteil, dass die zurückgenommenen Materialien sehr reine Stoffströme liefern können. Dies ist z. B. für das Recycling von Pfandflaschen aus Polyethylenterephthalat (PET) der Fall. Die durch Rücknahmesysteme gewonnen Sekundärrohstoffe sind damit von hoher Qualität und können teilweise wieder für dieselbe Anwendung verwendet werden. Wird eine solche Kreislaufführung angestrebt, in der die zurückgenommenen Produkte wieder zu gleichwertigen neuwertigen Produkten verarbeitet werden können, ergibt sich ein weiterer Vorteil. In vielen Szenarien besteht für die Produkthersteller kein Anreiz ihre Produkte für ein späteres Recycling zu optimieren, da sie als Hersteller die Kosten hierfür tragen, aber ein anderer Akteur der Wertschöpfungskette davon profitiert. Dieser Umstand stellt oft eine beträchtliche Hürde für das sogenannte „Design-for-Recycling“ dar. Verwenden die Hersteller allerdings den Materialrücklauf aus den Rücknahmesystemen für die eigene Produktion ist der Anreiz gegeben, die Produkte für ein gutes Recycling zu optimieren. Als Beispiel hierfür kann das RAUFIPRO Material der Firma REHAU genannt werden. Hier wird glasfaserverstärktes PVC-U eingesetzt (REHAU AG 2019). Um die Materialströme des verstärkten und unverstärkten Materials trennen zu können, werden dem Material Tracermaterialien zugesetzt, die eine spätere Trennung ermöglichen (Fahr 2018). PVC-Fenster werden vom Rewindo Rücknahmesystem gesammelt und recycelt, das Rezyklat wird in der Produktion neuer Fensterprofile verwendet.

Die gesetzliche Grundlage für Bauprodukte wird im Kreislaufwirtschaftsgesetz geregelt, nähere Ausführung hierzu finden sich in Abschnitt 3.4. Teilweise werden die Kosten für den Betrieb der Rücknahmesysteme durch Entsorgungsgebühren gedeckt, teilweise werden die Rücknahmesysteme von den Produktherstellern querfinanziert, einige Rücknahmesysteme tragen sich auch selber durch den Verkauf der gewonnenen Rezyklate. Meist besteht kein direkter finanzieller Anreiz, Produkte zurückzunehmen, zu recyceln und Rezyklat in der Produktion für neue Produkte zu verwenden. Diese Aktivitäten werden allerdings von der Gesellschaft positiv bewertet und können daher öffentlichkeitswirksam dargestellt werden, um dem Material oder Produkt so ein Alleinstellungsmerkmal zu verschaffen.

3.1 Methodik

Die hier aufgeführten Informationen sind auf Grundlage einer Literaturrecherche, einer Internetrecherche und durch semistrukturierte Experteninterviews erhoben worden.

3.1.1 Literatur und Internetrecherche

Es wurde eine Literaturrecherche in wissenschaftlichen und technischen Fachpublikationen durchgeführt. Dies diente zum einen der Identifikation von Rücknahmesystemen und zum anderen einer vertiefenden Einsicht in deren Funktionsweise, ihren ökonomischen und rechtlichen Grundlagen sowie weiterer Voraussetzungen. Der Fokus der Internetrecherche lag auf der Identifikation verschiedener Rücknahmesysteme und der Sammlung dazugehöriger Informationen. Weiterhin wurden allgemeine Informationen zu Rücknahmesystemen, zu den zurückgenommenen Produktgruppen, Verbandsstrukturen und der rechtlichen Lage recherchiert. Die Internetrecherche wurde in deutscher, englischer und spanischer Sprache durchgeführt. Es wurden die Suchmaschinen Ecosia (= Bing), DuckDuckGo sowie Google verwendet, Schlagworte waren u.a.: Rücknahme, Take-Back-System, Rücknahmesysteme Kunststoff etc.

Im Zuge der Recherchen konnte nur eine geringe Zahl von Rücknahmesystemen gefunden werden. Dies kann zwei mögliche Ursachen haben:

1. es gibt nur wenige Rücknahmesysteme und die Recherche hat einen Großteil davon erfassen können – oder
2. die Recherche lieferte keinen umfassenden Überblick über die Rücknahmesysteme.

Um Ursache Zwei falsifizieren zu können, wurden deshalb relevante Branchenverbände, Interessenvertretungen und andere Stakeholder recherchiert und um Auskunft gebeten.

Angefragt wurden:

- 16 deutsche Branchenverbände
- 23 europäische Branchenverbände
- 7 Baumarktunternehmen/Baustoffgroßhandel

Auch von diesen Stakeholdern wurden nur einige wenige Rücknahmesysteme genannt. Diese erwiesen sich als deckungsgleich zu den schon in der Internetrecherche gefundenen.

3.1.2 Expert*inneninterviews

Es wurden Interviews mit Vertreter*innen der Rücknahmesysteme, der Recycling- bzw. Entsorgungsindustrie, der Herstellerverbände, Herstellern sowie der Bauindustrie geführt. Ein Fokus der Interviews lag dabei auf der Umsetzbarkeit von Rücknahmesystemen und deren Hindernissen und Hürden – sowohl aus technologischer als auch aus rechtlicher und ökonomischer Sicht. Ein weiterer Fokus lag auf der politischen Flankierung der Rücknahmesysteme im Kontext der Kreislaufwirtschaft durch Gestaltung von Rahmenbedingungen, Regularien und direkten Unterstützungsmaßnahmen.

3.2 Literaturübersicht

Rücknahmesysteme sind ein Instrument, um die im Kreislaufwirtschaftsgesetz festgelegte Produktverantwortung wahrzunehmen. Die Finanzierung erfolgt dabei entweder über den Wert der zurückgenommenen Produkte oder die Kosten des Rücknahmesystems werden in den Produktpreis eingepreist. In der Fachliteratur werden vor allem Fragen der logistischen Implementierung sowie der ökonomischen Gestaltung von Rücknahmesystemen diskutiert, auch die Bewertung der ökologischen Vorteile wird behandelt. Die Literaturrecherche wurde nicht auf Rücknahmesysteme für bestimmte Materialien oder Branchen beschränkt.

Als Anreiz für die Einführung eines Rücknahmesystems werden verschiedene Gründe genannt:

- ▶ Ressourcenschutz/Ressourcenknappheit/besseres Recycling (Weiland und Urban 2014), (Thierry u. a. 1995), (OECD 2014), (Hallmann und Jäger 2010)
- ▶ Umweltschutz (Weiland und Urban 2014), (Klausner und Hendrickson 2000), (Hischier u. a. 2005)
- ▶ Reinere Stoffströme (Weiland und Urban 2014)
- ▶ Besseres Produktdesign hinsichtlich der Entsorgung (Klausner und Hendrickson 2000)
- ▶ Weniger Abfälle (Klausner und Hendrickson 2000) (Thierry u. a. 1995)
- ▶ Internalisierung von Abfallentsorgungskosten (Klausner und Hendrickson 2000)
- ▶ Bindung von umweltbewussten Kunden und Mitarbeitern (Thierry u. a. 1995) (OECD 2014)
- ▶ Vermeiden von Lagerüberhängen bei Zwischenhändlern (Hallmann und Jäger 2010)
- ▶ Umgang mit Reklamationsware und Garantieteilen (Hallmann und Jäger 2010)

Die Literatur zeigt, dass bei profitträchtiger Rücknahme der Produkte, entsprechende Rücknahmesysteme in der Regel auch umgesetzt werden bzw. sich ein Markt für die gebrauchten Produkte bzw. Abfälle etabliert. Bestehen „nur“ die oben genannten gesamtgesellschaftlichen Anreize, können entweder die Hersteller durch die Politik rechtlich zu einer Rücknahme verpflichtet werden oder es kann auf die Freiwilligkeit der Hersteller gesetzt werden. (Weiland und Urban 2014)

Laut (Thierry u. a. 1995) sind für die Planung eines Rücknahmesystems folgende Kategorien an Informationen wichtig:

- ▶ Informationen über die Zusammensetzung der Produkte
- ▶ Informationen über den Umfang und die Unsicherheit von Rückflüssen
- ▶ Informationen über Märkte für wiederaufbereitete Produkte, Komponenten und Materialien
- ▶ Informationen über die tatsächliche Produktrückgewinnung und die Durchführung der Abfallentsorgung

Außerdem unterscheiden (Thierry u. a. 1995) die Nutzung zurückgegebener Produkte durch a) die Firma selbst, b) andere Firmen oder c) Firmen außerhalb der ursprünglichen Wertschöpfungskette. Dabei werden folgende Möglichkeiten der Wiederverwertung genannt: Reparatur, Überholen (refurbishment), Wiederaufarbeiten (remanufacturing), Ausschachten und Recycling, die in Tabelle 2 vergleichend dargestellt werden.

Tabelle 2: Vergleich der Möglichkeiten der Wiederverwertung nach erfolgter Rücknahme nach (Thierry u. a. 1995)

	Grad der Demontage	Qualitätsanforderungen	Daraus entstehendes Produkt
Reparatur	Produkt	Funktionsfähigkeit wiederherstellen	einzelne Teile wurden ersetzt
Überholen (refurbishment)	Module	Inspektion kritischer Teile und Wiederherstellung einer spezifizierten Qualität	einzelne Module ersetzt oder repariert, Upgrade möglich
Wiederaufarbeiten (remanufacturing)	Teile	Wiederherstellen von Neuqualität oder besser	Gebrauchte und neue Teile werden zu neuem Produkt kombiniert, Upgrade möglich
Ausschlachten	selektive Entnahme von Teilen	von späterer Verwendung der Teile abhängig	Wiederverwendung einzelner Teile, für den Rest Entsorgung oder Recycling
Recycling	Materialien	hoch für Wiederherstellung von Originalteilen, geringer bei Verwendung in anderen Teilen	Wiederverwendung des Materials für neue Teile

(Wallau 2000) beschäftigte sich im Zuge der Diskussionen zur Altautoentsorgung mit Finanzierungsmodellen für Rücknahmemodelle. Diese Ergebnisse gehen davon aus, dass die Rücknahme des Produktes nicht durch den Materialwert der so gewonnen Teile und Rezyklate gedeckt wird und diese daher in anderer Weise finanziert werden muss. Die entworfene Systematik lässt sich in gewissem Rahmen auch auf andere Produkte übertragen. Wallau stellt dazu folgende Leitfragen:

- ▶ Wer zahlt wann die Entsorgungsgebühr (z. B. Hersteller oder Importeur, erster Käufer, alle Käufer als fortwährende Abgabe)?
- ▶ Welche Entsorgungsgebühr wird bezahlt (z. B. Pauschalbetrag, nach Produktkriterien differenzierter Betrag)?
- ▶ Wer verwaltet die eingezahlten Gelder (Hersteller alleine oder gemeinsam, externe private oder staatliche Akteure oder Mischformen daraus)?
- ▶ Nach welchem Prinzip wird der Fonds verwaltet (Kapitaldeckungs- oder Kapitalumlageverfahren)?
- ▶ Wie wird ausgezahlt (pauschal oder differenziert)?
- ▶ An wen wird ausgezahlt (Akteure in der Verwertungskette)?

Aus den Kombinationen der verschiedenen Optionen ergibt sich ein Möglichkeitsraum, in dem das Rücknahmesystem abgebildet werden kann. Wallau unterscheidet zu dessen Konstruktion außerdem zwischen Stoff- und Informations- sowie Zahlungsströmen.

Auch (Klausner und Hendrickson 2000) untersuchen den Kostenaspekt, hier am Beispiel der Kosten für die Rücknahme von Elektrowerkzeugen. Sie schlagen ein eingebautes Gerät zum Speichern der Nutzungsdaten vor, mit dem die Belastung der Maschine nachvollziehbar wird. So könne die Eignung einiger weitgehend verschleißfreier Teile zur Wiederverwertung beurteilt werden. Die Autoren stellen ein Modell zur Kostenabschätzung in Abhängigkeit der zurückgegebenen Geräte vor.

Ein wichtiger finanzieller Faktor für den Verbraucher bei Pfandsystemen sind die negativen Zinseffekte durch das als Pfand gebundene Kapital. (Weiland und Urban 2014). Gerade für Baukunststoffe mit typischerweise langen Produktlebenszeiten und großen Produktmengen ist dieser Effekt nicht unerheblich und damit ein weiterer Nachteil bei der Übertragung des Konzepts auf Bauprodukte.

(Witek 2015) vergleichen verschiedene Veröffentlichungen bezüglich der Vorhersagbarkeit der Menge an zurückgegebenen Geräten. Diese berechnen, abschätzen oder besser noch steuern zu können, sei ein wichtiger Faktor bei der Planung von Rücknahmesystemen. Ein aktives Rückgabemanagement sei schon bei der Planungsphase zu berücksichtigen. Sie schlagen damit die Brücke zur Rücknahmelogistik, einem weiteren zentralen Aspekt für Rücknahmesysteme.

Diese wird von (Hallmann und Jäger 2010) aus der Sicht eines Unternehmens, das Rücknahmelogistiknetzwerke durch Dienstleister abbildet, betrachtet. Neben einer funktionierenden Rücknahme legen sie dabei ein Augenmerk auf eine effiziente Auslastung der Systeme. In folgender Tabelle 3 zeigen sie dabei die Besonderheiten der Rücknahmelogistik im Vergleich mit konventioneller Logistik auf.

Tabelle 3: Vergleich der für Rücknahmesysteme verwendeten Rückwärtslogistik mit normaler Vorwärtslogistik nach (Hallmann und Jäger 2010)

	Vorwärtslogistik	Rückwärtslogistik
Prognose, Forecasting	relativ einfach	schwierig
Materialströme	divergierend	konvergierend
Produktqualität	einheitlich	variabel
Produktzustand	einheitlich	variabel
Verpackung	einheitlich	variabel
Liefargeschwindigkeit	wichtig	unwichtig

3.3 Ergebnisse der Expert*inneninterviews

Als Kriterien für die Etablierung und den Betrieb von Rücknahmesystemen wurden genannt:

- Verfügbarkeit der Materialien als ausreichend großer Massenstrom, so dass Wirtschaftlichkeit besteht. Zuweilen sei eine Bündelung unterschiedlicher Abfälle nötig, z. B. das Zusammenfassen von PU aus Dämmstoffen mit PU-Stoffströmen aus anderen Branchen.
- Konzentration der Kunststoffe im Gesamtabfallaufkommen, damit eine Sammlung logistisch darstellbar und sinnvoll ist, z. B.: separate Erfassung von Fenstern bei einer Renovierungsmaßnahme

- ▶ Vorhandensein und Durchführbarkeit von selektiven Rückbauverfahren, mit welchen Materialien für das Recycling technisch zurückgewonnen werden können
- ▶ Die wirtschaftliche Darstellbarkeit dieser Rückbauverfahren – hier seien zwei Aspekte zu nennen:
 - Vorbereitung des selektiven Rückbaus während der Planungs- und Bauphase – vor allem ökonomische und Wissensaspekte spielen aus Sicht der Expert*innen dafür eine Rolle. Systeme, die einen selektiven Rückbau ermöglichen, gelten im Normalfall als teurer als Systeme, die keinen selektiven Rückbau ermöglichen. So sei laut einem Experten die Verwendung einer Vorhangsfassade zur Dämmung gut rückbaubar, aber mehr als doppelt so teuer im Vergleich zu alternativen Lösungen. Der große Kostendruck im Baugewerbe, der sich in den letzten Jahren noch verschärft habe, mache die Verwendung dieser Lösungen sehr unwahrscheinlich. Zum anderen sei eine rückbaugerechte Bauweise nicht in der Denkweise von Architekten und Ingenieurbüros verankert und könne von vielen nicht geleistet werden. Hierfür müsse auf Anbieter zurückgegriffen werden, die auf nachhaltiges Bauen spezialisiert sind.
 - Trennung der Materialien während der Abbruch- und Rückbauphase – eine wirtschaftliche Trennung der zu separierenden Materialien würde durch mehrere Faktoren erschwert. Zum einen bestehe kein finanzieller Anreiz, Kunststoffe zu separieren, da der Erlös aus dem gewonnenen Sekundärkunststoff nicht die Kosten für den zusätzlichen Aufwand beim Rückbau bzw. Abbruch deckt – dies sei z. B. für Kupferkabel anders. Eine wirtschaftliche Separation der Kunststoffe würde auch durch den umständlichen bis unmöglichen Ausbau vieler Kunststoffprodukte erschwert. Unterirdisch verlegte Rohre oder Geotextilien ließen sich bspw. nicht wieder rückbauen. Ebenso sei der Rückbau verklebter Dämmstoffe wirtschaftlich nicht darstellbar. Eine Ausnahme stellen hier Einbauteile wie Türen oder Fenster und Bodenbeläge dar. Diese ließen sich mit relativ geringem Aufwand separieren. Ein weiterer Aspekt, der eine Trennung verhindere, sei, dass der Kunststoff einfach mit normalem Bauschutt entsorgt werden kann und wird.¹
- ▶ Mögliche Additive – können Materialien aus Abbruchabfällen verwendet werden oder sind Additive, Schadstoffe oder Verschmutzungen enthalten, so dass Recycling erschwert wird bzw. keine Form der schadlosen Verwertung ist? Die Ansicht der Experten ist hier unterschiedlich – während einige der Meinung sind, dass wir uns zurzeit „die Altlasten von morgen bauen“ verweisen andere Experten auf umfangreiche Regulierung, Tests und Recyclingverfahren, die nach ihrer Ansicht sicherstellten, dass ein Großteil des Kunststoffes recycelt werden könne.

¹ Zwar ist nach GewAbfV § 8 die Erzeuger von Bau- und Abbruchabfällen Kunststoff getrennt von anderen Abfällen zu sammeln haben. Diese Pflicht entfällt allerdings nach §8 (2) „[...] soweit die getrennte Sammlung der jeweiligen Abfallfraktion technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist.“

- Die herausfordernde wirtschaftliche Darstellbarkeit der Aufbereitungsverfahren – die preisliche Konkurrenz des Rezyklats zu Neumaterial wurde von einem Großteil der Experten als Hindernis genannt. Die befragten und in Kapitel 3.5.1 vorgestellten Rücknahmesysteme finanzieren sich zum Teil selbst durch die erhobenen Entsorgungsgebühren sowie den Verkauf des Rezyklats, zum Teil würde aber auch das Rücknahmesysteme von den Herstellern der Neuware bezuschusst und arbeite nicht kostendeckend. Die Kosten für Rücknahme und Recycling skalierten bis zu einem gewissen Grad auch mit der verarbeiteten Menge.
- Politischer Wille, Rücknahme und Recycling umzusetzen – Rücknahme- und Recyclingsysteme ergänzend zu den Bestehenden ließen sich nach Ansicht der Expert*innen nur durch Regulierung seitens der Politik schaffen. Sie entstünden bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen nicht aus wirtschaftlichen Interessen der Hersteller.

Als technische Hürden für das Recycling von Baukunststoffen aus Rücknahmesystemen wurden genannt:

- Technische und ökonomische Realisierbarkeit der Schadstoffentfrachtung – besonders unter Berücksichtigung der Preiskonkurrenz zwischen Rezyklat und Neuware. Allerdings sei eine Schadstoffentfrachtung für ausgewählte Stoffströme nicht notwendig oder mit einfachen aufbereitungstechnischen Mitteln umsetzbar.
- Schlechtere Leistungseigenschaften der Rezyklatware im Gegensatz zu Neuware. So sei in Druckrohren der Einsatz von Rezyklat nicht möglich und auch nicht zulässig. Sogar Umlaufmaterial, also Rezyklat aus eigenen ungenutzten Produkten entspreche nicht immer der benötigten Qualität.
- Die schlechte Qualifikation der Mitarbeitenden einiger Recycling- und Entsorgerfirmen Sorge für eine suboptimale Qualität der Rezyklate.
- Unwirtschaftlichkeit und technische Hürden beim chemischen Recycling.

Als rechtliche und regulatorische Hürden wurden genannt

- Rechtsprechung zum Umgang mit Schadstoffen in der Chemikalien- und Abfallgesetzgebung (z. B. verschiedene Flammenschutzmittel sowie Blei- und Cadmiumbasierte Additive). Hier wurde auch die teilweise schlechte Planungssicherheit bezüglich politischer Regulierung angemerkt. Ein aktuelles Beispiel ist die Diskussion um Titandioxid und die Unklarheit, ob und in welchem Umfang es verboten werden soll.
- Der Abfallstatus von Verschnitt bei dem Einbau von Neuware. Sollen beim Bau anfallende Reste von der Baustelle zum Recycler transportiert werden, so gelten diese Verlegereste als Abfall und erforderten die entsprechende Dokumentation während des Transportes. Dies könne von den installierenden Firmen nicht geleistet werden und mache ein Recycling dieser Reste unmöglich.

- ▶ Der zulässige Gehalt von Kunststoffen in Bauschutt – bei bis zu 2 % Kunststoffen im Bauschutt und der enormen Masse von Bauschutt könne viel Kunststoff legal im Bauschutt entsorgt werden.²
- ▶ Elektrifizierung von Produkten wie z. B. Rollläden. Produkte dieser Art gelangen mit der Elektrifizierung in den Geltungsbereich des ElektroG und sind als Abfälle im Rahmen der Elektroaltgeräteaufbereitung zu verwerten. Hinsichtlich des Rezyklateinsatzes in diesen Produkten ist die europäische RoHS-Richtlinie bzw. die nationale Elektrostoffverordnung maßgeblich, die Schadstoffgrenzwerte beinhaltet.

An die Politik wurden folgende Wünsche geäußert:

- ▶ Dass Recycling von Produkten solle ermöglicht und vereinfacht werden, indem regulativ auch schon beim Produkt angesetzt wird, z. B. durch „Design-for-Recycling“.
- ▶ Dass Schadstofffragen nicht auf Grundlage gesellschaftlicher nichtwissenschaftlicher Diskussionen, sondern auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse entschieden werden solle.
- ▶ Die Schaffung strategischer Planungssicherheit durch langfristig ausgelegte Politik
- ▶ Dass die Politik Rezyklatverwendung forciert. Die entsprechenden technischen Lösungen entstünden dann als Folge daraus.
- ▶ Dass Recyclingkunststoffe in Ausschreibungen als Kriterium berücksichtigt werden und nicht wie teilweise im kommunalen Umfeld noch praktiziert prinzipiell ausgeschlossen werden.

Von Seiten anderer Akteure als den Interviewten wird gewünscht:

- ▶ Das Recycling muss von der gesamten Wertschöpfungskette als Ziel verfolgt werden, um erfolgreich zu sein, nicht nur durch Recycler am Ende der Wertschöpfungskette.

3.4 Rechtliche Lage hinsichtlich freiwilliger Rücknahmen von Abfällen

Die Rücknahme von Abfällen wird rechtlich in Deutschland u. a. durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) geregelt. Die in § 23 KrWG behandelte Produktverantwortung der Hersteller umfasst demnach unter anderem „die Rücknahme der Erzeugnisse und der nach Gebrauch der Erzeugnisse verbleibenden Abfälle sowie deren nachfolgende umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung.“ Führt diese Anforderung aus § 23 KrWG zu einer Rücknahme- oder Rückgabepflicht, können die Anforderungen daran laut § 25 KrWG von der Bundesregierung durch eine Rechtsverordnung bestimmt werden. Auch eine Kennzeichnungspflicht kann nach § 24 KrWG von der Bundesregierung bestimmt werden. Für

² Laut „DAfStb Beton, rezyklierte Gesteinskörnung“ können je nach Typ 1 %w bzw. 2 %w an Glas und sonstigen Materialien enthalten sein, hierunter fallen auch Kunststoffe. Für ungebundene Materialien gilt ein maximalgehalt von 0,1%w sonstiger Materialien laut „TL Gestein StB – Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau“. Eine genaue Mengenmäßige Erfassung dieser Typen wird für Deutschland nicht durchgeführt die Gesamtmenge an Bauschutt betrug 2018 allerdings laut UBA 58.500 kt.

freiwillige Rücknahmesysteme können vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) Zielfestlegungen durch Rechtsverordnungen getroffen werden. Für private Abfälle besteht im Normalfall nach § 17 KrWG die Überlassungspflicht – d.h. Erzeuger bzw. Besitzer von Abfällen müssen diese den öffentlich-rechtlichen Entsorgern überlassen. Für Abfälle, die freiwillig zurückgenommen (§ 26 KrWG) werden, um der Produktverantwortung (§ 23 KrWG) nachzukommen, gilt diese Überlassungspflicht allerdings nicht. Insbesondere für werthaltige Abfälle wie Alttextilien stellte sich daher die Frage, inwiefern Hersteller im Zuge einer Rücknahme auch Produkte anderer Hersteller zurücknehmen dürfen. Hierüber hatten sich zuletzt Modehäuser und Kommunale Unternehmen vor Gericht gestritten. Nach den bisherigen Urteilen ist diese Art der Rücknahme durch andere Hersteller allerdings möglich. (Oexle und Lammers 2019; Wenzel 2015)

Die Rücknahmesysteme für Baukunststoffe bieten oft Rücknahmemöglichkeiten sowohl für gewerbliche als auch für private Abfälle.

3.5 Analyse bestehender Rücknahmesysteme

Es konnten 12 Rücknahmesystemen für Produkte im Bereich der Baukunststoffe im europäischen Raum identifiziert werden. Darunter fallen lokale und europaweite Rücknahmesysteme mit Rücknahmemengen von wenigen Tonnen bis zu 33.000 t pro Jahr. Rücknahmesysteme gibt es vor allem für PVC sowie Rohre und Bodenbeläge.

Zur Darstellung in diesem Bericht wurden die Rücknahmesysteme in eine standardisierte Beschreibung überführt, um Vergleichbarkeit und Übersicht zu ermöglichen. Diese standardisierte Beschreibung umfasst folgende Punkte:

- ▶ Name des Rücknahmesystems
- ▶ Kurzbeschreibung: Die wesentlichen Merkmale des Rücknahmesystems sind in einem Fließtext bis maximal 3 Sätze zusammengefasst.
- ▶ Kontakt: Kontaktinformation mit Adresse, E-Mail, Telefon und Web-Adresse
- ▶ Recycelte Materialien: Die recycelten Kunststoffsorten und andere Materialien werden aufgeführt.
- ▶ Mengen: Gibt Auskunft über die von dem Rücknahmesystem recycelten Mengen.
- ▶ Abfälle: Nennt die Produkte, die vom Rücknahmesystem gesammelt und recycelt werden.
- ▶ Recyclingprozess: Beschreibt die verfahrenstechnischen Schritte zur Aufbereitung bzw. zum Recycling der Materialien.
- ▶ Annahmelogistik und Einzugsgebiet: Gibt einen Überblick über die logistische Organisation der Produktrücknahme und über das Gebiet, in welchem das Rücknahmesystem operiert.
- ▶ Rezyklatverwendung: Gibt eine Einschätzung zur Qualität des Recyclings. Diese erstreckt sich vom Recycling zu gleichwertiger Neuware bis zur Verwendung der zurückgenommenen Kunststoffe als Ersatzbrennstoff.

Die standardisierten Beschreibungen sind im Folgenden aufgeführt. Eine Einschätzung zu den Rücknahmesystemen findet sich im darauffolgenden Kapitel 3.5.2. Verwendete Quellen sind am Fuß der Tabelle angegeben. Viele Informationen wurden auch im persönlichen Kontakt mit

Vertreter*innen der Systeme erhoben. Aufgrund der zugesicherten Anonymität in den Expert*inneninterviews sind diese Quellen hier nicht extra ausgewiesen.

3.5.1 Beschreibungen der Rücknahmesysteme

Rewindo

Rewindo organisiert die Rücknahme und das Recycling von Fenstern, Rollläden und Türen aus PVC. Nach der Demontage wird das Material aufbereitet, regranuliert und wieder für die Verwendung in PVC-Profilen recycelt. Rewindo ist Teil der europäischen Selbstverpflichtung VinylPlus.

Kontakt

Am Hofgarten 1 – 2
53113 Bonn

info@rewindow.de
+49 228.921283-0
www.rewindo.de

Recycelte Materialien

- PVC-U

Mengen

- 33,3 kt/a werkstoffliches Recycling (2019)
- 2,7 kt/a Zweitnutzung (2018)

Gesammelte Produkte

- PVC Fenster
- PVC Türen
- PVC Rollläden

Recyclingprozess

- Grobe Vorsortierung, Schreddern
- Abtrennen von Glas sowie Metall
- Schneidmühle zum Zerkleinern auf Korngrößen < 20 mm
- Waschen, trocknen, aufreinigen
- Extrusion mit Schmelzfiltration zum Regranulat

Annahmelogistik und Einzugsgebiet

- Selbstanlieferung bei einer der 36 Annahmestellen
- Selbstanlieferung direkt bei einem der 8 Recycler
- Abholung durch Recycler
- Deutschlandweit

Rezyklatverwendung

- Rezyklate werden von Herstellern wieder für die Herstellung neuer PVC-Profile eingesetzt, Nachfrage ist derzeit größer als das Angebot

Quellen: (Rewindo 2019), (Rewindo 2020c)

Roof Collect

Das Rücknahmesystem Roof Collect nimmt kunststoffbasierte Abdichtungsbahnen zurück. Die Rücknahme ist in den meisten europäischen Ländern möglich, sie ist Teil der VinylPlus® Initiative der PVC-Industrie. Die Abdichtungsbahnen werden demontiert und zu Schutzmatten verarbeitet.

Kontakt

Avenue de Cortenbergh, 71
B-1000 Brussels
+32 (0) 2/739 63 83

info@roofcollect.com
+32 (0) 2/739 63 83
www.roofcollect.com

Recycelte Materialien

- Weich PVC
- EVA/PVC
- andere PVC haltige Blends
- PVC-beschichtete Textilien,

Gesammelte Produkte

- Kunststoff Dach- und Dichtungsbahnen,
- Der PVC-Gehalt muss > 90 % sein
- Es dürfen keine Metalle enthalten sein
- Es dürfen keine losen Fasern enthalten sein
- es darf kein Wasser als Verunreinigung enthalten sein

Mengen

- 3,5 kt/a (2018)

Recyclingprozess

- Säuberung und Zuschnitt der Folien bei der Demontage in 1m breite Bahnen
- Folien werden aufgerollt in Big-Bags oder Containern transportiert
- Lösen, Aufreinigen durch Filtern, Füllen in Wasser, Lösungsmittelrückgewinnung
- Downcycling zu Schutzmatten z. B. für Gewächshäuser und Reitsport

Annahmelogistik und Einzugsgebiet

- keine Angaben zur Annahmelogistik
- Deutschland, Österreich, Schweiz, Frankreich, Benelux, Spanien

Rezyklatverwendung

- Rezyklat wird für Schutzmatten verwendet

Quellen: (VinylPlus 2019)(RoofCollect 2020),

Kunststoffrohrverband

Der Kunststoffrohrverband e.V. nimmt in Zusammenarbeit mit dem Recycling-Unternehmen PreZero Kunststoffrohre zurück und recycelt diese. Verarbeitet werden die Kunststoffsorten PE, PP und PVC. Die Rezyklate werden teilweise wieder für den Einsatz in Kunststoffrohren verwendet.

Kontakt

Kunststoffrohrverband e.V. (KRV)
Kennedyallee 1–5
D 53175 Bonn

info@krv.de
+49 228. 914 77–0
www.krv.de

Recycelte Materialien

- PE
- PP
- PVC

Gesammelte Produkte

- Kunststoffrohre
 - Keine Rohre aus vernetztem PE
 - Keine mineralfaserverstärkten Rohre
 - Keine Mehrschicht- und keine Verbundrohre
- Hauptsächlich Verschnitt aus Neuinstallationen

Mengen

- ca. 5 kt/a

Recyclingprozess

- Sortieren nach Werkstoffen
- Händisches Aufbereiten
- Mahlen in Großmühlen/Rotorschneidern zu Mischgut aus PE/PP/PVC mit Korngrößen von 8 – 12 mm
- Reinigung im Windsichter – Aussortieren von Störstoffen
- Recompoundierung

Annahmelogistik und Einzugsgebiet

- Weltweite Annahme mit Hilfe von Recyclingpartnern aus der Abfallbranche

Rezyklatverwendung

- Kann für Neuware verwendet werden, allerdings nicht in Druck-, Trinkwasser- und Gasrohren.

Quellen: (KRV Impulse 2019)

öAKR Österreichischer Arbeitskreis Kunststoffrohr Recycling

Der öAKR organisiert die Rücknahme diverser Kunststoffrohre in Österreich. Der enthaltene Kunststoff wird werkstofflich recycelt und für die Herstellung von Bauprodukten wiederverwendet.

Kontakt

Arsenal Obj. 213
Franz-Grill-Straße 5
A-1030 Wien

info@oeakr.at
+43 1 798 16 01 - 150
www.oeakr.at

Recycelte Materialien

- PE
- PP
- PCV
- PB
- Alu-PEX
- PEX

Gesammelte Produkte

- Kunststoffrohre
- Mehrschichtrohre
- Verbundrohre
- Druckrohre
- Kanalrohre
- Abflussrohre
- Drainagerohre
- Gasrohre
- Heizungs- und Sanitärrohre
- Kabelschutzrohre
- Elektro- und Installationsrohre

Mengen

- 1,3 kt/a (2017)

Recyclingprozess

- Der praktische Betrieb erfolgt im Auftrag des öAKR durch die Reststofftechnik GmbH
- Vollautomatische Sortierung nach Kunststoff – 99,9 % Reinheit, Tagesdurchsatz 5 t bei 8 h/Tag
- Anschließend werkstoffliche Verwertung

Annahmelogistik und Einzugsgebiet

- 67 Annahmestellen, in Regionalniederlassungen der öAKR Mitglieder sowie Kooperation mit der Firma Reststofftechnik GmbH, Henndorf am Wallersee
- Es werden nur Rohre bestimmter Farben und ohne Reste oder Störstoffe angenommen

Rezyklatverwendung

- Recycling und Wiederverwendung des Rezyklats für Bauprodukte (Rohre, Platten, Rezyklatcompounds)

Quellen: (öAKR 2018), (öAKR 2020), (Reststofftechnik GmbH 2020)

AGPR – Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling

Die Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling organisiert die Rücknahme und das Recycling von Bodenbelägen aus PVC-P. Die Bodenbeläge werden aufgereinigt und werkstofflich recycelt.

Kontakt

Bau 1136/PB 16
Paul-Baumann-Straße 1
D-45772 Marl

info@agpr.de
+ 49 23 65 - 50 92 133
www.agpr.de

Recycelte Materialien

- Weich PVC

Mengen

- 2,5 kt/a werkstoffliches Recycling (2016)

Gesammelte Produkte

- Homogenbeläge (einschichtige Beläge, durchgehend gemustert)
- Heterogenbeläge (PVC-Nutzschicht auf PVC-Trägerschicht)
- Systembeläge (dickere PVC-Nutzschicht auf PVC-Schaum)
- CV-Beläge (dünnere PVC-Nutzschicht auf PVC-Schaum)
- PVC-Wandbeläge (PVC-Nutzschicht auf PVC-Schaum)
- PVC-Schweißschnur

Recyclingprozess

- Manuelles Aussortieren von Nicht-PVC-Belägen und Fremdstoffen
- Grobzerkleinern
- magnetische Metallabscheidung
- Hammermühle zum Abschlagen von Estrichresten
- Sieben
- Feinvermahlung bei -40 °C auf Korngröße 400 µm, Abtrennung von Grobpartikeln und PET Faserbällchen
- Abfüllen des Pulvers

Annahmelogistik und Einzugsgebiet

- 159 Annahmestellen
- Netz von Annahmestellen und Logistikzentren in europäischen Nachbarländern

Rezyklatverwendung

- Rezyklat kann wieder in der Herstellung von Bodenbelägen (mit Ausnahme von Aufenthaltsräumen) eingesetzt werden

Quellen: (AGPR 2020), (Recyclingportal.eu 2017)

ReStart

Das Unternehmen Tarkett nimmt Teile seiner Produktpalette an Bodenbelägen als Gebrauchtware und Verlegeverschnitt zurück und recycelt diese zusammen mit Produktionsresten. Aus den Resten werden Rezyklate und Teppichrückseiten hergestellt.

Kontakt

Tarkett Holding GmbH Deutschland
Nachtweideweg 1–7
D-67227 Frankenthal

info.de@tarkett.com
+49 6233 81 0
www.tarkett.de

Recycelte Materialien

- Vinyl
- Linoleum
- PA6

Mengen

- 3,3 kt /a (2018)

Gesammelte Produkte

- Rücknahme und Wiederverwertung von Verschnitt: Homogener und Heterogener Bodenbelag, Linoleum
- Rücknahme und Wiederverwertung gebrauchter Böden
- Alle DESSO Teppichfliesen (PA6 und länderspezifisch PA6.6 Garn) mit Bitumenrücken und EcoBase Rücken je nach Zusammensetzung
- Nach Materialprüfung auch Wettbewerbsprodukte

Recyclingprozess

Für post consumer Teppichfliesen:

- Aufnahme der Teppichfliesen (fixiert, nicht verklebt) durch Verlegebetrieb
- Transport zum Carpet Recycling Center, Waalwijk (Niederlande)
- Trennen des Garnes vom Teppichrücken
- Closed loop Recycling von PA6 Garn zu neuem Weißgarn (durch Aquafil Group)
- Closed loop Recycling des Rückens von Tarkett
- Bitumen, Füllstoffe, und PA6,6 als EBS

Für Verlegeverschnitte je nach Material spezifische Aufbereitungsmethoden

Annahmelogistik und Einzugsgebiet

- Neuware wird in Gitterboxen im Pfandsystem ausgeliefert, diese können mit Recyclingware befüllt wieder zurückgegeben werden
- Übernahme von losen Schüttungen aus Abbrucharbeiten
- Zusammenarbeit mit verschiedenen Abfallentsorgungsunternehmen
- Deutschland, Frankreich, Niederlande, Belgien, Luxemburg, Schweden, Norwegen, Dänemark, Nordamerika, Brasilien

Rezyklatverwendung

- Für Ecobase Teppichfliesen 76 % im geschlossenen Kreislauf

Quellen: (Tarkett 2019)

Interface

Das Unternehmen Interface bietet Bodenbeläge aus verschiedenen Materialien an und nimmt diese auch zurück. Neben dem Rücknahmesystem und Recycling versucht Interface die Umweltauswirkung ihrer Produkte zu minimieren und arbeitete schon früh mit Innovationen wie klebstofffreier Installation oder der Verwendung von Recyclingmaterial.

Kontakt

Interface Deutschland GmbH
Mies van der Rohe Business Park
Girmesgath 5
47803 Krefeld

info-de@interface.com
+49 2151 37180
www.interface.com

Recycelte Materialien

- PA
- PVC
- Naturkautschuk
- PVB
- Weich PVC

Gesammelte Produkte

- Textile modulare Bodenbeläge
- „Luxury vinyl tiles“
- Kautschuk Bodenbeläge

Mengen

- Keine Angaben

Recyclingprozess

- Sammlung der Teppichfließen, ohne Verklebung installiert
- Bewertung des Zustandes und der Zusammensetzung dann Wiederverwendung, Recycling oder thermische Verwertung

Annahmelogistik und Einzugsgebiet

- Keine Angaben

Rezyklatverwendung

- Je nach Zustand Wiederverwertung oder auch thermische Verwertung

Quelle: (Interface o. J.)

Greenstream

Greenstream sammelt gebrauchte Teppichfliesen und führt sie falls möglich der Wiederverwendung oder der Verwendung als Füllmaterial zu. Das Unternehmen berücksichtigt auch soziale Aspekte der Arbeit in der Wiederaufbereitung der Teppichfliesen, z. B. als Wiedereingliederungs- oder Qualifizierungsmaßnahme.

Kontakt

Keine Angaben

info@gsflooring.org.uk
+44 2151 371 80
www.findcarpettiles.co.uk

Recycelte Materialien

- diverse

Gesammelte Produkte

- Teppichfliesen

Mengen

- Keine Angaben

Recyclingprozess

- Aufbereitung und Reinigung zur Wiederverwendung
- Verwendung für soziale Zwecke
- Verschenken von gebrauchten Teppichfliesen

Annahmelogistik und Einzugsgebiet

- Abholung von palettierten Teppichfliesen bzw. Teppichverschnitt in Big Bags
- Durchführung durch Partnerlogistikunternehmen
- Englandweit

Rezyklatverwendung

- Wiederverwendung

Quelle: (Greenstream 2020)

Anglo Recycling

Anglo Recycling sammelt kommerzielle Teppich-Verlegereste und Randzuschnitte aus dem Teppichherstellungsprozess und produziert daraus Teppichrückenschichten.

Kontakt

Tong Lane,
Whitworth, Rochdale, Lancashire,
OL12 8BG,
United Kingdom

info@angloreycling.com
+44 1706 853 513
www.angloreycling.com

Recycelte Materialien

- PP
- Wolle
- Weich PVC

Gesammelte Produkte

- Randverschnitt professioneller Teppichverleger
- Beim Herstellungsprozess anfallende Verschnitte

Mengen

- 1 kt/a

Recyclingprozess

- Schreddern
- Sortieren
- Aufbereiten zu Fasern
- Produktion von Teppich Rückenschichten

Annahmelogistik und Einzugsgebiet

- Zusammenarbeit mit kommerziellen Teppichverlegern sowie Teppichproduzenten
- Englandweit

Rezyklatverwendung

- Downcycling zu Teppich-Rückenschichten

Quellen: (Anglo Recycling 2020)

ERDE – Erntekunststoffrecycling Deutschland

Im Rahmen der verschiedenen unter RIGK zusammengefassten Rücknahmesysteme organisiert das ERDE-Rücknahmesystem die Rücknahme von Kunststofffolien aus der Landwirtschaft. Die Folien werden regranuliert und als Kunststoffprodukte wiederverwendet.

Kontakt

Friedrichstr. 6
D - 65185 Wiesbaden

erde@kunststoffverpackungen.de

+49 611 308600-0

www.erde-recycling.de

Recycelte Materialien

- PE-LD
- PE-LLD

Mengen

- 13,4 kt/a (2018)

Gesammelte Produkte

- Flachsilofohlen
- Siloschläuche
- Unterziehfolien
- Silagestretchfolien
- Netzersatzfolien
- Rundballennetze

Recyclingprozess

- Annahme von verpressten Folien
- Schreddern und waschen
- regranulieren

Annahmelogistik und Einzugsgebiet

- ca. 500 Annahmestellen bei 90 Handelspartnern in Deutschland
- Containerlogistik an der Sammelstelle
- oder Abholung am landwirtschaftlichen Betrieb

Rezyklatverwendung

- Kunststoffprodukte, auch Folien und Säcke

Quellen: (RIGK 2019), (Peters 2019)

3.5.2 Beurteilung der freiwilligen Rücknahmesysteme

3.5.2.1 Rücknahme von PVC-Abfällen

Viele der in Deutschland etablierten und hier vorgestellten Rücknahmesysteme von Baukunststoffen organisieren die Rücknahme von PVC-Produkten. Dies hat mehrere Ursachen. Es spiegelt einerseits den Fakt wider, dass im Bausektor PVC der am meisten verwendete Kunststoff ist und somit ein mengenmäßig relevanter Stoffstrom entsteht. Es ist aber auch durch die gute technische Realisierbarkeit der Rücknahme und des Recyclings begründet. Der thermoplastische Werkstoff kann im Gegensatz zu Duroplasten wie PU durch Recompoundieren zu Rezyklatmaterial verarbeitet werden. Es existiert zudem die Technologie und industrielle Erfahrung, diese Rezyklate sinnvoll zu verarbeiten. Auch die Sammlung vieler PVC-basierter Produkte lässt sich gut bewerkstelligen. Eine Abtrennung von PVC in Fenstern, Türen oder Rollläden ist während des selektiven Rückbaus ohne übermäßigen Aufwand zu bewerkstelligen und auch der Ausbau von Bodenbelägen oder Dachbahnen kann mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden. Eine Wiederverwendung von unter Putz verbauten oder unterirdisch verlegten Rohren ist allerdings aufgrund des erschwerten Rückbaus unwahrscheinlich und wird selten durchgeführt. Die PVC-Recyclingsysteme entstanden nicht zuletzt wegen des ehemals negativen Bildes von PVC in der Gesellschaft und dem daraus folgenden Druck auf die PVC-Industrie, ökologische Potenziale des Werkstoffes aufzuzeigen und deren Umsetzung zu forcieren.

Die Rücknahmesysteme zu PVC lassen sich gemäß unserer Analyse in zwei Hauptströme unterteilen. Dies ist zum einen das von Rewindo und den Kunststoffrohrverbänden zurückgenommene PVC-U. Die Sammellogistik für abgetrennte Produkte ist hier etabliert, ein hochwertiges Recycling ist möglich und weit fortgeschritten. Technologien existieren, um das aus den Rücknahmesystemen erhaltene Rezyklat wieder in derselben Produktkategorie einsetzen zu können und somit einen Materialkreislauf zu ermöglichen. Folgende Normen bzw. Normentwürfe sind für den Rezyklateinsatz in diesen Produkten relevant:

- ▶ Geregeltes Verfahren für das Recycling von gebrauchten PVC-U-Fenstern und Türen; prEN 17410:2020
 - Stellt angelehnt an die Life Cycle Analysis (LCA)-Methode den Lebenszyklus von PVC dar und definiert den PVC-Materialstrom für verschiedene Wiederverwendungsansätze
 - Legt Prüfverfahren für das Material fest. Diese beziehen sich dabei explizit auf verschiedene Stationen im Lebenszyklus, also bspw. Recyclinginput, Recyclingoutput.
 - Beschreibt wie recyclinggerechte Produkte designt werden können und Qualitätssicherung implementiert werden kann
- ▶ Kunststoffrohrleitungen und Formstücke – Eigenschaften für die Verwendung von Rücklaufmaterial und Rezyklat aus PVC-U-, PP- und PE-Materialien; CEN/TS 14541:2013
 - Legt Prüfverfahren für die Beurteilung von Rezyklatmaterialien, darunter PVC, fest
- ▶ Kunststoff-Rezyklate – Charakterisierung von Polyvinylchlorid (PVC)-Rezyklaten; Deutsche Fassung EN 15346:2014
 - Legt obligatorische und optionale Prüfverfahren für die Prüfung von PVC-Rezyklaten fest
 - Beschreibt Prüfverfahren für die Prüfung von PVC-Rezyklatqualität sowie Prüfverfahren zur Bestimmung der Verarbeitungstauglichkeit von PVC-Rezyklaten
- ▶ Kunststoff-Rezyklate – Charakterisierung von Kunststoffabfällen; EN 15347:2007
 - Legt obligatorische und optionale Kenndaten zu Kunststoffabfällen fest.

Der zweite relevante PVC-Materialstrom ist das von der AGPR und RoofCollect zurückgenommene PVC-P. Auch hier ist eine Abtrennung während des Rückbaus oder bei Renovierungsarbeiten möglich. Die Schadstoffproblematik für PVC-P wird in Kapitel 4.2.1.2 dargestellt. Wie auch für den Fall des PVC-U findet hier herstellerübergreifende Sammlung und Recycling statt. Die Sammlung der Materialien sowie das Recycling ist etabliert, allerdings findet in diesem Bereich auch Downcycling zu niederwertigeren Produkten statt.

3.5.2.2 Rücknahme von Bodenbelägen

Rücknahmesysteme zum Bodenbelagsrecycling haben theoretisch ein hohes Potenzial, da die Separation während des selektiven Rückbaus gut möglich ist. Auch findet bereits großskaliger Rezyklateinsatz in der Produktion statt. Eine Hürde stellt hier allerdings die Materialvielfalt in den Produkten dar. Die bestehenden Systeme zeigen die daraus entstehenden Optionen:

- ▶ Aufbereitung und Wiederverwendung gebrauchter Bodenbeläge wie von Greenstream durchgeführt. Hier wird die Lebensdauer des Produktes allerdings nur verlängert, ein anschließendes Recycling ist dann immer noch nicht möglich.
- ▶ Ein für das spätere Recycling ausgelegtes Produktdesign kann das Recycling einzelner Produkte oder Produktgruppen möglich machen. Die Rücknahme und das Recycling erfolgt dann herstellerspezifisch. Das Modell wird von den Rücknahmesystemen Interface und Restart für EcoBase Teppichfliesen umgesetzt.
- ▶ Ein Downcycling wie es von Anglo Recycling durchgeführt wird.

3.5.2.3 Rücknahme von Rohren

Die Rücknahmesysteme für Rohre zeigen die facettenreichen Herausforderungen für ein erfolgreiches Kunststoffrecycling im Bausektor. Technisch ist das Recycling machbar, ein geringes Downcycling durch hohe Qualitätsansprüche wie bspw. für Druckrohre ist hinnehmbar. Relevante Normen bzw. Normentwürfe sind hier:

- ▶ Kunststoffrohrleitungen und Formstücke – Eigenschaften für die Verwendung von Rücklaufmaterial und Rezyklat aus PVC-U-, PP- und PE-Materialien; CEN/TS 14541:2013
- ▶ Kunststoff-Rezyklate – Charakterisierung von Polypropylen (PP)-Rezyklaten; EN 15345:2007
 - Legt Prüfverfahren für Charakterisierung von PP Rezyklaten sowie einen Prüfbericht fest
 - Beschreibt ein Prüfverfahren zur Charakterisierung von PP Rezyklaten
- ▶ Kunststoff-Rezyklate – Charakterisierung von Polyethylen (PE)-Rezyklaten; prEN 15344:2020
 - Legt obligatorische und optionale Prüfverfahren für die Prüfung von PE Rezyklaten sowie einen Prüfbericht fest
 - Beschreibt mehrere Prüfverfahren zur Charakterisierung von PE Rezyklaten
- ▶ Kunststoff-Rezyklate – Charakterisierung von Kunststoffabfällen; EN 15347:2007

Eine große Hürde für das Rohrrecycling stellt die Separation während des Rückbaus dar. Die Wiedergewinnung von unter Putz verbauten oder unterirdisch verlegten Rohren ist wirtschaftlich gegenwärtig nicht darstellbar.

3.5.2.4 Rücknahme von Agrarfolien

Das Erde Recyclingsystem für Agrarfolien zeigt, dass auch im Agrarsektor Rücknahmesysteme etabliert werden können. Das Produktspektrum ist hier noch begrenzt, kann und sollte aber ausgebaut werden. Die Sammlung findet in den Fraktionen Polyethylen niederer Dichte (PE-LD) und lineares Polyethylen niederer Dichte (PE-LLD) statt. Für PE Recycling ist die Norm „Kunststoff-Rezyklate – Charakterisierung von Polyethylen (PE)-Rezyklaten; prEN 15344:2020“ relevant.

3.5.2.5 Rücknahme von Dämmmaterialien

Eine weitere große Menge an Kunststoffen wird im Bausektor als Dämmstoff verwendet. Hier sind – anders als bei Stein- und Glaswolle – keine Rücknahmesysteme bekannt. Für duroplastische Werkstoffe wie PUR ist ein werkstoffliches Recycling zurzeit nicht möglich. Nach Aussage eines Experten findet das Recycling der PUR Dämmmaterialien vermahlen als Zuschlagstoff in Pressplatten statt, vgl. Kapitel 4.3.4.6. Hier ist die Nachfrage nach PUR-Schaumstoffresten zurzeit höher als das Angebot. Polystyrol als thermoplastisches Material könnte dagegen theoretisch werkstofflich recycelt werden, vgl. Kapitel 4.3.4.4.

Flammschutzmittel stellen für alle brennbaren Dämmstoffe eine potentielle Schadstoffquelle dar. Gerade der Zeitversatz zwischen Produktion und Rückbau durch die lange Nutzungsdauer der Produkte verkompliziert das Recycling dann zusätzlich. Das kann gut am Beispiel des 1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan (HBBD) gezeigt werden. Auch die geringe Dichte und damit relativ geringen Massen der Dämmstoffe erschweren das wirtschaftliche Sammeln und Recyceln von Dämmstoffen. Hinzu kommt, dass Dämmstoffe gemäß der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) gesammelt erfasst werden und nicht zwischen kunststoffbasierten und anderen Dämmstoffen getrennt wird. Hier sollte eine weitere Aufspaltung oder eine Einordnung unter den Kunststoffabfällen erfolgen.

4 Verwertungstechniken

In diesem Kapitel werden die für Bauprodukte verfügbaren Kunststoff-Aufbereitungs- und Verwertungstechniken beschrieben. Abschnitt 4.1 gibt zunächst eine Übersicht über den Kunststoffkreislauf in der Baubranche, die eingesetzten Kunststoffsorten und deren Anwendungsgebiete. In Abschnitt 4.2 werden die zu erwartenden Schadstoffbelastungen beschrieben und Methoden zur Schadstoffentfrachtung dargestellt. Die Beschreibung der werkstofflichen und rohstofflichen Verwertungsverfahren für die eingesetzten Werkstoffe folgt in Abschnitt 4.3, bauproduktspezifische Verfahren werden in Abschnitt 4.4 beschrieben. Die Verwertungsmöglichkeiten von glasfaserverstärkten Kunststoffen werden in Abschnitt 4.5 gesondert dargelegt. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung und Empfehlungen.

4.1 Kunststoffkreislauf in der Baubranche

Der Kunststoffkreislauf in der Baubranche ist in Abbildung 16 dargestellt. Er beginnt mit der Polymerisation von Monomeren, wie z. B. Vinylchlorid zu Polyvinylchlorid. Der erhaltene Kunststoff wird dann compoundiert, es werden also Additive hinzugegeben, um die Eigenschaften des Kunststoffes anzupassen. Aus diesem Kunststoff werden dann von Kunststoffverarbeitern Produkte gefertigt. Dies geschieht entweder im Spritzguss oder durch Extrusion zu Halbzeugen, wie z. B. Folien oder Profilen, die anschließend zu Bauprodukten weiterverarbeitet werden. Produktionsabfälle aus dem Herstellungsprozess können qualitativ hochwertig recycelt werden und gehen dann als Rezyklat zurück an die Kunststoffverarbeiter bzw. werden betriebsintern aufbereitet und erneut der Produktion zugeführt. Die Bauprodukte werden nach der Nutzung zu Abfall. Kunststoff aus gemischten Abfällen wird nach einer Vorbehandlung und Sortierung entweder thermisch verwertet oder recycelt, sortenreine Abfälle können direkt recycelt werden. Wird das Material recycelt, ohne dabei seine chemische Struktur zu ändern, spricht man von werkstofflichem Recycling, normalerweise bestehend aus Reinigung, Sortierung und Recompoundierung (vgl. Kapitel 4.3). Lösemittelbasierte Verfahren zählen ebenso zum werkstofflichen Recycling. In Nischenanwendungen wie dem Recycling von PA6-Fasern ist auch ein chemisches (=rohstoffliches) Recycling sinnvoll. Hier wird der Kunststoff depolymerisiert, aufgereinigt und anschließend wieder zu Kunststoff polymerisiert. Auch wenn der Kunststoff thermisch zu erdölähnlichen Produkten zersetzt wird und daraus wieder Monomere synthetisiert werden, spricht man von chemischem Recycling (Martens und Goldmann 2016).

Tabelle 4: Mengenmäßig im Jahr 2017 meistverbaute Kunststoffsorten in vorwiegend aus Kunststoff gefertigten Bauprodukten, sowie deren wichtigen Anwendungsgebiete.
Quelle: Kapitel 2.

Kunststoffsorte	Verbaute Menge (2017)		Wichtige Anwendungsgebiete
	t	Anteil	
PVC	785.000	30 %	Fenster-, Tür-, Rollläden- und Bauprofile, Rohre, Abdichtungsbahnen, Bodenbeläge, Kabel-Isolierung
PE	425.000	16 %	Rohre, Bauprofile
Bitumen	287.000	11 %	Abdichtungsbahnen
EPS	248.000	9 %	Dämmstoffe
PUR	162.000	6 %	Dämmstoffe
PP	124.000	5 %	Rohre, Textilböden
XPS	75.000	3 %	Dämmstoffe
GFK	74.000	3 %	Rohre, Profile, Lichtkuppeln und -bänder
PA	69.000	3 %	Textilböden, Beschläge
PMMA	43.000	2 %	Lichtkuppeln und- Bänder, Sanitär

4.2 Schadstoffbelastungen und -entfrachtung

In Baukunststoffen können sehr unterschiedliche Kontaminationen vorliegen, die ein Recycling erschweren oder unmöglich machen. Die Kontaminationen können dabei verschiedene Ursachen haben. Relevant sind Fremdstoffe (andere Kunststoffe, Metalle etc.), aber auch Füllstoffe oder Verunreinigungen, z. B. aus Produktresten in Verpackungen. Diese Kontaminationen können das Recycling erschweren oder verhindern, da sie die Eigenschaften der Sekundärkunststoffe verschlechtern. Daneben existieren Schadstoffe, die wegen ihrer Bedenklichkeit für die menschliche Gesundheit nicht im Rezyklat enthalten sein sollten. Hierzu zählen insbesondere Additive, die früher eingesetzt wurden, heute jedoch nicht mehr zulässig sind. Diese Additive wurden gezielt in den Kunststoff eingebracht, um dessen Eigenschaften positiv zu verändern. Daneben kann es auch zu einem Eintrag von Schadstoffen während der Montage, der Nutzung oder der Demontage kommen. Hier sind Kontaminationen durch Farben und Lacke, Klebstoffe aber auch Mörtelanhaftungen zu nennen. Ziel muss es sein, möglichst lösbare Verbindungen zu wählen, sauber zu demontieren und gut zu sortieren.

4.2.1 Additive in der Kunststoffverarbeitung

Additive tragen häufig maßgeblich zu den spezifischen Eigenschaften von Kunststoffen bei. Der Einsatz von Additiven ist also nicht per se zu vermeiden. Viele ehemals übliche Additive wurden jedoch durch die Chemikaliengesetzgebung, insbesondere durch die REACH-Verordnung (*Verordnung (EG) Nr. 1907/2006*) in ihrer Nutzung eingeschränkt. Für die im Rahmen dieser Verordnung bewerteten und in der Verwendung eingeschränkten Stoffe sowie die Verdachtsliste mit Stoffen, für welche noch keine abschließende Bewertung erfolgt ist, besteht der Verdacht auf erhebliches Schadenspotenzial. Ferner ist die POP-Verordnung (*Verordnung (EU) 2019/1021*) relevant und schränkt die Verwendung einiger Stoffe ein oder verbietet diese.

Hierdurch entstehen beim Recycling teils erhebliche Probleme, denn vielfach können Schadstoffe nicht einfach abgetrennt werden, sondern verbleiben im Sekundärkunststoff. Dieses Problem tritt bei langlebigen Produkten, wie Bauprodukte es sind, naturgemäß eher auf als bei kurzlebigen Produkten wie etwa Verpackungen. Wichtig ist dabei auch, dass dies kein abgeschlossener Prozess ist, sondern es immer wieder dazu kommen wird, dass Stoffe verboten werden.

Die in der Kunststoffverarbeitung eingesetzten Additive können in verschiedenen Gruppen eingeteilt werden. Von den vielen insgesamt eingesetzten Stoffen sind jedoch nur einige relevant für Einschränkungen beim Recycling. Schadstoffe in den Baukunststoffen sind jeweils typisch für einzelne Kunststoffe, da auch die Additive jeweils in bestimmten Kunststoffen eingesetzt wurden und werden. Bei PVC-U können insbesondere Stabilisatoren und Pigmente ein Problem für das Recycling darstellen. Im Gegensatz zu PVC-U enthält PVC-P Weichmacher, von denen Gesundheitsgefahren aber ggf. auch Probleme für das Recycling und den Einsatz der Rezyklate ausgehen können. Bei den Polystyrolämmstoffen (EPS und XPS) sind insbesondere die eingesetzten Flammschutzmittel kritisch.

Zu Problemen beim Recyclingprozess kommt es, wenn Additive zueinander nichtkompatibel sind. Dies kann insbesondere dann passieren, wenn Kunststoffe und ihre Additive aus verschiedenen Quellen stammen und beim Recycling miteinander vermischt werden.

4.2.1.1 Stabilisatoren

Stabilisatoren sind für PVC von großer Bedeutung, um die Schädigungen durch thermische Belastung und Friktion zu verringern (Diemert u. a. 2008). Bis Ende 2015 konnten in der EU Bleistabilisatoren in PVC eingesetzt werden. Bereits zuvor wurden in Deutschland aufgrund einer Selbstverpflichtung „Vinyl 2010“ (The European Council of Vinyl Manufacturers u. a. 2001) Bleistabilisatoren freiwillig durch Calcium-Zink-Systeme ersetzt. Bereits vor den Bleistabilisatoren wurden auch Cadmium-Stabilisatoren nicht mehr in der EU verwendet. Mit einer freiwilligen Selbstverpflichtung wurde auf Barium-Cadmium-Stabilisatoren in der EU-15 bis 2001 verzichtet (Diemert u. a. 2008) Diese Verpflichtung wurde auf die EU-27 erweitert und bis 2007 umgesetzt (Rohde 2014). Ersetzt werden Barium-Cadmium-Stabilisatoren durch Barium-Zink-Stabilisatoren (Maier und Schiller 2016, 498). Insbesondere in alten, langlebigen PVC-Produkten wie Fenster, Türen, Rollläden oder Rohren sind jedoch noch heute insbesondere Bleistabilisatoren zu finden. Auch importierte PVC-Produkte können diese Stabilisatoren enthalten. Damit können auch daraus hergestellte Rezyklate diese Bleistabilisatoren enthalten.

Trotz des Verbots von Cadmium- und Bleistabilisatoren ist es bislang möglich, PVC-Rezyklat in Bauprodukten einzusetzen (*Verordnung (EU) Nr. 494/2011*), wenn enthaltenes Blei bzw. Cadmium aus Rezyklat stammt. Gegen diese Ausnahme regt sich jedoch Widerstand (Europäisches Parlament 2020). Das Europäische Parlament hat ein Veto gegen einen Vorschlag der Kommission eingelegt, der weiterhin einen Bleianteil in bestimmten PVC-Erzeugnissen aus PVC-Rezyklaten mit geringem Expositionspotenzial erlaubt hätte. Der Vorschlag hatte vorgesehen, abweichend von einem allgemeinen Grenzwert von 0,1 % Blei in PVC, für recyceltes PVC höhere Grenzwerte zu erlauben (2 % in PVC-U und 1 % in PVC-P) (Europäisches Parlament 2020). Laut der ECHA steht die finale Entscheidung der EU-Kommission zur Regelung von Blei in recyceltem PVC noch aus (European Chemicals Agency 2021b).

Ein Recycling von PVC-U aus Fenstern wurde bereits etabliert und zeigt kontinuierlich steigende Mengen an hergestelltem Rezyklat (Rewindo 2020a), vgl. Kapitel 3.5 und 5.3.4. Sollte zukünftig auch für recyceltes PVC der allgemeine Grenzwert gelten, würde dies das werkstoffliche Recycling von PVC aus dem Baubereich erheblich erschweren oder unmöglich machen. Allerdings ist auch die energetische Verwertung von PVC aufgrund des niedrigen Heizwerts

nicht sehr lohnend. Es besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit, bei einer rohstofflichen Verwertung das Chlor in Form von Chlorwasserstoff zurückzugewinnen (VinylPlus 2015).

4.2.1.2 Weichmacher

Im Bauwesen kommt beim PVC insbesondere PVC-U zum Einsatz, das grundsätzlich ohne Weichmacher hergestellt wird. Weichmacher finden sich jedoch in PVC-P, das in Kabeln und Bodenbelägen genutzt wird.

Mit etwa drei Vierteln des Marktes stellen die Phthalate die bedeutendste Klasse der Weichmacher dar (Bonnet 2014). Zu den Weichmachern gehören insbesondere die kurzkettigen Phthalate Diethylhexylphthalat (DEHP), Benzylbutylphthalat (BBP) und Dibutylphthalat (DBP) Diisobutylphthalat (DIBP), die einer REACH-Beschränkung unterliegen und von der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) auf die Liste der besonders besorgniserregenden Stoffe gesetzt wurden. DEHP, BBP, DBP und DIBP sind als reproduktionstoxisch (Repr. 1B) eingestuft. BBP und DBP sind zusätzlich als Gewässergefährdend (Aquatic Acute 1), BBP auch als Gewässergefährdend (Aquatic Chronic 1) eingestuft (European Chemicals Agency 2019). Die Verwendung dieser Phthalate wurde mit wenigen Ausnahmen zum 07. Juli 2020 in der EU verboten (European Chemicals Agency o. J.). Die höhermolekularen Phthalate Diisononylphthalat (DINP), Diisodecylphthalat (DIDP) und Di-n-octylphthalat (DNOP) unterliegen weniger strengen Regulierungen und dürfen nicht mehr in Kinderspielzeugen eingesetzt werden (European Chemicals Agency o. J.).

Insbesondere die kurzkettigen Phthalate werden daher praktisch nicht mehr verwendet und durch andere Weichmacher ersetzt, sie können jedoch in Alt-PVC vorhanden sein. Eine Entfernung der Phthalate erscheint beim Recycling kaum praktikabel. So wurde auch die Recycling Anlage im italienischen Ferrara, die nach dem lösemittelbasierten Vinyloop-Verfahren arbeitete, 2018 stillgelegt, da die Produkte zu große Mengen Phthalate enthielten, die nicht wirtschaftlich abgetrennt werden konnten (KunststoffWeb 2018).

4.2.1.3 Pigmente

In Baukunststoffen kommen auch Pigmente zum Einsatz. Relevant ist derzeit insbesondere der Einsatz von TiO_2 , z. B. in Kunststofffenstern. Im Oktober 2019 wurde Titandioxid (TiO_2) von der Europäischen Kommission als karzinogener Stoff der Kategorie 2 aufgrund der Gefahr des Einatmens eingestuft. Das betrifft jedoch ausschließlich pulverförmiges TiO_2 mit einem aerodynamischen Durchmesser $\leq 10 \mu\text{m}$ und Produkte, in dem die Konzentration des TiO_2 mindestens 1 % beträgt. Bei festen und flüssigen Gemischen mit 1 % TiO_2 gilt die Einstufung nicht, jedoch wird ein Warnhinweis benötigt (Merz 2019). Dies bedeutet, dass zukünftig Produkte wie Kunststoff, die TiO_2 enthalten, einen Warnhinweis erfordern.

Problematisch beim Recycling kann es sein, wenn Alt-PVC Cadmiumpigmente und Bleistabilisatoren enthalten. Da beim Recycling unterschiedliches PVC zusammentrifft, können Verfärbungen entstehen, wenn Cadmiumpigmente, welche Sulfid enthalten, mit den PVC-Bleistabilisatoren zusammentreffen und miteinander reagieren. Ein dunkles Bleisulfid entsteht. Dies kann auch passieren, wenn schwefelhaltige Zinnstabilisatoren mit bleihaltigen Pigmenten reagieren (Maier und Schiller 2016, 789).

4.2.1.4 Biozide

Im PVC wurden verschiedene Biozide eingesetzt, die heute nicht mehr genutzt werden und durch andere Biozide ersetzt wurden. Ein Grund für den Ersatz war, dass das Biozid Kupfer-8-hydroxychinolin Verfärbungen herbeigeführt hat. Der andere Grund für den Ersatz ist die Toxizität wie bei Phenyl-quecksilberverbindungen und OBPA (10,10'-Oxybisphenoxarsin),

welches insbesondere bei PVC-P eingesetzt wurde, jedoch auch in Polyolefinen angewendet wurde (Maier und Schiller 2016, 1160).

4.2.1.5 Flammenschutzmittel

Das Flammenschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD), das in Polystyrolschaum (EPS und XPS) angewendet wurde, darf seit dem 15. August 2015 nicht mehr eingesetzt werden, da es in Anhang XIV zur REACH-Verordnung (European Chemicals Agency 2021a) als besonders besorgniserregender Stoff aufgeführt wird. Bereits 2013 wurde HBCD als persistierender organischer Schadstoff (POP, von engl. persistent organic pollutants) von der internationalen Stockholmer-Konvention eingestuft. Es ist bioakumulierbar, toxisch und steht unter dem Verdacht der Fortpflanzungsgefährdung. Ersetzt werden kann HBCD durch Blockcopolymer aus Polystyrol und bromiertem Polybutadien (BrPBPS) (Maier und Schiller 2016, 1027; Wurbs u. a. 2017). Da HBCD beim Recycling nicht zerstört wird, bedeutet dies, dass diese Altkunststoffe ohne Entfernung des HBCD nicht recycelt werden dürfen und entsorgt werden müssen. Damit besteht bei einem der größten Baustoffströme ein erhebliches Recyclinghindernis (vgl. z. B. Wurbs u. a. 2017). Durch einen Flammenschutzmittel-Schnelltest kann relativ schnell und fehlertolerant bestimmt werden, ob HBCD oder BrPBPS im EPS eingesetzt wurden. Hierzu wird EPS- bzw. XPS-Abfallmaterial mit Aceton extrahiert und in einer Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) der Bromgehalt im Extrakt bestimmt. Da Brom aus HBCD gelöst werden kann, Brom aus dem Polymer jedoch im zurückbleibenden Gel verbleibt und nicht gelöst wird, kann über eine Bestimmung des Bromgehaltes des Extraktes relativ einfach überprüft werden, ob es sich um HBCD-haltige Abfälle handelt oder nicht (Schlummer u. a. 2017; Schlummer u. a. 2015).

Für die Entfernung von HBCD stehen inzwischen Verfahren zur Verfügung (Creacycle o. J.). Hierbei wird der Kunststoffabfall zerkleinert und aufgelöst. Unlösliche Verunreinigungen können abgetrennt werden. Die Kunststoffe können wieder ausgefällt werden, das Lösungsmittel regeneriert werden und die löslichen Verunreinigungen einschließlich des HBCD werden entsorgt oder recycelt. Da das eingesetzte Lösungsmittel recycelt wird, ist die eingesetzte Lösemittelmenge im Verhältnis zum verarbeiteten Kunststoff mit weniger als 1 % gering.

In PVC, Polystyrol und den Polyolefinen sind auch Chlorparaffine als Flammenschutzmittel zu finden. Seit 2014 ist der Einsatz von kurzkettigen Chlorparaffinen verboten (*Verordnung (EU) 2019/1021*). Infolge der POP-Verordnung (*Verordnung (EU) 2019/1021*) dürfen daneben auch die bromierten Flammenschutzmittel (Decabromdiphenylether (DecaBDE) und die polybromierten Diphenylether (PBDE) Tetra-, Penta-, Hexa- und Heptabromdiphenylether ab einem Summengrenzwert von 1000 mg/kg in den Kunststoffen nicht mehr enthalten sein, wenn diese recycelt werden sollen. In diesem Fall muss der Kunststoff gemäß Art. 7 Abs. 2 und 3 der EU-POP-Verordnung so behandelt werden, dass dabei die PBDE zerstört werden.

Recyclingverfahren sind verboten, soweit nicht vorher die PBDE abgetrennt und anschließend zerstört werden. Hauptsächlich betroffen hiervon sind insbesondere Elektronikprodukte jedoch auch Textilien, Kunststoffe in Fahrzeugen unter Umständen aber auch Produkte im Baubereich wie elektrische Isolierungen, Dichtmassen, Beschichtungen, Farben, Rohre usw. (Neumann 2019).

4.2.2 Glasfasern und GFK

Problematisch bei GFK sind insbesondere die bei der Verarbeitung eingesetzten Harze und Härter (BG BAU 2020), hierdurch gibt es jedoch keine Probleme bei der Entsorgung oder dem, ohnehin kaum möglichen, Recycling.

Die einzelnen Glasfasern haben einen Durchmesser von 7–13 µm. (Hornbogen u. a. 2019). Damit sind die genutzten Glasfasern selbst nicht lungengängig. Als lungengängig gelten Fasern mit:

- ▶ Faserdurchmessern < 3 µm,
- ▶ Faserlängen > 5 µm,
- ▶ Länge-/Durchmesser-Verhältnissen > 3

Derartige Stäube können jedoch etwa beim Schleifen von GFK-Teilen freigesetzt werden. Für sie gilt ein TRK-Wert (Technische Richtkonzentration) von 250.000 Fasern/m³. Auch wenn bisher keine diesbezüglichen Informationen vorliegen, erscheint es grundsätzlich möglich, dass derartige Faserstäube auch beim Recycling von GFK entstehen können. Dies gilt daher auch für eine Exposition von Arbeitskräften beim Recycling.

Die Faserstaubproblematik wurde im Zusammenhang mit Mineralfaserdämmstoffen intensiv diskutiert und hat mit der TRGS 905 zu regulatorischen Maßnahmen geführt (Ausschuss für Gefahrstoffe 2020). Eine Anwendung der TRGS 905 für textile Glasfasern ist nicht vorgesehen. Dennoch kann hiermit zumindest abgeschätzt werden, ob von etwaigen lungengängigen Fasern, die bei der Entsorgung, dem Recycling oder der Verarbeitung von GFK entstehen könnten, ein gesundheitliches Risiko ausgehen kann. Bei der Beurteilung wird nicht nur die Form berücksichtigt, sondern auch die chemische Zusammensetzung, um die Biolöslichkeit zu beurteilen und einen s. g. Kanzerogenitätsindex zu bestimmen. Hierzu wird die folgende Formel genutzt (Ausschuss für Gefahrstoffe 2020):

$$KI = \left(\sum Na, K, B, Ca, Mg, Ba - Oxide \right) [\%] - (2 \times Al - Oxide) [\%]$$

- ▶ KI ≥ 40: nicht krebserzeugend
- ▶ KI > 30: bis < 40 möglicherweise krebserzeugend (Kategorie 2)
- ▶ KI ≤ 30: krebserzeugend (Kategorie 1b)

Für die betrachteten Gläser in Tabelle 6 ergeben sich damit für die E-Gläser Werte für KI von 0,2 bis 7,5, für die C-Gläser von 19,4-23 und für das S-Glas von -40. Damit weisen alle in relevanten Mengen eingesetzten Glasfasern eine hohe Biobeständigkeit auf. Das Verfahren gilt jedoch als wenig zuverlässig, da auch deutlich abweichende Zusammensetzungen untersucht wurden, die bei einem hohen KI und hohem Al₂O₃-Gehalt eine nachgewiesene geringe Biobeständigkeit aufweisen (Diederich u. a. 2017; Ritthoff 1997). Im Gegensatz zu Faserdämmstoffen sollte die Menge freigesetzter lungengängiger Fasern gering sein, da der Faserdurchmesser i. d. R. zu groß ist. Bei Messungen der Holz-Berufsgenossenschaft wurde bisher beim Herstellen von GFK-Teilen weder eine Überschreitung der zulässigen Feinstaubkonzentration noch eine Überschreitung der zulässigen Faserkonzentration festgestellt. Beim Schleifen von GFK-Teilen wurden Konzentrationen von maximal 110.000 Fasern/m³ gemessen, beim Zuschneiden der Gewebematten deutlich niedrigere Konzentrationen (Holz Berufsgenossenschaft 2000). Die Situation beim Recycling sollte jedoch gegebenenfalls gesondert betrachtet werden.

4.2.3 Schlussfolgerungen

In Baustoffen kommt eine Reihe von Schadstoffen vor, die heute nicht mehr eingesetzt werden dürfen und ein erhebliches Hindernis für das Recycling darstellen. Dies betrifft insbesondere Stabilisatoren, Flammschutzmittel und Weichmacher. Diese Schadstoffe können i. d. R. nicht oder nur mit hohem (unwirtschaftlichem) Aufwand entfernt werden.

Die Regulierung vieler Stoffe hat sich in den letzten Jahren geändert. Es ist daher davon auszugehen, dass auch zukünftig weitere Stoffe reguliert werden und zu einem Hindernis für das Recycling werden können.

Bei den als Verstärkungsfasern eingesetzten Glasfasern gibt es bisher keine kritische Einstufung. Für den Fall, dass GFK verstärkt recycelt werden, ist jedoch nicht auszuschließen, dass auch hier Einschränkungen erfolgen können.

4.3 Aufbereitungs- und Verwertungstechniken

4.3.1 Abfallerfassung und -Vorbehandlung

Nach § 8 der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) sind Erzeuger*innen und Besitzer*innen von Bau- und Abbruchabfällen verpflichtet, Kunststoffe (Abfallschlüssel 17 02 03), Bitumengemische (Abfallschlüssel 17 03 02), Kabel (Abfallschlüssel 17 04 11) und Dämmmaterial (Abfallschlüssel 17 06 04) getrennt zu sammeln, zu befördern und vorrangig der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen. Zu bemerken ist, dass die kunststoffbasierten Dämmmaterialien (EPS, XPS, PUR) mit anderen Dämmmaterialien wie Stein- oder Glaswolle unter einem gemeinsamen Abfallschlüssel erfasst werden, sodass es hier zu einer, der werkstofflichen Aufbereitung abträglichen, Durchmischung kommt.

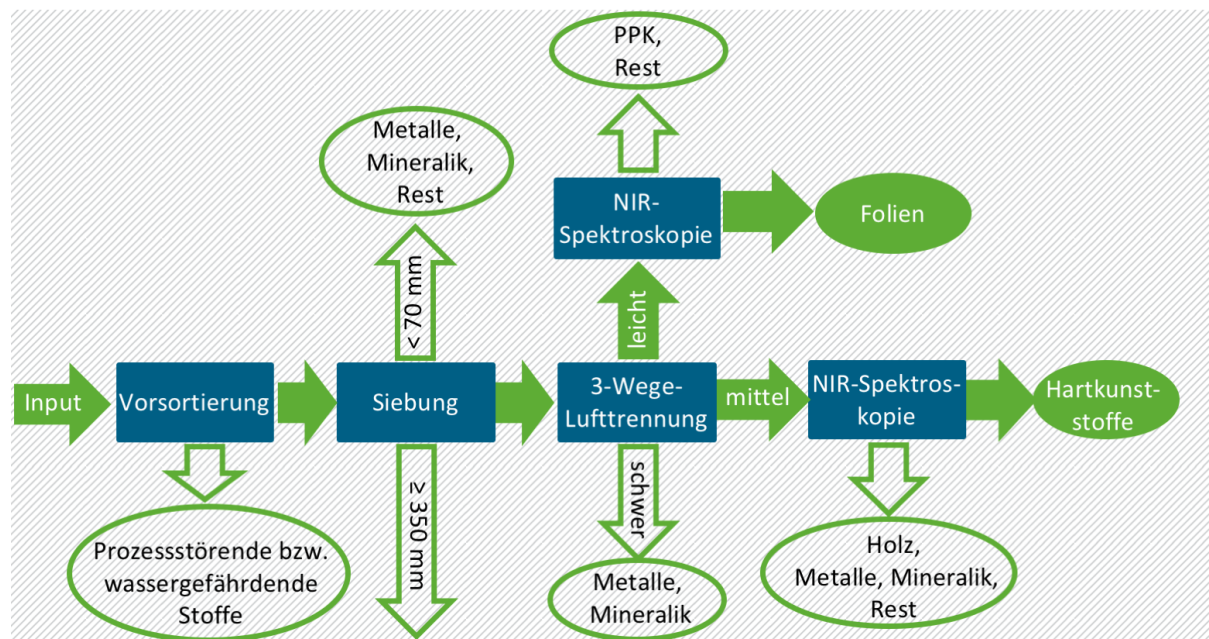
In der Praxis sind zur Getrennthaltung des Kunststoffabfallstroms eigene Abfallbehälter (beispielsweise Container oder Big Bags), sowie eine entsprechende Sammellogistik erforderlich. Im Fall von Abbruchmaterialien kommt ein selektiver Rückbau, das heißt eine sortenspezifische Erfassung als weitere Voraussetzung hinzu (BMI und BMVg 2018; Krauß und Werner 2014). Nach derzeitiger Abbruchpraxis treten Kunststoffe jedoch selten sauber und sortenrein auf (Deilmann u. a. 2017). Hinzu kommen logistische Herausforderungen, etwa durch ein großes Volumen bei geringem Gewicht im Fall von Dämmstoffen oder durch häufig vergleichsweise geringe Mengen je Anfallstelle im Fall von Dachbahnen, Rohren, Tür- und Fensterprofilen (ebd.).

Die Getrennthaltungspflicht der genannten Abfallströme nach GewAbfV entfällt, wenn die getrennte Sammlung technisch nicht möglich oder wirtschaftlich unzumutbar ist. In diesem Fall sind die Gemische, die überwiegend Kunststoff enthalten, ebenso wie die gemischten Bau- und Abbruchabfälle (Abfallschlüssel 17 09 04), nach § 9 GewAbfV einer Vorbehandlungsanlage zuzuführen. Auch diese Pflicht entfällt jedoch, wenn die Vorbehandlung technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist.

Die Vorbehandlung gemischter Bau- und Abbruchabfälle wird in Abbildung 17 dargestellt: Zunächst erfolgt die Anlieferung der gemischten Abfälle, die sich unter anderem aus mineralischen Baustoffen, Holz, Glas, Metall, Dachpappe, Dämmstoffen, Kabeln, Folien und Tapetenresten zusammensetzen. Bei einer Vorsortierung werden prozessstörende Wert- und Störstoffe, sowie wassergefährdende Stoffe aussortiert. Prozessstörende Stoffe sind insbesondere solche, die aufgrund ihrer Größe nicht der Anlage zugeführt werden sollen, wie etwa Schrott-Teile, Holzbalken, große Folien, Betonteile und Steine, Tauwerk und Umreifungsbänder, Gipskarton und Dämmwolle. In der Sortieranlage erfolgt nach einer Vorsiebung auf < 350 mm zunächst eine Klassierung über eine Siebtrommel in zwei Partikelgrößen-Fractionen (< 70 mm; ≥ 70 mm). Aus der Feinfraktion werden lediglich Metalle und Mineralien gesondert ausgelesen. Die Grobfraktion wird mittels eines 3-Wege-Lufttrennsystems in schwere, mittlere und leichte Stoffströme getrennt, wobei für Kunststoffe der mittlere und der leichte Stoffstrom relevant ist. Mittels Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR)

werden Folien aus der Leichtfraktion, sowie Hartkunststoffe aus der mittleren Fraktion sortiert. (Nehlsen AG o. J.; Nehlsen AG o. J.).

Abbildung 17: Beispielhafter Ablauf der Abfallvorbehandlung gemischter Bau- und Abbruchabfälle



Quelle: eigene Darstellung nach Nehlsen AG, o. J.-a, o. J.-b, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

Nach Einschätzung des Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (bvse) stellt diese Sortiertechnik eine umweltgerechte und wirtschaftliche Lösung zur Behandlung von gemischten Bau- und Gewerbeabfällen dar, deren Getrennthaltung vor Ort nicht möglich ist (bvse 2020). Diese technischen Möglichkeiten werden allerdings bislang in der Regel nicht für eine werkstoffliche Verwertung der gewonnenen Kunststoff-Fractionen genutzt, sondern zielen meist auf eine thermische Verwertung zusammen mit anderen brennbaren Materialien ab (Deilmann u. a. 2017; DUH 2020).

Deutlich bessere Voraussetzungen für das Recycling schaffen die freiwilligen Rücknahmesysteme für Bauprodukte (vgl. Kapitel 3). Durch die getrennte Erfassung an der Anfallstelle und eine Bündelung der Abfallströme können die benötigten Quantitäten und Reinheiten erzielt werden.

4.3.2 Sortierung und Reinigung

Im folgenden Abschnitt wird die Sortierung und Reinigung von getrennt gesammelten Kunststoffabfällen beschrieben. Je nach Anlage kommen unterschiedliche Verfahrenstechniken zum Einsatz. Die wichtigsten Schritte werden im Folgenden vorgestellt.

4.3.2.1 Zerkleinern

Der eingehende Abfall wird auf eine Größe gebracht, die mit der nachfolgenden Sortier-, Reinigungs- und Transportiertechnik kompatibel ist. Ein erster Schritt ist, falls notwendig, das sogenannte Debalig, bei dem als Ballen verpresste Abfälle in die einzelnen Stücke zerlegt werden. Zum Zerkleinern kommen Schredder für gröberes Mahlgut, sowie Schneidmühlen für feines Mahlgut zum Einsatz.

4.3.2.2 Reinigen

Die Kunststoffe sind häufig durch anhaftende Fremdmaterialien verunreinigt, wie z. B. Klebstoffe, Etiketten oder Mörtelreste. Um diese Verunreinigungen zu entfernen, sind ein oder mehrere Reinigungsschritte notwendig. Man unterscheidet zwischen Trockenreinigung und Nassreinigung. Bei der Trockenreinigung werden Störstoffe durch Reibung vom Kunststoff getrennt, um in einem folgenden Sortierschritt entfernt zu werden. Im Zuge der Nassreinigung wird mithilfe von Wasser, evtl. auch unter Einsatz von Tensiden oder Natronlauge, die Trennung von Kunststoff und Störstoff durchgeführt. Es lassen sich hohe Produktreinheiten erreichen, allerdings ist der Aufwand hoch. Neben Wasser und Reinigungsmitteln wird auch Energie für die nachfolgende Trocknung verbraucht.

4.3.2.3 Sortieren

Für die Sortierung der Kunststoffe kommen verschiedene Techniken zum Einsatz, die den Stoffstrom nach unterschiedlichen Eigenschaften aufteilen. Die wichtigsten sind in der folgenden Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Liste von Sortierschritten für die Sortierung von Bauabfällen

Sortiervorgang	Trennkriterium	Anwendung im Kunststoffrecycling	Ausführungen	Quelle
Sieben	Partikelgröße	Abtrennen von zu kleinen / zu großen Fraktionen, Auftrennen in Fraktionen verschiedener Größen	Trommelsieb, Linearschwingsieb, Kreisschwingsieb, Müllsieb	(1)
Windsichten	Masse, Form, Größe	Abtrennung von Störstoffen oder Staub	Gegenstromsichter - z. B. Zickzacksichter oder Rohrsichter, Querstromsichter	(2)
Paddelsichten / Ballistiksichten	Form und Dichte	Abtrennen runder, rollender, schwerer Materialien wie Rohre von flächigen, leichten Materialien wie Folien	Normalerweise mit integriertem Sieb	
Magnetscheidung	Ferromagnetismus	Abtrennung ferromagnetischer Materialien wie Eisen, Weißblech, Stahl	Magnettrommel, Magnetbandrolle, Überbandmagnetabscheider	(3)
Wirbelstromscheidung	Elektrische Leitfähigkeit	Abtrennung von Aluminium, Edelstahl, Kupfer	Elektromagnetisch, mit Permanentmagnet	(3)
NIR-Spektroskopie	IR-Absorptionsspektrum	Sortieren nach Kunststoffsorten	-	(4)
VIS-Spektroskopie	Farbe	Sortieren nach Farben	-	(4)
Kamera	Form, Größe, Farbe	Sortieren nach Form, Farbe, Größe; Objekterkennung zur Negativsortierung	-	(4)
Manuelles Klauben	Farbe, Form, Größe	Qualitätskontrolle, Vorsortierung	-	(3)

In der Tabelle angegebene Quellen (1) - (Feil und Pretz 2020), (2) - (Pallman 2007; Venti Oelde o. J.), (3) - (O A 2004), (4) - (Martens und Goldmann 2016),

4.3.3 Recompoundierung von Thermoplasten

Um thermoplastische Kunststoffabfälle für einen erneuten Einsatz in der Produktion vorzubereiten, werden sie recompoundiert. Die zerkleinerten, sortierten und gereinigten Abfallkunststoffe werden in einem Extruder aufgeschmolzen, mit verschiedenen Additiven und/oder Füllstoffen vermischt und granuliert. Während des Aufschmelzens werden die zuvor bereits auf Partikelebene homogenisierten Kunststoffe weiter auf molekularer Ebene homogenisiert. Ein zu hoher Energieeintrag beim Aufschmelzen bzw. Mischen kann allerdings zu thermischen Abbaureaktionen der Kunststoffe führen, was sich nachteilig auf die Werkstoffeigenschaften auswirkt. Auch eine Schadstoffentfrachtung während des Extrusionsprozesses ist möglich, vergleiche Kapitel 4.2. Durch die zugegebenen Additive und Füllstoffe, sowie durch gezielte Mischung verschiedener Abfallströme können die Materialeigenschaften des erhaltenen Rezyklates in gewissen Grenzen angepasst werden, um

auch unter der Bedingung einer variablen Inputqualität die Anforderungen für das spätere Werkstück zu erreichen.

Die einzelnen Verfahrensschritte des Recompoundierens werden im Folgenden dargestellt. Für eine gegebene Anwendung müssen je nach Ausgangsstoff nicht alle dieser Schritte stattfinden.

Verfahrensschritte des Recompoundierens

- ▶ Zerkleinern - die Ausgangsmaterialien können in verschiedensten Formen anfallen. Sind diese, wie z. B. bei Folien, aufgrund ihrer Größe ungeeignet für den direkten Einzug in den Extruder, findet eine vorgeschaltete Zerkleinerung statt. Typischerweise wird das Material in einer Schneidmühle zerkleinert und auf eine Partikelgröße gebracht, in der es dann vom Extruder eingezo-gen werden kann.
- ▶ Verdichten - Materialien mit niedriger Schüttdichte, wie z. B. Fasern oder Schäume, müssen vor der Verarbeitung erst verdichtet werden. Das Material wird dabei mechanisch erwärmt, zusammengepresst und dadurch verdichtet.
- ▶ Vorhomogenisieren - je nach Heterogenität des Eingangsmaterials ist es sinnvoll, dieses nach dem Zerkleinern und vor dem Einzug in den Extruder nochmals zu homogenisieren, um gleichbleibende Materialeigenschaften im Recyclingkunststoff gewährleisten zu können. Dies wird durch den Einsatz eines Mischers erreicht.
- ▶ Trocknen - eine zu hohe Restfeuchte im Material wirkt sich nachteilig auf den Extrusionsprozess aus. Um das zu verhindern, wird das Material mechanisch in Zentrifugaltrocknern und/oder thermisch in Warmlufttrocknern getrocknet.
- ▶ Plastifizieren - das Material wird im Extruder durch die mit der Schneckenrotation oder über eine Heizvorrichtung eingetragene Energie erwärmt und aufgeschmolzen. Wichtig ist hierbei, wie auch bei den nachfolgenden Verfahrensschritten, dass der Kunststoff nicht zu stark durch Hitze oder Scherung belastet wird, um den Abbau der Polymerstruktur zu minimieren.
- ▶ Homogenisieren - innerhalb des Extruders findet eine weitere Homogenisierung des jetzt flüssigen Materials statt. Dies wird durch eine geeignete Geometrie der Extruderschnecke(n) erreicht.
- ▶ Entgasen - sollen leichtflüchtige Verunreinigungen oder während der Verarbeitung entstandene Abbauprodukte aus dem Material entfernt werden, kann dies durch eine Entgasung realisiert werden. Die Schmelze wird dafür innerhalb des Extruders einem Vakuum von bis zu wenigen mbar ausgesetzt und so die flüchtigen Bestandteile abgesaugt. Einen anderen Ansatz verfolgt die Schleppmittelentgasung, bei der vergleichsweise leicht flüchtige Stoffe, wie z. B. überkritisches CO₂, zudosiert werden. Werden diese Schleppmittel dann der Schmelze entzogen, werden dabei auch andere leicht flüchtige Substanzen „mitgerissen“. Die Entgasung wird insbesondere für die Entfernung von Gerüchen verwendet.
- ▶ Schmelzfiltration - um nichtflüchtige, nicht-aufschmelzbare Verunreinigungen, wie Metalle, Elastomere oder mineralische Partikel, zu entfernen, wird die Schmelze innerhalb des Extruders filtriert. Dazu wird sie durch ein Sieb mit Maschenweiten im Bereich weniger Hundert µm gepresst. Die abfiltrierten Verunreinigungen werden verworfen und entsorgt. Dieser Prozessschritt verbessert die Verarbeitbarkeit des Recyclingkunststoffes und verringert die durch Verunreinigung hervorgerufenen Prozessschwankungen.

- ▶ Zudosieren - um das Eigenschaftsprofil des Recyclingkunststoffes gezielt zu beeinflussen, werden Additive oder Füllstoffe zudosiert. Die Stoffe können, wie in der Polymertechnik üblich, als Flüssigkeit, Feststoff oder Masterbatch zudosiert werden. Es kommen z. B. Stabilisatoren, Weichmacher oder Farbstoffe zum Einsatz.
- ▶ Granulieren - nachdem das Material den Extruder durchlaufen hat, wird es extrudiert und der Strang durch den Granulator in Granulat geschnitten. Je nach Kunststoff und benötigten Granulateigenschaften kommen hier verschiedene Verfahren zum Einsatz. Wird mit Hilfe von Wasser granuliert, muss das Granulat in einem nachgeschalteten Prozessschritt getrocknet werden.

4.3.4 Werkstoffliches Recycling der für die Baubranche wichtigsten Kunststoffe

Beim werkstofflichen Recycling werden aus den Abfällen durch physikalische Prozesse Sekundärkunststoffe gewonnen, ohne die Polymerstruktur zu zerstören. Es wird zunächst das mechanische Recycling von thermoplastischen Kunststoffen beschrieben. Das werkstoffliche Recycling ist für alle thermoplastischen Werkstoffe ähnlich. Der schon beschriebenen Sortierung und Reinigung und Recompoundierung folgt die Verarbeitung zu neuen Werkstücken. Je reiner dabei der aus der Sortierung erhaltene Stoffstrom ist, desto einfacher und zuverlässiger lassen sich gewünschte Materialeigenschaften erzielen. Nicht alle technisch möglichen Sortierungs- und Reinigungsschritte sind auch wirtschaftlich darstellbar. So wird der Aufwand zur Sortierung maßgeblich vom Wert der dadurch erhaltenen Kunststofffraktionen bestimmt.

Im Folgenden werden die Recyclingverfahren, vom vorsortierten Material bis zum Regranulat für die mengenmäßig relevantesten Kunststoffe im Baubereich beschrieben.

4.3.4.1 Recycling von Polyvinylchlorid

PVC-U und PVC-P werden getrennt voneinander werkstofflich recycelt. Das Recycling wird dabei maßgeblich durch den Branchenverband AGPU vorangetrieben und ermöglicht. Im Baubereich spielen hier auch die produktspezifischen Rücknahmesysteme eine entscheidende Rolle, vgl. Kapitel 3. PVC-U aus Rohren und Profilen wird dabei hochwertig recycelt. Diese Produkte machen etwa 75 % der verbauten PVC-Menge aus. Hierzu werden die geschredderten, sortierten, gereinigten und vermahlenen Abfälle recompoundiert, wie im Abschnitt 4.3.3 beschrieben. Die PVC-U Regranulate können für den Einsatz in Rohren, Profilen oder anderen Anwendungen wiederverwendet werden. Für die Herstellung von Produkten aus PVC-U Rezyklaten existieren verschiedene Normen (Europäisches Komitee für Normung 2019), (Europäisches Komitee für Normung 2013) Die Charakterisierung des PVC-U und PVC-P Rezyklates ist genormt in EN 15346 (Europäisches Komitee für Normung 2015).

PVC-P kann mit dem gleichen Verfahren werkstofflich recycelt werden. Aufgrund der elastischen Verformung von PVC-P ist dieses schwerer zu vermahlen, weshalb der Werkstoff teilweise kaltvermahlen wird, was auch die Trennung von Verbundstoffen erleichtert³. PVC-P kann im industriellen Maßstab hochwertig recycelt werden. Einen anderen Ansatz verfolgt das Vinyloop-Verfahren, bei dem PVC-P mit einem auf Butanon basierenden Lösemittelgemisch aufgereinigt wird. Das Verfahren kommt aber aufgrund der verbleibenden reproduktionstoxischen DEHP-Mengen im Recyclingmaterial in Europa nicht zum Einsatz (Europäische Kommission 2011a; Plastech 2018).

³ Ein Abkühlen von PVC-P bringt das Material unter die Glasübergangstemperatur. Dadurch nimmt die Schlagzähigkeit extrem ab und das PVC-P wird durch den Mahlprozess zerkleinert statt nur "geknetet" und erwärmt zu werden.

4.3.4.2 Recycling von Polyethylen

Die Bezeichnung Polyethylen fasst mehrere Kunststofftypen zusammen, die zwar chemisch ähnlich sind, sich aber in ihren Materialeigenschaften deutlich unterscheiden. Es sind vor allem PE-HD, PE-LD, PE-LLD und ultrahochmolekulares Polyethylen (ultra high molecular weight polyethylene - PE-UHMW). Die Makromoleküle unterscheiden sich zum einen in der Länge der Polymerketten, zum anderen in ihrer Verzweigung. Diese zwei Parameter beeinflussen wiederum das Kristallisationsverhalten, was zu unterschiedlichen Materialeigenschaften, wie z. B. Zugfestigkeit, Reißdehnung oder Schlagzähigkeit führt. Relevant für den Baubereich sind PE-HD für den Einsatz in Rohren, Profilen und Behältern, sowie PE-LD und PE-LLD für Folien. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Materialeigenschaften ist ein gemeinsames Recycling der verschiedenen PE-Typen nicht sinnvoll. Sowohl PE-HD-Abfälle als auch PE-LD- und PE-LLD-Abfälle fallen im Verpackungssektor in großen Mengen an. Sie sind als thermoplastische Werkstoffe technisch einfach zu recyceln, die Verfahren hierzu sind großskalig etabliert. Allerdings treten die Rezyklatkunststoffe in den Wettbewerb mit der vergleichsweise günstigen Neuware.

Sortenreines, und gereinigtes PE wird typischerweise als Mahlgut, Flakes oder Granulat geliefert und sollte frei von makroskopischen Verunreinigungen wie Metallstücken oder Papier sein. Das Ausgangsmaterial wird dann recompoundiert, vgl. Abschnitt 4.3.3, und als Regranulat an die Kunststoffverarbeiter geliefert. Auch Mischungen aus PE und PP werden unter der Bezeichnung Polyolefin als Recyclingkunststoff angeboten. Die Verfahren zur Charakterisierung der Rezyklateigenschaften sind in DIN prEN 15344:2020 festgelegt (Europäisches Komitee für Normung o. J.) auch für die Verwendung in Rohren existieren Normvorgaben (Europäisches Komitee für Normung 2013).

4.3.4.3 Recycling von Polypropylen

Polypropylen kann in verschiedenen Taktizitäten⁴ und als PE-Copolymer polymerisiert werden. Für die Baubranche relevant ist vor allem das isotaktische Polypropylen-Homopolymer. Hieraus werden für die Baubranche vor allem Rohre und Fasern hergestellt, es kommt aber mit entsprechender Schmelzflussrate auch für die Blasfolienextrusion zum Einsatz. Polypropylen ist gut im Standardverfahren für Thermoplaste recycelbar. Im Verpackungsmittelrecycling des Dualen Systems werden dementsprechend große Mengen hochwertig recycelt. Im Bereich der Bauabfälle wird PP aus Rohren getrennt gesammelt und recycled, andere PP Abfälle gehen in die Stoffströme der Entsorger. Bei entsprechender Reinheit erreichen die Rezyklate annähernd das Qualitätsniveau von Neuware. Auch hier ist die Charakterisierung von Rezyklaten sowie die Verwendung in Rohren genormt (Europäisches Komitee für Normung 2007), (Europäisches Komitee für Normung 2013).

4.3.4.4 Recycling von Polystyrol

In der Baubranche mengenmäßig relevant ist vor allem geschäumtes Polystyrol in Form von Dämmstoffen, wobei je nach Herstellungsverfahren zwischen expandiertem Polystyrol (EPS) und extrudiertem Polystyrol (XPS) unterschieden wird. Zur EPS-Herstellung wird Pentan als Treibmittel einpolymerisiert, das Granulat durch Temperaturerhöhung aufgeschäumt und die entstehenden Perlen in einem zweiten Temperaturschritt mit Wasserdampf miteinander verschmolzen. Anschließend wird das Material etwa zu Dämmstoffplatten zugeschnitten

⁴ Da für jeden Methylrest in der Polypropylen Kette zwei verschiedene räumliche Anordnungen möglich sind kann sich das Polymer in der Anordnung eben dieser Methylreste unterscheiden. Während in ataktischem PP die Methylrest statistisch verteilt angeordnet sind, liegt im isotaktischem PP eine geordnete Ausrichtung vor. Die Taktizität hängt von dem für die Herstellung verwendeten Katalysator ab.

(Plastverarbeiter 2020). XPS wird mit CO₂ als Treibmittel durch eine Breitschlitzdüse zu Platten extrudiert und dann zugeschnitten. Im Baubereich sind noch andere Polystyrol-Copolymere in Verwendung, allerdings für ein Recycling nicht mengenmäßig relevant. So wird zum Beispiel das elastomere Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) in Bodenbelägen verwendet und die thermoplastischen PS-Copolymer Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Styrol-Acrylnitril (SAN) in verschiedenen Produkten zum Einsatz gebracht.

Polystyrol ist prinzipiell als thermoplastischer Werkstoff gut recyclebar (Maharana u. a. 2007) und auch die Verwendung von geschreddertem geschäumtem Polystyrol z. B. als Hohlraumdämmung oder Leichtzuschlag in Estrichen ist eine Möglichkeit des werkstofflichen Recyclings (Rybol Dämmstoffe 2020). Ein hochwertiges Recycling ist also technisch möglich, die Charakterisierung von Rezyklaten ist in EN 15342 festgelegt (Europäisches Komitee für Normung 2008). Das hochwertige Recycling findet aber abseits des Recyclings von Produktionsresten, sowie Baustellenabfällen in der Baubranche noch nicht statt. Der unwirtschaftliche Rückbau, die Schadstoffbelastung und die langen Produktnutzungszeiten von Dämmstoffen sind hier die größten Hürden.

4.3.4.5 Recycling von Polyamid

Polyamide bezeichnen eine ganze Stoffklasse von Polymeren mit Amidbindungen in der Hauptkette. Meist wird die Bezeichnung allerdings für die auch als Baustoffe eingesetzten Kunststoffe Polycaprolactam (PA6) oder das Kondensationsprodukt aus Hexamethyldiamin und Adipinsäure (PA66) verwendet, oft als faserverstärkter Werkstoff. Beide sind sich in ihren Eigenschaften ähnlich (Lanxess 2009). In größeren Mengen wird PA im Baubereich vor allem für textile Bodenbeläge verwendet. Auch in Beschlägen und diversen Kleinstanwendungen mit hoher mechanischer Beanspruchung, wie z. B. Dübeln, wird PA verwendet. Für das Recycling kommen mengenmäßig nur Abfälle aus textilen Bodenbelägen in Frage. Ein großskaliges, hochwertiges, allerdings chemisches, Recycling wird für PA6 aus textilen Bodenbelägen als industrieller Prozess durchgeführt.

4.3.4.6 Recycling von Polyurethan

Polyurethan (PUR) ist zwar eine Kunststoffbezeichnung, aber chemisch und bezüglich seiner Eigenschaften sehr heterogen. PUR wird aus einer Polyol-Komponente und Isocyanat hergestellt. Das Isocyanat wirkt dabei als Brücke zwischen den Polyolen. Das Polyol selbst kann dabei aus verschiedensten Polymeren, wie z. B. synthetischen Polyesterpolyolen, Polyetherpolyolen oder in Nischen auch aus natürlichen oder biobasierten Polyolen, wie z. B. Rizinusöl bestehen. Dessen Eigenschaften bestimmen zu einem Großteil die des späteren PUR. Der mengenmäßig relevante Stoffstrom im Baubereich ist die Herstellung von geschlossenzelligem Hartschaum als Dämmstoff. Weitere Verwendungen im Baubereich sind Kabelisolierungen und Rohre. Außerdem, aber für das Recycling irrelevant, wird es in Lacken, als Gussboden und als schützende oder elastische Schicht in Multilayerböden verwendet.

Polyurethane können auch als thermoplastische, elastomere Werkstoffe verwendet werden, sogenanntes thermoplastisches Polyurethan (TPU). Das im Baubereich als Kabelisolierungen verwendete PUR gehört in diese Gruppe. Ein werkstoffliches Recycling ist hierfür, mit Ausnahme von Produktionsabfällen, allerdings nicht bekannt.

Das in Dämmstoffen verwendete Polyurethan kann als Duroplast werkstofflich nicht im Kreis geführt und zum gleichen Produkt recycelt werden. Der übliche Recyclingweg ist hier das Mahlen und die Verwendung in Pressplatten.

4.3.4.7 Recycling von Bitumen

Bitumen fällt als nichtflüchtiger Rückstand bei der Destillation bestimmter Erdölsorten an. Es besteht aus Kohlenwasserstoffen verschiedenen Molekulargewichts, die ihm seinen hydrophoben Charakter verleihen (Europäisches Komitee für Normung 2014). Bitumen kommt im Baubereich in Form von Abdichtungsmitteln wie Dachbahnen zum Einsatz, auch im Verbund mit Polymeren. Bitumenhaltige Bau- und Abbruchabfälle werden überwiegend thermisch verwertet. Es gibt jedoch bereits erste Ansätze einer werkstofflichen Verwertung, etwa von bitumenhaltiger Dachpappe zum Einsatz im Straßenbau. (DD/H - Das Dachdecker-Handwerk 2019; Deilmann u. a. 2017)

4.4 Bauproduktspezifische Recyclingverfahren

4.4.1 Rohre

Kunststoffrohre aus PE, PP oder PVC lassen sich werkstofflich recyceln. Produktionsabfälle werden geschreddert, extrudiert und zu Regranulat verarbeitet, das erneut der Produktion zugeführt wird (Heinzlreiter 2016). Für Baustellenabfälle und nach der Nutzung rückgebaute Rohrsysteme ist ein freiwilliges Rücknahmesystem in Betrieb (vgl. Kapitel 3).

Die Rohrabfälle werden zunächst nach Werkstoffen sortiert und händisch aufbereitet. Dabei werden Fremdmaterialien und Verunreinigungen wie Abdichtungs- und Befestigungsmaterial, Verbindungsstücke, Etiketten und Schmutz entfernt (Seki und Yoshioka 2017). Die Rohre werden anschließend zu Mahlgut mit einer Größe von 8 bis 12 mm zerkleinert und durch Windsichtung von Störstoffen befreit. Die durch Recompoundierung (vgl. Abschnitt 4.3.3) gewonnenen Rezyklate werden erneut zur Produktion von Rohren eingesetzt, allerdings auf einem niedrigeren Anforderungsniveau. So kommen die Rezyklate etwa in Abwasser-, Kabelschutz- und Dränrohren zum Einsatz (KRV 2015).

Materialeigenschaften und Prüfverfahren für den Einsatz von Rezyklaten in Rohren werden durch die Norm (Europäisches Komitee für Normung 2013) spezifiziert. Chemische Recyclingverfahren sind hier in der Entwicklung, jedoch noch nicht marktfähig (KRV 2015).

4.4.2 Fenster-, Rollläden- und Türprofile

Fenster- Rollläden- und Türprofile können, wie in Kapitel 3 schon erwähnt, gut recycelt werden. Ursache hierfür ist unter anderem auch der reine Materialstrom aus deren Sammlung, sowie die gute Rückbaubarkeit. Die gesammelten Altprodukte werden grob vorsortiert und dann im Ganzen geschreddert, FE- und NFE Metalle, sowie Glas und Mörtelreste werden abgetrennt. Die so erhaltene Kunststofffraktion wird mit einer Schneidmühle auf Korngrößen ≤ 20 mm zerkleinert und dann gewaschen. Nach dem Trocknen wird das Mahlgut farbsortiert und enthaltene Dichtungsreste werden aussortiert. Abschließend wird das Material durch eine Extrusion mit Schmelzfiltration regranuliert (vgl. 4.3.3 Recompoundierung) (Rewindo 2020b). Das Rezyklate wird als Kern im Nichtsichtbereich von neuen Profilen eingesetzt (vgl. Kapitel 5).

4.4.3 Dämmstoffe

Die Voraussetzungen des werkstofflichen Recyclings von Dämmstoff-Abfällen unterscheiden sich stark nach der Wertschöpfungsstufe, auf der sie anfallen. Die bei der Produktion anfallenden Abfälle sind sortenrein, unverschmutzt, von bekannter und homogener Additivierung und können ohne großen logistischen Aufwand zwischengelagert und erneut der Produktion zugeführt werden. Daher ist dort ein Recycling gut möglich und bereits etabliert. Unverschmutzte, sortenreine Baustellenzuschnitte werden zum Teil von den Herstellern zurückgenommen, sofern ein entsprechendes Logistikkonzept vorliegt, sodass hier ein Recycling

ebenfalls möglich ist. Bei Sanierungs- und Abbrucharbeiten anfallende Dämmstoff-Abfälle sind in der Regel durch anhaftende Klebstoffe, Mörtel, Putz, Anstriche und Befestigungsmaterial stark verunreinigt und werden nicht sortenrein erfasst. Selektive Rückbauverfahren, die eine Trennung der Materialverbünde direkt an der Anfallstelle ermöglichen, erwiesen sich zwar in Versuchen als technisch möglich. Die werkstoffliche Verwertung ist jedoch aufgrund der hohen Logistik- und Reinigungskosten unwirtschaftlich, sodass die Abfälle in der Regel thermisch verwertet werden (Albrecht 2019).

Die für Dämmstoffe vorwiegend eingesetzten Kunststoffsorten sind EPS, XPS und PUR. Produktionsabfälle sowie sortenreine und saubere Verschnittabfälle aus EPS können mit Rezyklatanteilen von 5 % für Fassadendämmplatten bis hin zu 30 % für Fußboden- oder Flachdach-Dämmplatten erneut zur Produktion eingesetzt werden. Dazu werden die Abfälle vermahlen, entstaubt und die freigesetzten Schaumperlen zusammen mit Perlen aus Neumaterial mit Wasserdampf verschweißt. Nach dem gleichen Verfahren können Baustellenabfälle recycelt werden, wobei zuvor eine Reinigung von groben Verunreinigungen erfolgt. Hier werden Rezyklatanteile bis 100 % erzielt, jedoch werden die für eine Fassadendämmung erforderlichen Qualitäten noch nicht erreicht, sodass in diesem Bereich aktuell ein Downcycling vorliegt. (Albrecht 2019)

Auch bei XPS-Dämmstoffen können Produktionsabfälle hochwertig recycelt werden. Rezyklatanteile im zweistelligen Prozentbereich bei gleichwertiger Qualität sind möglich. Die Abfälle werden zerkleinert, gesiebt, entstaubt und erneut dem Extruder zugeführt. Baustellenabfälle können theoretisch auf die gleiche Weise recycelt werden, was allerdings aufgrund der starken Verunreinigungen und einer fehlenden Sammellogistik in der Praxis nicht geschieht. Bei Sanierungs- und Abbruchabfällen kommen aktuell noch geringe Mengenströme als weiteres Hindernis hinzu, sodass auch hier die thermische Verwertung vorherrscht (Albrecht 2019).

Sowohl für EPS als auch für XPS ist der Gehalt des inzwischen als teratogen eingestuftes Flamschutzmittels HBCD in verbauten Altbeständen ein Problem, siehe hierzu auch Kapitel 4.2. Verfahren zur Schadstoffentfrachtung existieren, sind aber bedeutend aufwendiger als das normale Recycling. Hier könnte das lösungsmittelbasierte Verfahren CreaSolv® eine Rolle spielen (Creacycle 2020).

Dämmstoffe aus PUR können aufgrund der duroplastischen Eigenschaft nicht in einem geschlossenen Kreislauf recycelt werden. Produktionsabfälle können jedoch werkstofflich verwertet werden und erneut als Dämmstoff - wenn auch von geringerer Qualität - eingesetzt werden. Eine gängige Verwertungsoption ist die Verpressung zu Recycling-Platten unter Zugabe von Klebstoffen. Auch eine Zerkleinerung zu Flocken, die als Einblasdämmstoff genutzt werden, ist möglich. Sanierungs- und Rückbau-Abfälle werden aufgrund der Verschmutzungen in der Regel thermisch verwertet (Albrecht 2019).

Da die Rückbaumengen von Dämmstoffen noch relativ gering sind, jedoch in den kommenden Jahrzehnten steigen werden (Deilmann u. a. 2017), wird die Relevanz eines hochwertigen Recyclings zunehmen. Ebenso kann davon ausgegangen werden, dass durch Skaleneffekte die Errichtung und der Betrieb von geeigneten Recycling-Infrastrukturen wirtschaftlich attraktiver wird. In Hinblick auf Verunreinigungen mit Schad- und Störstoffen kann auch die weitere Entwicklung alternativer Recyclingverfahren, wie das in der Erprobungsphase befindliche, lösemittelbasierte CreaSolv®-Verfahren für EPS- und XPS-Dämmstoffe oder neuer Verfahren zur Lösung von Materialverbunden von Bedeutung sein (ebd.).

4.4.4 PVC-Bodenbeläge

Durch das freiwillige Rücknahmesystem von PVC-Bodenbelägen (vgl. Kapitel 3) bestehen gute Voraussetzungen für die werkstoffliche Verwertung. Da das Recycling nur möglich ist, wenn sowohl Nutz- und Trägerschicht ausschließlich aus PVC bestehen, ist jedoch eine entsprechende Sortierung der Abfälle erforderlich (Krauß und Werner 2014).

Die vorsortierten PVC-Bodenbeläge werden zunächst in bis zu 30 mm große Chips zerkleinert. Nach einer Magnetabscheidung werden Estrich- und Klebstoffreste mit Hilfe einer Hammermühle und anschließender Siebung entfernt. Bei einer Temperatur von minus 40 °C werden die Chips nochmals auf Korngrößen von 400 µm fein vermahlen. PVC-Bodenbeläge, die mit Kunststofffolien oder Geweben aus anderen Plastiksorten überzogen sind, erfordern zusätzliche Prozessschritte (AGPR o. J.; Krauß und Werner 2014).

Die Rezyklate werden primär für die Herstellung neuer PVC-Bodenbeläge eingesetzt, da sie spezifische Additive und Füllstoffe enthalten (Krauß und Werner 2014). Eine erneute Zugabe von Weichmachern ist in der Regel nicht erforderlich (Yarahmadi u. a. 2003). Aufgrund der verminderten Farbqualität werden die Rezyklate nur in nach außen hin unsichtbaren Schichten verwendet (Deilmann u. a. 2017).

Mit Hinblick auf die Recyclingfähigkeit von PVC-Bodenbelägen wird von einem Verkleben auf frischem Beton abgeraten, da dies zu einem unerwünschten Abbau der enthaltenen Weichmacher führt (Yarahmadi u. a. 2003). Zur Verwertung von Bodenbelägen, die mit nicht mehr zugelassenen Weichmachern belastet sind, wird die Anwendbarkeit von lösungsmittelbasierten Verfahren erforscht (Recycling Magazin 2019).

4.4.5 Kabelisolierungen

Der für Kabelisolierungen meistverwendete Kunststoff ist mit einem Marktanteil von 53 % PVC (AGPU 2019), je nach Anwendung werden aber auch verschiedene andere Thermoplaste, thermoplastische Elastomere oder vernetzte Thermoplaste verwendet. Die Kabel sind nach DIN EN 60445 bzw. VDE 0197 gekennzeichnet, wobei auch die für Isolator- und Mantelmaterial verwendeten Kunststoffe angegeben werden. Kabel werden unter dem Abfallschlüssel 170411 geführt sofern sie keine gefährlichen Stoffe enthalten. Die Unterkategorie 1704 steht für metallhaltige Abfälle, auch Glasfaserkabel fallen darunter obwohl sie kein Metall enthalten. Prinzipiell werden Kabel hauptsächlich wegen der enthaltenen Metalle (Kupfer, Aluminium) recycelt. Allerdings werden sie deswegen auch getrennt gesammelt, was Potenzial für das Kunststoffrecycling birgt. Das Recycling von Produktionsabfällen ist gut möglich, auch Fraktionen aus dem Schälen dickerer Kabel können sortenrein gesammelt und dann aufbereitet werden. Kunststoffreste aus dem automatisierten Recyclingprozess fallen dagegen als gemischte Fraktion an. Dieser Recyclingprozess beginnt mit dem groben Schreddern der Kabel. Danach werden FE-Metall Armierungen über Metallabscheider abgetrennt. Es folgt eine Zerkleinerung mit Hilfe von Schneidmühlen und gegebenenfalls Prallmühlen zum Aufschluss feiner Litzen. Das erhaltene Mahlgut wird auf einem Trenntisch getrennt (Hosokawa Alpine 2016; Recovery 2020). Das erhaltene PVC-Mahlgut kann dann im nächsten Schritt recompoundiert und recycelt werden. Die Rezyklate werden jedoch nur für minderwertige Anwendungen wie Bakenfüße, Leitschwellen oder Rasengitterelemente eingesetzt (Plasticker 2010). Der auf die Verwertung von Metallen ausgerichtete Prozess trägt offenbar keine ausreichend sortenreinen Kunststofffraktionen aus, die für ein hochwertiges Recycling erforderlich sind.

Ein Versuch zum lösungsmittelbasierten Recycling, das sogenannte Vinylloop-Verfahren konnte sich nicht durchsetzen, die Produktionsstätte wurde geschlossen (Plastech 2018).

4.4.6 Textile Bodenbeläge

Teppichböden bestehen aus mehreren Schichten, für die unterschiedliche Materialien zum Einsatz kommen. Die Nutzschicht besteht zumeist aus synthetischen Fasern, überwiegend aus PA (40 %), PP (25 %) und PET (15 %) (EU-Recycling 2019). Diese wird mit einem Klebstoffschicht und einer Zwischenschicht auf einer wiederum beschichteten Rückenschicht befestigt. Die größten Gewichtsanteile machen mit jeweils rund 45 % die Nutzschicht und die Klebstoffschicht aus (Sotayo u. a. 2015). Für die jeweiligen Schichten werden verschiedenste thermoplastische oder elastomere Kunststoffe eingesetzt (Deutsche Umwelthilfe 2017).

Die Komplexität des Teppichaufbaus und die Vielfalt der eingesetzten Materialien stellen schwierige Ausgangsbedingungen für das Recycling dar. Erschwerend kommen zum Teil vernetzte oder schlecht trennbare Klebeverbindungen hinzu. Beim Einsatz von Mischfasern ist oft nur ein Downcycling möglich. Des Weiteren hat die Schadstoffbelastung, die Verunreinigung, etwa durch Klebstoffreste, und die Abnutzung Einfluss auf die Qualität der recycelten Fasern. Auf logistischer Ebene fehlen zudem in Deutschland flächendeckende Sammelsysteme bzw. ein branchenweites Rücknahmesystem (vgl. Kapitel 3), sowie große Recyclinganlagen für Post-Consumer-Teppiche. Entsprechend wird der überwiegende Anteil der Altteppiche derzeit verbrannt bzw. thermisch verwertet (Deutsche Umwelthilfe 2017).

Das Recycling von Teppichfasern aus PA6, PA66, PET und PP ist technisch möglich, derzeit allerdings nur für PA6 kostendeckend umsetzbar (Deutsche Umwelthilfe 2017). Die durch chemische Verfahren gewonnenen Rezyklate können erneut zu Teppichfasern verarbeitet werden (Sotayo u. a. 2015). Darüber hinaus ist ein werkstoffliches Recycling durch Schreddern und Extrusion der Teppichabfälle möglich, was allerdings aufgrund der Durchmischung verschiedener, zum Teil inkompatibler, Kunststoffsorten zu schlechten mechanischen Eigenschaften führt (ebd.). Daher ist hier nur ein Downcycling, etwa zu Teppichrückseiten oder technischen Kunststoffen möglich (Deutsche Umwelthilfe 2017).

Ein konsequentes Design-for-Recycling könnte aus Sicht der Autoren in diesem Sektor das werkstoffliche Recycling erleichtern, zumal der einfache Rückbau und die getrennte Sammlung der Produkte möglich sind.

4.5 Recycling von GFK

4.5.1 Eigenschaften von GFK

Faserverstärkte Kunststoffe werden heute zunehmend eingesetzt. Die am häufigsten eingesetzten Fasern sind Glasfasern, daneben kommen Kohlenstoff-, Basalt-, Aramid- und Naturfasern zum Einsatz. Im Rahmen dieses Projektes werden jedoch aufgrund der Relevanz für den Bereich des Bauens nur glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) betrachtet. Kunststoffe mit anderen Verstärkungsfasern bleiben unberücksichtigt.

Die einzelnen Glasfasern haben einen Durchmesser von 7–13 µm und werden zu Spinnfäden zusammengefasst. Aus diesen werden dann die Stränge, Gewebe oder Matten (aus geschnittenen unregelmäßig angeordneten Fasern) zur Verstärkung hergestellt (Hornbogen u. a. 2019). Daneben kommen auch geschnittene oder gemahlene kurze Fasern zum Einsatz.

Glasfaserverstärkte Kunststoffe werden aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften (Anpassung der Eigenschaften an die Belastungsrichtung, hohe Festigkeit, hohe Steifigkeit, geringe Kriechneigung etc.) und der Möglichkeit, ihre Eigenschaften gezielt anzupassen, in großen und zunehmenden Mengen im Bau-, Transport- und Automobilsektor eingesetzt. Dabei gelten GFK als nicht-rezyklierbar. Dies liegt daran, dass viele GFK mit duroplastischen Harzen hergestellt

werden, die nicht thermoplastisch verformbar sind, aber auch daran, dass die Materialverbunde komplex sind, die eindeutige Identifikation schwerfällt und der Stoffmengenanfall der einzelnen GFK gering und diskontinuierlich ist. Die Probleme beim Recycling von GFK sind daher sowohl stofflicher als auch organisatorischer Natur. Daher ist die Verbrennung das Standardverfahren für die Behandlung dieser sporadisch auftretenden Bau- und Abbruchabfälle (Rybicka u. a. 2016).

Die Mehrzahl der GFK wird aus duroplastischen Kunststoffen hergestellt. Hierbei werden insbesondere ungesättigte Polyesterharze und Epoxidharze als Gießharze eingesetzt (Maier/Schiller 2016). In ihnen werden Stränge, Gewebe und Matten eingesetzt, um die Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit zu erhöhen und die Längenausdehnung zu reduzieren (Hornbogen u. a. 2019).

Zunehmend kommen jedoch auch thermoplastische Kunststoffe zum Einsatz. Aufgrund der Verarbeitung in Extrudern und Spritzgießmaschinen kommt vorrangig der Einsatz sehr kurzer Fasern in Frage. Bei so genannten Pultrusionsverfahren werden inzwischen auch Langfasern oder Gewebe in einem kontinuierlichen Verfahren gemeinsam mit extrudiertem thermoplastischem Kunststoff verarbeitet.

Glasfasern sind kein einheitlicher Werkstoff, sowohl hinsichtlich der eingesetzten Harze als auch der Fasern gibt es erhebliche Unterschiede. Auch die Art, wie sie eingesetzt werden, unterscheidet sich. Beide Aspekte haben einen Einfluss auf die Eigenschaften der GFK aber auch auf das mögliche Recycling. Das Glas, aus dem die Verstärkungsfasern hergestellt sind, beeinflusst die Eigenschaften des Kompositwerkstoffs ebenfalls. Daher sind unterschiedliche Qualitäten der Verstärkungsfasern im Handel (Flemming u. a. 1995; Chokri 2011). Die unterschiedlichen Glasfasern unterscheiden sich hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften, insbesondere aber in Hinblick auf ihre chemische Beständigkeit. Es wird zwischen den folgenden relevanten Glasfasern unterschieden (Illig u. a. 1983):

- ▶ A-Glas ist ein alkalireiches (> 8 %) Alkali-Kalk-Glas. Es hat keine hohe chemische Beständigkeit und wird (oder wurde) insbesondere dort eingesetzt, wo keine hohen Güteanforderungen bestehen. Es hat nur noch eine geringe Bedeutung, kann aber in alten Produkten vorhanden sein.
- ▶ E-Glas (E = Electric) ist ein Aluminiumborsilikat-Glas mit i.d.R. weniger als 1 % Alkalioxiden. Es gilt als Standardglas für Faser für allgemeine Kunststoffverstärkungen und aufgrund der geringen Leitfähigkeit auch für elektrische Anwendungen. Es wird jedoch in basischer und saurer Umgebung angegriffen. Es hat einen Anteil von ca. 90 % des Marktes.
- ▶ S-Glas (S = Strength) ist Aluminiumsilikat-Glas mit Zusätzen von Magnesiumoxid. S-Glas ist ein Spezialglas mit hohem Elastizitätsmodul (E-Modul) und hoher Festigkeit für hochwertige Verstärkung von GFK.
- ▶ R-Glas (R = Résistance) ist ein Aluminiumsilikat-Glas mit Zusätzen von Calcium- und Magnesiumoxid. R-Glas ist ein Spezialglas für hohe mechanische Anforderungen und hohe Temperaturen.
- ▶ M-Glas (M = Modulus) ist ein berylliumhaltiges Glas. Die Faser haben ein erhöhtes E-Modul. Es wird für Anwendung mit höchsten mechanischen Anforderungen und erhöhter Steifigkeit eingesetzt.
- ▶ C-Glas (C = Chemical) ist ein alkaliarmes Glas mit erhöhter chemischer Widerstandsfähigkeit.

- ECR-Glas (E-Glass Corrosion Resistant) ist ein E-Glas Faser mit besonders hoher Korrosionsbeständigkeit.
- D-Glas (D = Dielectric) ist ein Glas mit niedrigem dielektrischen Verlustfaktor, z. B. für die Radome einer Radarstation.

Auch innerhalb der jeweiligen Typen von Gläsern kann es noch beträchtliche Unterschiede in der Glaszusammensetzung geben. Einige typische Zusammensetzungen finden sich in der Tabelle 6. Neben der Zusammensetzung der Glasfasern lassen sie sich noch in Glasfilamente und Stapelfasern unterteilen (Pfaender 1989).

Tabelle 6: Zusammensetzung von Gläsern für Glasfasern (v. Kamptz 1991)

Glasart	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	Na ₂ O [%]	MgO [%]	K ₂ O [%]	B ₂ O ₃ [%]
E-Glas	55,2	14,8	0,3	18,7	0,3	3,3	0,2	7,3
E-Glas	52-56	12-16	Spuren	16-25	Spuren	0-5	Spuren	5–10
E-Glas (De Jong et al. 2007)	54	14		20	<0,5	4,5	<0,5	<10
C-Glas	72	2,5	0,5	9	12,5	0,9	1,5	0,5
C-Glas	65	4		14	8	3	0,5	5,5
S-Glas	65	25				10		

4.5.2 Recycling

Obwohl GFK schon seit langer Zeit hergestellt und eingesetzt werden, bereitet das Recycling dieser Werkstoffe noch erhebliche Probleme. Der wesentliche Grund dafür liegt in der schlechten Trennbarkeit der Glasfasern von den eingesetzten Kunststoffen und darin, dass überwiegend duroplastische Kunststoffe in GFK eingesetzt werden. Ein werkstoffliches Recycling des kompletten Werkstoffs ist daher für verstärkte Duroplaste bisher praktisch unmöglich. Bei verstärkten Thermoplasten besteht hingegen grundsätzlich die Möglichkeit eines werkstofflichen Recyclings und wird z. B. für Produktionsabfälle bereits praktiziert (Ribeiro u. a. 2011). Das gilt insbesondere dann, wenn die Thermoplaste mit sehr kurzen Glasfasern verstärkt wurden. Diese lassen sich grundsätzlich erneut extrudieren. Hierbei kann es jedoch neben der thermischen Belastung der Thermoplaste, die mit einer Degeneration, d. h. einer Verkürzung der Polymerketten dieser Kunststoffe verbunden sein kann, auch zu einer Beschädigung der Verstärkungsfasern kommen. Damit können sich die mechanischen Eigenschaften dieser Werkstoffe gegebenenfalls deutlich ändern.

Auch das chemische Recycling von GFK stößt an Grenzen. Es wurden bereits unterschiedlichste Prozesse untersucht, eine Umsetzung erfolgte jedoch bislang nicht. Auch Studien zum Einsatz von Pyrolyse zur Rückgewinnung von Glasfasern wurden bereits Anfang der 2000er Jahre durchgeführt. Neben den Glasfasern können dabei auch Öle und Gase erzeugt und als Brennstoff oder als Rohstoff für die chemische Industrie zurückgewonnen werden. Jedoch wurden erarbeitete Konzepte nicht umgesetzt (Job 2013). Bisher standen Verfahren des chemischen Recyclings sowohl ökonomisch als auch ökologisch insbesondere in Konkurrenz zur thermischen Nutzung. Problematisch ist bisher der hohe Energieaufwand für derartige Prozesse, aber auch die Prozessführung. GFK bringen aufgrund der enthaltenen Mengen an Glasfasern erhebliche Mengen an inertem Material in die Verfahren des chemischen Recyclings und

reduzieren die Effizienz der Prozesse. Das wirkt sich sowohl in Hinblick auf die Energieeffizienz als auch auf die Mengen zurückzugewinnenden organischen Verbindungen negativ aus. Recyclingstrategien für GFK verfolgen daher in der Regel andere Wege.

4.5.2.1 Mechanisches Recycling von GFK

Ein Recycling der Glasfasern stellt eine erhebliche Herausforderung dar, da bei einer mechanischen Aufbereitung keine saubere Trennung von der Kunststoffmatrix möglich ist und bei einer thermischen Behandlung die Fasern i.d.R. stark geschädigt werden. Daher gibt es Versuche, alternative Pyrolyseverfahren anzuwenden. Eines dieser Verfahren stellt die Mikrowellenpyrolyse dar. Bei Versuchen an zerkleinertem Rotorblattmaterial von Windenergieanlagen konnten hierbei Glasfasern zurückgewonnen werden, die eine deutlich geringere Festigkeit aufwiesen als die ursprünglichen Fasern. Mit einem Anteil von 25% Recyclingfasern konnten neue Vliese hergestellt werden.

Einsatz von Rezyklat in neuen Kunststoffen

Immer wieder wird auch versucht, Alt-GFK nach einer mechanischen Aufbereitung einzusetzen. Hierbei gibt es unterschiedliche Anwendungsfelder. So wurde beispielsweise gezeigt, dass die Möglichkeit besteht, nur gering aufbereitete aufbereitete Mischkunststoffe mit recycelten Glasfasern zu verstärken und so Substitute für Holz und Betonprodukte wie Eisenbahnschwellen oder Pfähle und Masten zu erzeugen (Turner u. a. 2018). Letztlich handelt es sich hierbei um den Versuch, zwei problematische Fraktionen (Mischkunststoffe und Glasfaserabfälle) zu verwerten, um auf einfachem Wege eine bessere Produktqualität zu erzielen. Der Vorteil des Verfahrens liegt in der einfachen Aufbereitung. Verbunden damit ist jedoch voraussichtlich auch eine geringe Einheitlichkeit und Reproduzierbarkeit der Produkteigenschaften, die jedoch auch für vermeintlich einfache Anwendungen i. d. R. erforderlich ist.

Es gibt jedoch auch Beispiele, bei denen demonstriert wurde, dass der Einsatz von kurzfaserverstärkten PET-Rezyklaten sogar für die Herstellung sicherheitskritischer Bauteile im Automobilbau möglich ist. Hierzu ist es jedoch nötig, die Wechselwirkungen zwischen veränderten Werkstoffeigenschaften der Komponentenentwicklung, der Material- und Komponentenspezifikation und dem Produktionsprozess zu berücksichtigen. Ein einfacher Austausch von Primärmaterial durch Sekundärmaterial ist zumeist nicht möglich.

Aus technischer Sicht kann der Einsatz anderer Aufbereitungsverfahren u. U. geeignet sein, die Aufbereitung deutlich zu verbessern und deutlich reinere Harz- und Faserfraktionen zu erhalten. So konnte gezeigt werden, dass beim Einsatz einer Hochspannungszerkleinerung, die ursprünglich für das Zerkleinern von Gestein konzipiert wurde, Fasern mit weniger Harzanhaftung und einer größeren Länge gegenüber einer herkömmlichen mechanischen Aufbereitung zurückgewonnen werden konnten. Der spezifische Energieaufwand war hierbei jedoch mindestens 2,6-fach höher als beim mechanischen Recycling (Mativenga u. a. 2016).

Einsatz als Zuschlag

Es gibt verschiedene Studie zum Einsatz von gebrochenem oder gemahlenem Alt-GFK als Zuschlag oder Füllstoff in Beton, Mörtel und Gips.

Der Einsatz von Glasfasern in herkömmlichem Beton und Mörtel, auf der Basis von Portlandzement ist limitiert, da eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (vgl. z. B. (Henning u. a. 1989)) zwischen Glasfasern und zementhaltiger Bindemittelmatrix auftreten kann und dabei quellfähiges Alkali-Kieselsäure-Gel entsteht, welches zur Zerstörung von Beton und Mörtel führen kann. Dennoch wurden auch Versuche unternommen, in herkömmlichem Beton geringe Mengen feinkörniger Abfälle aus der GFK -Produktion einzusetzen. Hierbei zeigte sich, dass nur

geringe Mengen ohne deutliche Verschlechterung der Eigenschaften, insb. der Druckfestigkeit, eingesetzt werden können. Die Qualität der Betonprodukten hängt dabei von den Eigenschaften der GFK-Abfälle, der Korngrößenverteilung, dem Mahlprozess und Mahlgrad, dem Anteil der Zuschlagstoffmischung und der Konzentration anderer Zusatzstoffe ab (Osmani und Pappu 2011).

Ein Einsatz von zerkleinerten GFK-Abfällen ist jedoch auch in Polymermörteln möglich. Dabei zeigt sich, dass mit aufbereiteten GFK-Abfall gefüllte Polymermörtel gegenüber unmodifizierten Polymermörteln auf Polyesterbasis ein verbessertes Biege- und Druckverhalten aufweisen. Dies zeigt die grundsätzliche Möglichkeit zur Wiederverwendung von GFK-Abfällen zu Beton-Polymer-Verbundwerkstoffen (Ribeiro u. a. 2011).

Angesichts der intensiven Debatten über die ubiquitäre Nutzung von Kunststoffen und die damit verbundenen Freisetzungen in die Umwelt, ist jedoch unklar, ob der Einsatz von mechanisch aufbereiteten GFK-Abfällen in Beton und Mörtel insgesamt als nachhaltig betrachtet werden kann.

Ebenso ist ein Einsatz von Kurzfasern nach einer mechanischen Aufbereitung von GFK zur Verstärkung von Gips möglich. Jedoch ist der Aufwand für die mechanische Aufbereitung aufgrund der hohen Festigkeit der GFK hoch (Feng u. a. 2016).

Schlussfolgerung zum mechanischen Recycling

Das mechanische Recycling von GFK stößt bisher an deutliche Grenzen, am ehesten erfolgsversprechend erscheint

- ▶ Ein Einsatz als Zuschlag in Beton und Mörtel.
- ▶ Eine Verbesserung des mechanischen Recyclings durch neue Zerkleinerungsverfahren.

dagegen sprechen

- ▶ Mögliche vermehrte Freisetzung von Kunststoffen in die Umwelt beim Einsatz in Beton und Mörtel.
- ▶ Der hohe Energieaufwand alternativer Aufbereitungsverfahren.

4.5.2.2 Chemisches Recycling von GFK

Verfahren zum chemischen Recycling für GFK könnten eine Alternative zum werkstofflichen Recycling bieten. Ziel der Verfahren des chemischen Recyclings ist dabei i. d. R. die Zurückgewinnung der eingesetzten Fasern, aber auch eine Nutzung der Harze.

Grundsätzlich erscheinen thermo-chemische Verfahren wie Verölung oder Pyrolyse geeignet, um die Verstärkungsfasern zurückzugewinnen. Hierbei ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass es bei beiden Verfahren zu Veränderungen der Glasfasern kommen kann. Wichtig ist dabei auch zu berücksichtigen, dass Glasfasern nicht alleine aus dem eigentlichen Glas bestehen, sondern die für die Festigkeit entscheidende Oberflächenqualität durch das Aufbringen einer Schlichte⁵ erreicht wird, die bei einem chemischen Recycling zerstört wird. Dementsprechend haben recycelte Glasfasern i. d. R. eine verringerte Festigkeit, wobei ein erheblicher Unterschied in

⁵ Schichten sind i. d. R. überwiegend organische Substanzen die unmittelbar nach der Herstellung auf die Elementarfäden aufgebracht werden die Oberflächen schützen und die Weiterverarbeitung verbessern.

Abhängigkeit von den eingesetzten Mengen an recycelten Fasern besteht. Bessere Werte werden insbesondere bei geringen Anteilen von recycelten Fasern erreicht (Beauson u. a. 2014).

Eine mögliche Strategie kann jedoch in einer Kaskadennutzung der Glasfasern bestehen. Hierbei sollten die Fasern in jeweils geeigneten Anwendungen eingesetzt werden und nicht zwingend versucht werden, die Fasern in der ursprünglichen Anwendung zu verwenden. Auf diese Weise könnte der maximale Nutzen aus den Glasfasern über ihre Lebensdauer gezogen werden und gegebenenfalls auch Kosteneinsparungen erzielt werden (Hagnell und Åkermo 2019).

Pyrolyse

Die Entwicklung der meisten Pyrolyseverfahren, d. h. einer thermischen Zersetzung unter Luftabschluss, erfolgte bisher überwiegend im Labormaßstab. Sie sind jedoch inzwischen dabei, in die kommerzielle Anwendung überzugehen (Rybicka u. a. 2016). Schwierig kann es dabei sein, die Prozessparameter zu optimieren, da eine höhere Verarbeitungstemperatur die mechanischen Eigenschaften der Fasern zu stark beeinträchtigt, eine niedrigere Temperatur jedoch zu einer unannehmbar langen Zykluszeit führt. Bei den meisten Versuchen, kam es zu deutlichen Verschlechterungen der mechanischen Eigenschaften, insbesondere kommt es zu einer Verringerung der Festigkeit der Glasfasern, obwohl die Steifheit, in den meisten Fällen erhalten bleibt. Gegebenenfalls besteht jedoch die Möglichkeit, durch eine Nachbehandlung die Festigkeit der Fasern wieder zu erhöhen (Job 2013).

Neben einer Verringerung der Zugfestigkeit der Faser im Vergleich zu frischer Glasfaser kommt es auch zu einer deutlichen Verkürzung der Fasern. Dennoch erscheinen Pyrolyseverfahren vielversprechend, denn sie ermöglichen das Auflösen der Verbunde und die Trennung von Organik und Anorganik. Die Gase enthalten jedoch viel CO und CO₂ und haben daher nur einen niedrigen Heizwert. Die Pyrolyseöle enthalten überwiegend sauerstoffhaltige und aromatische Verbindungen (Naqvi u. a. 2018). Sie weisen geringere Heizwerte auf als Erdöl (Williams u. a. 2005).

Es konnte jedoch auch gezeigt werden, dass es möglich ist, die Festigkeit von thermisch noch höher belasteten Fasern aus einer thermischen Verwertung durch eine Nachbehandlung mit NaOH-Lösungen, wieder deutlich zu erhöhen (Thomason u. a. 2016). Dieser Effekt ist nachvollziehbar, da es bei einem basischen Angriff auf Silikatgläser, zu einem Angriff auf die Struktur des Glasnetzwerks kommt, wohingegen bei einem Angriff durch Säuren vor allem die Alkalioxide oberflächlich herausgelöst werden, jedoch das Glasnetzwerk nicht angegriffen wird. Daher ist davon auszugehen, dass durch die Behandlung mit NaOH-Lösung die Oberfläche insgesamt verändert und abgetragen wird und insbesondere vorhandene Oberflächenfehler entfernt werden. Dies ist zweckmäßig, da maßgeblich für die Festigkeit von Glasfasern die Qualität der Oberfläche ist. Aufgrund Glasstruktur und des Fehlens von Kristallgrenzen, wirken sich bereits kleine Fehler auf der Oberfläche stark auf die Festigkeit aus, da der Rissfortschritt nicht durch Kristallgrenzen aufgehalten wird.

Solvolyse

Solvolytische Verfahren, d. h. der Einsatz von Lösungsmitteln, um die chemischen Verbindungen insbesondere von Duroplasten aufzubrechen, gibt es derzeit nur im Labormaßstab (Rybicka u. a. 2016). Im Vergleich zur Pyrolyse entsteht bei der Solvolyse eine geringere thermische Belastung der Verstärkungsfasern. Daher besteht hier gegebenenfalls die Möglichkeit, dass es zu einer geringeren Schädigung der Fasern kommt. Hierzu gibt es eine Reihe von Untersuchungen.

Bei der Solvolyse von GFK, die auf verschiedenen Fasern bestanden (Nicht-Alkali-Glasfaser und Mittel-Alkali-Glasfaser) konnte beobachtet werden, dass abhängig von den Bedingungen, ein großer Teil der Harze in Lösung gegangen war und dass die zurückgewonnen Nicht-Alkali-

Glasfaser eine ähnliche Textur wie die Fasern im Anlieferungszustand aufwiesen, während die Mittel-Alkali-Glasfaser beim Recycling beschädigt wurden. Dementsprechend behalten Nicht-Alkali-Glasfaser 94–96% ihrer ursprünglichen Festigkeit, während die Zugfestigkeit der recycelten Mittel-Alkali-Glasfaser auf unter 90% dieses Wertes sinkt (Yang u. a. 2014). Die Festigkeit der nach einer Solvolyse zurückgewonnenen Fasern hängt daher auch von der Zusammensetzung der Fasern und ihrer chemischen Beständigkeit ab.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch eine andere Untersuchung, die zeigt, dass bei der Solvolyse zurückgewonnene Glasfaserrovings, die gleiche Zugfestigkeit aufweisen wie Neumaterialien und eine nur um 12% reduzierte Steifigkeit im Vergleich zu Rovings aus neuen Proben desselben Materials. Diese Beibehaltung der mechanischen Eigenschaften ist ein deutlicher Vorteil gegenüber dem Pyrolyseprozess, bei dem die mechanischen Eigenschaften von Glasfasern vermindert sind (Cousins u. a. 2019). Nachteilig an der Solvolyse von faserverstärkten Verbundwerkstoffen sind jedoch die hohen Kosten für die eingesetzten Lösungsmittel, welche anschließend ebenfalls einer Entsorgung bedürfen. Eine verbesserte Prozessführung, insb. die mehrfache Nutzung der Lösungsmittel durch Nutzung für mehrere Chargen von Alt-GFK kann hier den Lösemittelverbrauch und die Kosten reduzieren (Sokoli u. a. 2017). Insgesamt erscheinen diese aufwendigen, teuren und auch umweltbelastenden Verfahren für die Abfallbehandlung in größerem technischem Maßstab ungeeignet.

Andere Ansätze versuchen eine Depolymerisation von Polyesterharzen durchzuführen. Hierbei soll es möglich sein, relativ unbeschädigte Glasfasern zu erhalten (Iwaya u. a. 2008). Die Möglichkeiten der Rückgewinnung der Harze und Fasern kann dabei deutlich verbessert werden, wenn von Beginn an recyclinggerechtere Stoffe eingesetzt werden. Hierzu können insb. Harze eingesetzt werden, deren Vernetzung einfacher reversibel ist und die daher einfacher depolymerisiert werden können. Hierbei können, sowohl die eingesetzten Harze als auch Glasfasern mit vergleichbaren Eigenschaften zurückzugewinnen und (Lejeail und Fischer 2020).

Schlussfolgerungen zum chemischen Recycling

Beim chemischen Verfahren sind insbesondere die Pyrolyse und die Solvolyse Gegenstand laufender Entwicklungen. Beide Verfahren haben unterschiedliche Vor- und Nachteile. Für die Pyrolyse sprechen

- ▶ Die geringeren Kosten.
- ▶ Der fortgeschrittenere Entwicklungsstand.

für die Solvolyse spricht

- ▶ Die hohe Qualität der gewonnenen Rezyklate.

4.5.2.3 Einsatz von GFK-Abfällen als Sekundärbrennstoff in Zementwerken

Unter bestimmten Voraussetzungen können GFK-Abfälle auch als Ersatzbrennstoff (EBS)⁶ eingesetzt werden. Zu berücksichtigen ist dabei, dass eine thermische Nutzung erst an 4. Stelle der Abfallhierarchie nach dem KrWG steht (Kreislaufwirtschaftsgesetz 2017). Im Fall von fehlenden höherrangigen Verwertungsoptionen kann sie jedoch dennoch geboten sein. Hierbei muss beachtet werden, dass aufgrund der enthaltenen Glasfasern der Heizwert gegenüber nicht verstärkten Kunststoffen deutlich verringert ist. Allerdings werden gleichzeitig die Glasfasern bei den hohen Temperaturen im Brennprozess aufgeschmolzen und können stofflich für die Herstellung des Zementklinkers genutzt werden. Dadurch können natürliche Rohstoffe wie beispielsweise Sand oder andere Sekundärrohstoffe wie Gießereialsande oder Brechsande eingespart werden.

GFK bestehen aus min. 15–20 Vol.-% bis max. ca. 60 Vol.-% aus Fasermaterial und zu 40–85 Vol.-% aus Matrixmaterial (swiss-composite 2020). Bei einer Dichte für die Glasfasern von ca. 2.550 kg/m³ (Wikipedia a), einer Dichte von ca. 1.100 kg/m³ für Epoxidharz (Wikipedia b) und einem Heizwert (H_u) von ca. 29 MJ/kg für Epoxidharz (Bauforumstahl o.J.) ergeben sich dann Werte für H_u der GFK zwischen ca. 6,47 und 20,59 MJ/kg.⁷ Andere Angaben gehen für H_u von 5,2 kWh/kg bzw. 18,72 MJ/kg aus (Bauforumstahl e.V. o. J.). Die Spannweite der Heizwerte von GFK ist beträchtlich. Gegenüber den Brennstoffen, die in Zementdrehrohröfen als Regelbrennstoff eingesetzt werden (i. d. R. Steinkohle mit einem Heizwert von ca. 27,4 MJ/kg (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 2020), oder auch bestimmten Ersatzbrennstoffen, wie Altreifen (Heizwert von 26–32 MJ/kg nach (Umweltbundesamt 2014)) ist der Heizwert der GFK geringer. Er liegt aber günstigstenfalls im Bereich anderer Ersatzbrennstoffe, wie aufbereiteten Fraktionen aus Siedlungsabfällen (18 MJ/kg) oder Altholz (15 MJ/kg).

⁶ Ersatzbrennstoffe sind Brennstoffe, die aus Abfällen gewonnen werden. Sie sind bisher nicht durch Normen oder gesetzliche Regelwerke geregelt. Es gibt jedoch mit dem RAL-Gütezeichen 724 „Sekundärbrennstoffe“ ein Gütezeichen für Sekundärbrennstoffe, dass Qualitätsstandards, Probenahme- und Analysevorschriften sowie ein Qualitätssicherungssystem umfasst.

⁷ Untere Berechnung für den Heizwert von GFK:

Dichte GFK [kg/m³] = 0,6*2550 [kg/m³] + 0,4*1100 [kg/m³] = 1970 [kg/m³]

Anteil EP [kg/kg] = 0,4*1100 [kg/m³] / 1970 [kg/m³] = 0,223 [kg EP/kg GFK]

Heizwert [MJ/kg] = 0,223 kg EP/kg GFK * 29 [MJ/kg] = 6,467 [MJ/kg]

Obere Berechnung für den Heizwert von GFK:

Dichte GFK [kg/m³] = 0,15*2550 [kg/m³] + 0,85*1100 [kg/m³] = 1317,5 [kg/m³]

Anteil EP [kg/kg] = 0,85*1100 [kg/m³] / 1317,5 [kg/m³] = 0,71 [kg EP/kg GFK]

Heizwert [MJ/kg] = 0,71 kg EP/kg GFK * 29 [MJ/kg] = 20,59 [MJ/kg]

Der Heizwert ist jedoch nur ein Faktor, der für den Einsatz von GFK-Abfällen in Zementwerken relevant ist. Der Gehalt an Siliziumdioxid und der Alkaligehalt sind ebenfalls Aspekte, die es zu betrachten gilt.

Der Alkaligehalt von Zementen ist zu beachten, da Gesteinskörnungen in Beton durch Alkali-Kieselsäure Reaktion (AKR) angegriffen werden können. Ausschlaggebend für diese Reaktion ist primär die "Alkaliempfindlichkeit" der Gesteinskörnung und sekundär der wirksame Alkaligehalt im Zement. Die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung ist vor allem eine Folge höherer Gehalte an opalhaltigem Sandstein oder Flintstein in den Zuschlägen. Es ist daher vor allem ein regionales Problem (Wendehorst 1992). Insofern spielt der Alkalianteil, der durch Sekundärbrennstoffe in die Zementklinker eingebracht werden kann, für die Nutzung der Zemente eine nachgeordnete Rolle. In diesem Fall müssen jedoch ggf. die Anforderungen an Zemente mit niedrigem Alkaligehalt berücksichtigt werden (DIN 1164-10 2013). Alkaligehalte von Zement, bei welchen diese Reaktion eintritt,⁸ liegen im Bereich von ca. 1%. Besonders alkaliarme Sorten weisen auch geringere Gehalte auf.

Tabelle 7: Anforderung an den Alkaligehalt (als Na₂O-Äquivalent) von Zementen nach (DIN 1164-10)

	[%]
CEM 1 CEM V	≤ 0,60
CEM II/B-S	≤ 0,70
CEM III/A (bei Hüttensandgehalt ≤ 49 M.-%.)	≤ 0,95
CEM III/A (bei Hüttensandgehalt ≥ 50 M.-%.)	≤ 1,10
CEM III/B	≤ 2,00
CEM III/C	≤ 2,00

Bei der Berechnung des zulässigen Alkaligehaltes wird nicht der Gesamtalkaligehalt, sondern der s. g. „wirksame Alkaligehalt“ als Na₂O-Äquivalent zugrundegelegt. Der wirksame Alkaligehalt errechnet sich nach:

$$Na_2O - \text{Äquivalent} [M. -\%] = Na_2O + 0,658K_2O \text{ (Beton wiki 2017)}$$

Tabelle 8: Typische Alkaligehalt von Gläsern für Glasfasern

	Na ₂ O [%]	K ₂ O [%]	Na ₂ O-Äquivalent [%]
E-Glas	0,3	0,2	0,43
C-Glas	8,5	0,0	8,5
S-Glas	0,0	0,0	0,0

Quelle: Eigene Berechnungen

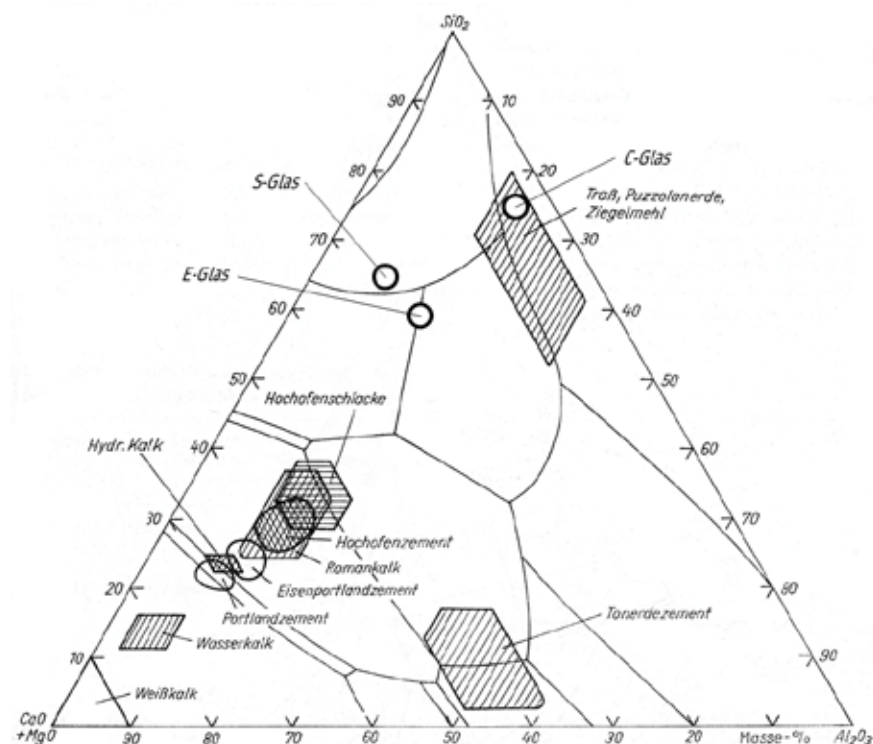
Der Alkaligehalt des überwiegend in GFK eingesetzten E-Glases ist mit einem Na₂O-Äquivalent von 0,43 % so gering (Tabelle 8), so dass der Alkaligehalt bei einem Einsatz dieser GFK-Abfälle

als Ersatzbrennstoff i. d. R. keinen relevanten Einfluss auf den Alkaligehalt der Zemente haben wird. Dies gilt auch für alkaliarme Zemente.

Aufgrund der zu erwartenden niedrigen Alkalimengen ist davon auszugehen, dass durch den Einsatz von GFK als Ersatzbrennstoff der Einfluss auf die Alkalibilanz des Zementdrehrohrofens gering ist und keine wesentlichen Auswirkungen auf den Ofenbetrieb entstehen.

Neben dem Alkaligehalt sind der SiO_2 -Gehalt von Alt-GfK und dessen mögliche Auswirkungen auf die Klinkermatrix zu beachten. Da GFK überwiegend aus Glasfasern bestehen, könnte der SiO_2 -Eintrag beträchtlich sein. Dies wird an einer Darstellung im Dreistoffsystem SiO_2 - Al_2O_3 - CaO/MgO deutlich (Abbildung 18). Hierzu wurden die nur auf diese Oxide bezogenen Zusammensetzungen der Gläser bestimmt und im Dreistoffsystem dargestellt. Der Einsatz von GFK muss somit mit einer geeigneten Substitution einhergehen, sofern das im jeweiligen Einzelfall möglich ist.

Abbildung 18: Lage der Bindemittel, hydraulischen Zusatzstoffe und Gläser für Glasfasern im System $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (Angaben in Masse-%)



Quelle: ((Hinz 1971) und eigene Ergänzungen für E, C und S-Glas)

Die Rohstoffbasis von Portlandzementklinker variiert zwischen unterschiedlichen Standorten. Es gibt sowohl Zementwerke, die Mergel verarbeiten, deren natürliche Zusammensetzung bereits ein ausgewogenes Verhältnis an Silizium, Aluminium, Eisen, Kalziumkarbonat und Magnesiumkarbonat aufweisen, als auch solche deren kalkreichere Rohstoffbasis u. a. eine Korrektur durch siliziumreiche Rohstoffe erfordern (Drozdowski, 2007; Verein Deutscher Zementwerke, 2002).

Der Einsatz von GFK-Abfällen in relevanten Mengen erfordert in Abhängigkeit der darüber eingetragenen SiO_2 -Menge eine Reduzierung des Eintrags über andere Stoffströme. Dies ist in einigen Zementwerken nicht oder nur begrenzt möglich, insbesondere in solchen, die SiO_2 -reichen Mergel einsetzen. Die Entscheidung, ob GFK-Abfälle eingesetzt werden können, muss

daher immer werksbezogen und unter Berücksichtigung der Rohstoffbasis und der Qualitätsanforderungen an das Produkt getroffen werden.

Schlussfolgerungen zum Einsatz von GFK als Sekundärbrennstoff in Zementwerken

Die Nutzung von GFK-Abfällen in Zementwerken erscheint bei geeingter Rohstoffbasis fallweise sinnvoll. In Abhängigkeit der jährlich anfallenden Menge GFK-Abfälle könnte die vorhandene Kapazität in Deutschland zu ihrer vollständigen Nutzung als Ersatzbrennstoff hinreichen. Dies war jedoch nicht im Fokus des Projekts und wurde daher nicht untersucht.

Die wichtigsten Gründe, die für einen Einsatz sprechen sind

- ▶ eine mögliche Schonung von Primärrohstoffen bei geeigneter Rohstoffbasis und
- ▶ eine Nutzung des Energieinhaltes.

Die wichtigsten Gründe, die gegen einen Einsatz sprechen sind

- ▶ der teilweise sehr geringe Heizwert und
- ▶ der, abhängig von der Rohstoffbasis, zu hohe SiO₂-Gehalt.

Vorteile könnten sich dann erschließen, wenn eine maßgebliche Substitution von Primärrohstoffen mit dem Einsatz von GFK-Abfällen einhergeht.

4.6 Zusammenfassung und Empfehlungen

In Kapitel 4 wurden die Verwertungstechniken für Kunststoffabfälle aus der Baubranche vorgestellt. Der Fokus lag dabei auf den für die Baubranche mengenmäßig relevantesten Kunststoffen (z. B. PVC, PE und PS) sowie den wichtigsten Produktgruppen Rohre, Fenster- Tür- und Rolllädenprofile, Dämmstoffe, PVC-Bodenbeläge, Kabelisolierungen und textile Bodenbeläge. Für einen umfassenden Überblick beleuchtet das Kapitel das Recycling erstens aus Sicht der dafür verwendeten Prozesse und Techniken, zweitens anhand der verschiedenen Kunststoffsorten und drittens anhand der Produktgruppen.

Eine wichtige Voraussetzung für das werkstoffliche Recycling von Kunststoffen ist deren getrennte Erfassung. Technische Möglichkeiten zur Sortierung gemischter Bauabfälle sind zwar gegeben, werden aber nicht zur Vorbereitung eines Recyclings eingesetzt - auch bei bester Sortiertechnik werden die aus den gemischten Bauabfällen anfallenden Kunststofffraktionen nach heutiger Praxis nur thermisch verwertet.

Es handelt sich bei den mengenmäßig relevantesten Kunststoffen im Baubereich überwiegend um Thermoplaste, so dass ein werkstoffliches Recycling aus technischer Sicht prinzipiell gut möglich und weit entwickelt ist. Die Recyclingverfahren für die einzelnen Kunststoffsorten ähneln sich dabei stark. Ein zentraler Prozessschritt ist das Recompoundieren, bei dem die gereinigten Kunststoffe zu einem homogenen Rezyklat mit definiertem Eigenschaftsprofil verarbeitet werden. Inwiefern das werkstoffliche Recycling jeweils zur Anwendung kommt, hängt jedoch davon ab, ob ein ausreichend großer und reiner Materialstrom existiert und damit eine hochwertige werkstoffliche Verwertung möglich ist. Für eine wirtschaftliche Anwendung müssen die Kosten für Logistik, Sortierung und Aufbereitung durch eingesparte Entsorgungskosten und für die Rezyklate erzielten Erlöse mindestens kompensiert werden. Für die Produktgruppen, für die bereits freiwillige Rücknahmesysteme existieren (Rohre, Fenster und Türen, PVC-Böden), sind diese Voraussetzungen in hohem Maße gegeben, sodass ein Recycling möglich ist und bereits angewendet wird. Bei Dämmstoffen auf Basis von EPS, XPS und

PUR beschränkt sich das Recycling im Wesentlichen auf Produktionsabfälle und zum Teil Baustellenabfälle. Post-Consumer-Abfälle tauchen aufgrund der Langlebigkeit der Dämmsysteme derzeit noch selten auf. Im Rückbau stehen logistische Herausforderungen und starke Verunreinigungen dem Recycling bislang noch entgegen. Dämmstoffe aus PUR können als Duroplaste werkstofflich nicht im Kreis geführt, aber gut als Pressplatten recycelt werden. Textile Bodenbeläge weisen durch ihren komplexen Aufbau, eine hohe Materialvielfalt und starke Verunreinigungen schlechte Voraussetzungen für das Recycling auf. Hinzu kommt der Mangel an einer leistungsfähigen Rücknahmelogistik und Recyclinginfrastruktur. Kabelisolierungen bringen durch die getrennte Erfassung und das Metall-Recycling von Kabeln zwar gute logistische Voraussetzungen für das Recycling mit. In der Praxis wird dieses Potenzial jedoch noch nicht ausgeschöpft, sondern allenfalls für ein Downcycling genutzt.

Lösungsmittelbasierte Verfahren wie Newcycling, CreaSolve oder Vinylloop werden als Möglichkeit propagiert, anders nur schwer zu trennende oder zu reinigende Stoffe einem hochwertigen Recycling zuzuführen. Inwiefern diese Lösungen eine Nischenanwendungen bleiben oder sich großskalig am Markt etablieren können, ist zurzeit unklar.

Die Möglichkeiten des chemischen Recyclings und dessen Grenzen wurden diskutiert. PA6 aus textilen Abfällen wird hier von einigen Vorreitern im industriellen Maßstab recycelt.

Das Recycling von GFK-Abfällen stellt eine besondere Herausforderung dar, da hier ein duroplastischer Werkstoff vorliegt, der wegen des hohen Glasfasergehaltes auch als Ersatzbrennstoff nur bedingt geeignet ist. Auch Bitumen wird zurzeit noch thermisch verwertet, da ein Recycling technisch schwierig ist.

Aus den in diesem Kapitel dargestellten Untersuchungen lassen sich folgende Empfehlungen zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft im Baubereich ableiten.

- ▶ Eine Abfallvermeidung ist für nahezu alle Produkte nicht möglich und auch aufgrund der langen Lebensdauer der Produkte nicht so stark zu priorisieren wie z. B. für Verpackungsabfall
- ▶ Die Wiederverwertung der Produkte bietet sich nur in den wenigsten Fällen als Option an
- ▶ Ein sehr großer Anteil der verwendeten Stoffe ist thermoplastischer Natur und damit prinzipiell gut werkstofflich recyclebar. Reinere Abfallströme ermöglichen dabei ein hochwertiges Recycling. Dies lässt sich durch folgende Maßnahmen erreichen

Getrennte Erfassung von Kunststoffabfällen verbessern. Die gesetzlichen Vorgaben für eine getrennte Erfassung existieren, können aber noch entschiedener durchgesetzt werden insbesondere die Hürden für eine Ausnahmeregelungen sind diesbezüglich zu überprüfen.

Im Bereich der Dämmstoffe sollten separate Abfallschlüssel für Dämmstoffe aus Kunststoffen eingeführt werden oder EPS- PUR- und XPS-Dämmstoffe in den Abfallschlüssel für Kunststoffe (17 02 03) aufgenommen werden.

Stoffgruppenspezifische Rücknahmesysteme ermöglichen reinere Stoffströme. Hier sollte geprüft werden, ob dies für einzelne Produktgruppen Vorteile bietet. Falls dem so ist, sollte die Einführung eines freiwilligen Rücknahmesystems angeregt und unterstützt werden.

Die Kommunikation vorhandener Rückgabe- und Recyclingmöglichkeiten in der Technischen Dokumentation der Produkte kann verpflichtend gefordert werden. Der Aufwand auf Herstellerseite hierzu wird als gering eingeschätzt.

- ▶ Bei der vergleichenden Bewertung der Kreislaufführung verschiedener Branchen sollten die langen Nutzungsdauern von Bauprodukten berücksichtigt werden.
- ▶ Für das Recycling textiler Bodenbeläge bestehen derzeit noch die größten Entwicklungspotenziale im „Design-for-Recycling“. Hierzu bestehen folgende Ansätze:
 - Der Einsatz von Mischmaterialien und Schadstoffen muss vermieden werden,
 - Es sollten nur recycelbare Materialien Verwendung finden,
 - Die Trennbarkeit der einzelnen Teppichschichten ist sicherzustellen,
 - Eine Kennzeichnung der in den verschiedenen Schichten verwendeten Materialien, etwa durch Stempelung oder technische Dokumentation, sollte erfolgen und
 - Teppichboden sollte ohne Kleber fixiert werden.
- ▶ Der Ausbau der Recycling-Infrastruktur sollte gefördert werden
- ▶ Der Sammel- und Recyclingprozess verursacht aufgrund seiner Komplexität Kosten, die durch den Verkauf des Rezyklates teilweise schwer zu decken sind. Die Rezyklate befinden sich hier immer in Konkurrenz zu Neuware. Instrumente, die zusätzliche finanzielle Anreize schaffen, oder den Rezyklateinsatz vorschreiben, können hier unterstützend wirken.

5 Rezyklateinsatz in Bauprodukten aus Kunststoff

5.1 Allgemeines

Die Rückführung von Sekundärkunststoffen in möglichst hochwertige Anwendungen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Ob von Seiten der Bevölkerung, der Politik oder auch der Industrie initiiert, eine Schließung von Material- und Stoffkreisläufen ist das Ziel. Nach der im August 2020 publizierten Conversio-Studie wurden im Jahr 2019 insgesamt 14.235 kt Kunststoff in Deutschland verarbeitet. Davon entfallen circa 86 % auf Neuware und 14 % auf Kunststoffrezyklat. In der Baubranche ist dieses Verhältnis zugunsten des Rezyklats verschoben: Zur Herstellung von Bauprodukten wurde circa 77 % Primärkunststoff und etwa 23 % Rezyklat eingesetzt. Generell zeigen diese Wiedereinsatzquoten, dass im Sinne einer Kreislaufwirtschaft noch viel Potenzial besteht (Lindner und Schmidt 2020).

Das Ziel des folgenden Kapitels ist es, Potenziale für den Einsatz von Rezyklaten in Bauprodukten aus Kunststoffen aufzuzeigen. Der Rezyklateinsatz in Bauprodukten stellt den zentralen Untersuchungsgegenstand dar. Aufgrund der hohen Relevanz werden speziell Rohre, aber auch Kabelschächte betrachtet, wobei aktuelle Standards und Anforderungen für den Rezyklateinsatz erläutert sowie technische Grenzen und weitere Hemmnisse dargelegt werden. Gleichzeitig werden auch Bauprodukte aus anderen Anwendungsgebieten (unter anderem auf Grundlage der im Kapitel 2 erfolgten Recherchearbeiten zu Bauprodukten aus Kunststoffen) benannt und die Möglichkeit des Einsatzes von Rezyklaten bei deren Herstellung untersucht. Die kunststoffreichen Abfallströme werden identifiziert und bezüglich ihrer Eignung zur Herstellung hochwertiger Kunststoffrezyklate bewertet. Die Ergebnisse basieren auch auf Interviews mit Expertinnen und Experten.

5.2 Kunststoffabfall: Qualität und Quantität

In diesem Kapitel werden die inländisch anfallenden Abfallquantitäten und -qualitäten als Rohstoffbasis für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten betrachtet.

Basierend auf Daten des Statistischen Bundesamtes wurden in Kapitel 2 dieser Studie bereits unterschiedliche Mengenbetrachtungen durchgeführt. Während es sich dabei ausschließlich um Abfallarten handelte, die speziell im Rahmen von Rückbauarbeiten anfallen, sollen im Folgenden auch Kunststoffabfälle aus anderen Quellen (z. B. aus dem Verpackungsbereich) in die Betrachtung gezogen werden. Auch sie können als Rohstoff für die Herstellung von Bauprodukten verwendet werden, sofern die bautechnischen Produkthanforderungen es zulassen. Kritisch zu sehen ist in diesem Kontext allerdings, dass der Kunststoff aus seinem ursprünglichen Produktsystem herausgenommen und dort fehlen würde, was umfangreichere Anpassungen erfordern könnte. So ist beispielsweise eine PP-Lebensmittelverpackung vollkommen anders additiviert und compoundiert als eine PP-Wandinnenverkleidung. Die reine Fokussierung auf die Hauptpolymergruppe ist daher nicht ausreichend, um eine hochwertige Kreislaufführung mit wenig Ausschuss sicherzustellen.

Bereits in Kapitel 2 wurde erörtert, dass lange Nutzungsdauern von Bauprodukten aufgrund der Abfallvermeidung ökologische Vorteile gegenüber kurzlebigen Kunststoffprodukten bieten. Für eine Aufbereitung und den erneuten Einsatz jedoch sind Nutzungsdauern über mehrere Jahrzehnte aufgrund von auftretenden Alterungserscheinungen und möglichen Schäden hinderlich. Daher soll im Folgenden die Möglichkeit der werkstofflichen Verwertung und des anschließenden Wiedereinsatzes für die Herstellung neuer Bauprodukte genauer beleuchtet werden. Zugleich ist die Alterungsbeständigkeit auch deshalb wichtig, um die Eignung von Kunststoffen und Kunststoffrezyklaten für den Einsatz in Bauprodukten abzuschätzen.

Die im Baubereich eingesetzten Kunststoffprodukte sind je nach Einsatzgebiet und funktionaler Bestimmung unterschiedlichen Umweltbedingungen ausgesetzt, welche die Alterung, d.h. den Polymerkettenabbau, beschleunigen. Hierzu zählen:

- ▶ Mechanische Belastung (statische Belastungen, dynamische Belastungen, Verschleiß)
- ▶ Chemische Belastung (Oxidation, Hydrolyse, Quellung, Spannungsrissbildung)
- ▶ Biologische Belastung (Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere)
- ▶ Strahlung (Energetische Strahlung, Wellenlänge, Intensität)
- ▶ Atmosphärische Belastungen (UV-Licht, Oxidation, Luftfeuchtigkeit, Wasser, Verunreinigungen)
- ▶ Temperatur (thermischer Abbau, thermisch-oxidativer Abbau, Wechsel von Wärme und Kälte)

Zwar wird versucht, die Alterung des Kunststoffs durch entsprechende Additivierung, z. B. Zugabe von Antioxidantien, zu verzögern. Eine komplette Verhinderung ist bislang jedoch nicht möglich. Auch ist der Einsatz von Additiven unter ökologischen Gesichtspunkten nicht unbedenklich. Einzelne Aspekte hierzu sind dem Kapitel 4 zu entnehmen.

Die Alterung von Kunststoffmaterialien äußert sich beispielsweise in Form von Elastizitätsverlusten, verblassender Farbe, Rissen im Produkt oder Erosion an der Oberfläche. Neben dem Polymerkettenabbau sind gerade Alt-Kunststoffprodukte aus dem Tiefbau stark verunreinigt. Auch hier müssen die Abfälle vor ihrer Wiederaufbereitung zunächst einer aufwendigen Reinigung unterzogen werden, was zusätzliche Ressourcen verbraucht und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten häufig nicht tragbar ist.

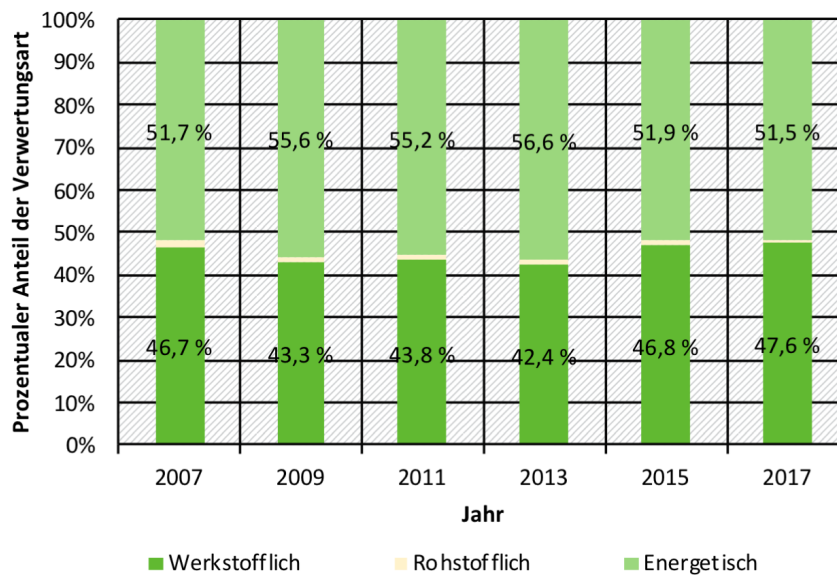
Sofern eine lange Nutzungsdauer in einem Gebäude vorausgesetzt werden kann, trägt der Anwendungsfall zur Vermeidung von Abfällen bei. Angesichts der Alterung, Verschmutzung, Additivierungsbedürftigkeit und aufgrund möglicher Schadstoffbelastungen, welche letztlich den Stand der Chemikaliengesetzgebung zum Zeitpunkt des Inverkehrbringens des Bauprodukts widerspiegelt, ist die ökologische Vorteilhaftigkeit des Recyclings im Vergleich zu kurzlebigen Gütern eingeschränkt und auch die quantitative Verwertungsfrage ist weniger dringend.

Kunststoffabfälle aus anderen Sektoren, wie beispielsweise Verpackungsabfälle, haben den Vorteil, dass sie vergleichsweise geringe Alterungserscheinungen aufweisen und sich in dieser Hinsicht besser für ein hochwertiges werkstoffliches Recycling eignen. Ungewiss wiederum ist jedoch die Alterungsbeständigkeit dieser Werkstoffe. Zudem gibt es andere Hürden, wie beispielsweise Mehrschichtverbunde. Ein weiterer negativer Aspekt liegt in der unberechenbaren und branchenuntypischen Art der Verschmutzung, wie z. B. Lebensmittelreste, welche häufig zu Geruchsproblemen im Produkt führen und eine aufwändige Wäsche erfordern.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Entwicklungen des Kunststoffrecyclings der letzten Jahre. Dargestellt ist einerseits die mengenmäßige Entwicklung der Verwertungsarten für die Summe aller, nicht aus dem Baubereich stammenden, Kunststoffabfälle (Abbildung 19) sowie die Summe aller Kunststoffabfälle aus dem Baubereich (Abbildung 20). Wie zu sehen, sank der Anteil der werkstofflichen Verwertung bei den anderen Kunststoffprodukten zwischen 2007 und 2013 auf rund 42,4 %, bevor er bis 2017 schließlich wieder auf 47,6 % und somit in etwa auf das Anfangsniveau von 2007 stieg. Annähernd der gesamte Anteil derjenigen Kunststoffabfälle, der nicht werkstofflich verwertet werden konnte, wurde einer energetischen Verwertung zugeführt, während die rohstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen im

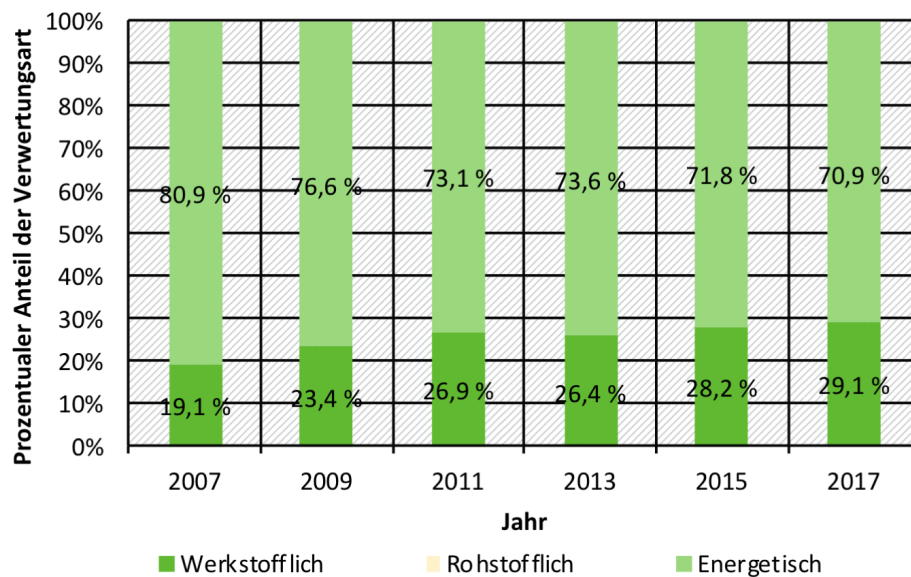
betrachteten Zeitraum lediglich eine untergeordnete Rolle spielte. Im gleichen Zeitraum erfuhren Kunststoffabfälle aus dem Baubereich eine tendenziell stärkere Entwicklung in Richtung des werkstofflichen Recyclings. Während im Jahr 2007 lediglich 19,1 % der Kunststoffabfälle aus dem Baubereich werkstofflich verwertet wurden, handelte es sich 2017 bereits um etwa 29,1 %. Der Anteil der energetischen Verwertung, welche im Baubereich die dominierende Verwertungsform darstellt, wies im selben Zeitraum eine gegenläufige Entwicklung und somit einen stetigen Rückgang auf, während die rohstoffliche Verwertung von Kunststoffen im Baubereich noch keine Rolle spielte.

Abbildung 19: Anteilige Entwicklung der Verwertungsart von Kunststoffabfällen aus allen anderen Bereichen als dem Baubereich im Zeitraum von 2007 bis 2017



Quelle: Eigene Darstellung nach (Lindner 2016; Lindner 2014; Lindner 2012; Lindner 2010; Lindner 2008; Lindner und Schmidt 2018b) SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

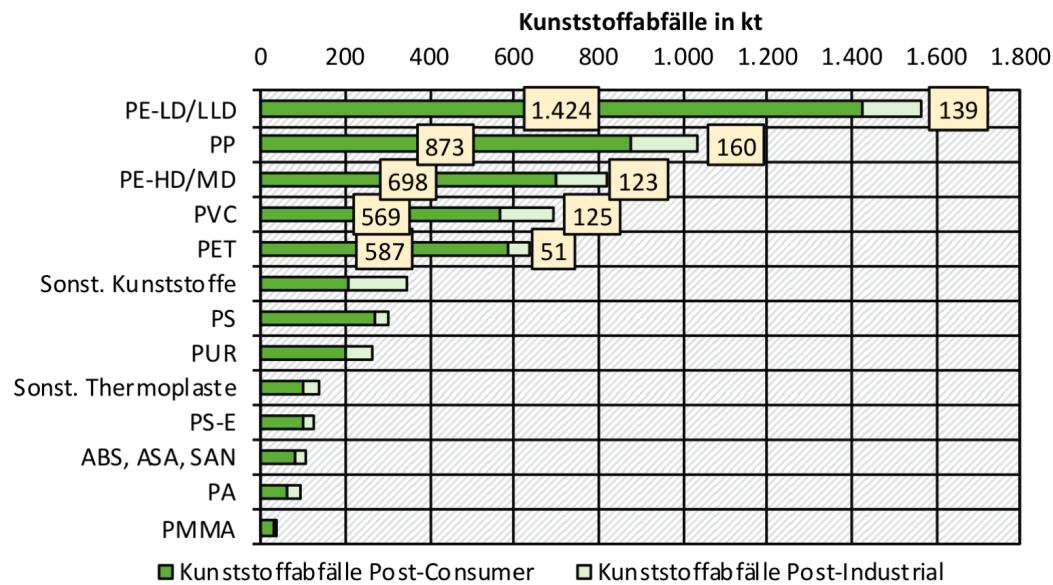
Abbildung 20: Anteilige Entwicklung der Verwertungsart von Kunststoffabfällen aus dem Baubereich im Zeitraum von 2007 bis 2017



Quelle: Eigene Darstellung nach (Lindner 2016; Lindner 2014; Lindner 2012; Lindner 2010; Lindner 2008; Lindner und Schmidt 2018) SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Die folgende Abbildung 21 zeigt die im Jahr 2017 in Deutschland angefallenen Kunststoffabfälle nach Abfallart (Post-Consumer Abfall, Post-Industrial Abfall) und nach Kunststoffsorte. Wie zu erkennen, fallen besonders relevante Mengen an Kunststoffabfällen speziell in Form von Polyolefinen (PE-LD/LLD, PE-HD/MD und PP) und in Form von PVC oder PET an. Die insgesamt angefallene Menge an Kunststoffabfällen wird auf rund 6.154 kt geschätzt, wovon rund 5.201 kt dem Post-Consumerbereich und rund 953 kt dem Post-Industrialbereich (also bei Produzenten und Verarbeitern angefallener Abfall) zugeordnet werden können (Lindner und Schmidt 2018).

Abbildung 21: Kunststoffabfälle 2017 nach Kunststoffsorte und -herkunft in Kilotonnen



Quelle: Eigene Darstellung nach (Lindner und Schmidt 2018) SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Deutlich schwieriger als die Ermittlung der Quantitäten stellt sich im Bereich der Kunststoffabfälle die Darlegung der Qualitäten dar. Die Zusammensetzung der Kunststoffabfälle hat starken Einfluss auf die Qualität der herzustellenden Rezyklate. Erste Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Kunststoffabfälle lassen sich bereits bei einer Betrachtung des jeweiligen Anfallortes ziehen. So ist etwa davon auszugehen, dass Kunststoffabfälle, die neben anderen Abfällen im gelben Sack der privaten Endverbraucher enden, in der Regel deutlich verschmutzter und heterogener sind als etwa direkt beim Kunststoffproduzenten entstandene Abfälle. Die folgende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Anfallorte von Kunststoffabfällen im Jahr 2017 nach vorhandener Abfallmenge und nach Art der erfolgten Abfallbehandlung/-verwertung (Lindner und Schmidt 2018).

Tabelle 9: Kunststoffabfälle 2017 nach Anfallort, vorhandener Abfallmenge und Art der erfolgten Abfallbehandlung (Lindner 2018)

	Gesamte Abfallmenge [kt]	Verwertete Menge [kt]	Stoffliche Verwertung [kt]	Energetische Verwertung [kt]	Beseitigung [kt]
Gewerbeabfall über private Entsorger	1208	1197	319	878	11
Hausmüllähnliche Abfälle über öffentlich-rechtliche Entsorger (öRE)	221	217	0	217	4
Schredderbetriebe incl. Autoverwerter & Reparaturwerkstätten	187	182	46	136	5
Sammel- und Verwertungssysteme für gewerbliche Verpackungen	418	418	269	149	0
Sonstige Sammlungs- und Verwertungssysteme	121	121	105	16	0
Verkaufsverpackungen (Duale Systeme, herstellergetragene Rücknahmesysteme)	1551	1551	1161	390	0
Restmüll Haushalte	1026	1011	0	1011	15
Sperrmüll Haushalte	197	197	48	149	0
Wertstoffsammlung (öRE)	63	63	32	31	0
E + E Schrott aus Privathaushalten, Gewerbe und Industrie	209	209	44	165	0
Kunststoffproduzenten	68	66	46	20	2
Kunststoffverarbeiter	885	883	803	80	2
Gesamt	6154	6115	2873	3242	39

Quelle: Eigene Darstellung nach (Lindner und Schmidt 2018)

Wie Tabelle 9 zeigt, wurden im Jahr 2017 rund 3.242 kt Kunststoffabfall energetisch verwertet und lediglich 39 kt einer Beseitigung zugeführt. Etwa 2.873 kt wurden einem stofflichen Recycling zugeführt, wobei hiervon 2.024 kt aus dem Post-Consumer Bereich und 849 kt aus der Produktion und der Verarbeitung stammten. Mit rund 1.161 kt stammt ein Großteil der stofflich verwerteten Kunststoffabfälle aus dem Bereich der beim privaten Endverbraucher anfallenden und über die dualen Systeme gesammelten Verkaufsverpackungen (knapp über 40 %). Neben Kunststoffabfällen, die direkt beim Produzenten und Verarbeiter anfallen (knapp 30 %), stellen vor allem die Sammel- und Verwertungssysteme für gewerbliche Verpackungen (9 %), Gewerbeabfälle über private Entsorger (11 %) und sonstige Sammel- und Verwertungssysteme

(z. B. Roofcollect, AgPR, KRV; knapp 4 %) bedeutende Quellen für Kunststoffabfälle zur stofflichen Verwertung dar.

Etwa $\frac{3}{4}$ des werkstofflichen Recyclings ausgedienter Produkte (Post-Consumer Abfälle) geht auf die Verwertung von Verpackungsabfällen zurück. Dies umfasst sowohl beim gewerblichen als auch beim privaten Endverbraucher anfallende Verpackungsabfälle (Lindner, 2018). PE, PP und PET decken knapp 90 % der im Verpackungsbereich verarbeiteten Kunststoffe ab.

Dementsprechend stellen diese Kunststoffe auch den Hauptanteil der stofflich verwerteten Kunststoffe dar. Im Baubereich finden PET eher weniger und PE-LD nahezu keine Anwendung. Dies ist konträr zum Verpackungsbereich. So bestehen beispielsweise 50 % der Verpackungsabfälle aus PE-LD.

Nur etwa 22 % der insgesamt 2,6 Mio. Tonnen pro Jahr an hergestellten Kunststoffbauprodukten werden aus Polyolefinen oder PET gefertigt. Nach Abbildung 8 werden jährlich ungefähr 425 kt PE, 124 kt PP und 22 kt PET verbaut.

Die Voraussetzung für den Rezyklateinsatz in Bauprodukten ist die Einhaltung der jeweiligen bautechnischen Normen und Anforderungen seitens Gesetzgeber und Kunden sowie auch die Verfügbarkeit geeignet aufbereiteter Rezyklate.

Der im Baubereich besonders häufig verwendete und rezyklierte Kunststoff PVC spielt im Verpackungsbereich eine nachrangige Rolle (< 5% der gesamten im Verpackungsbereich verarbeiteten Menge bzw. ca. 200.000 t/a), somit stellt die Verpackungsaufbereitung diese Sekundärkunststoffe nicht in ausreichender Menge und geeigneter Qualität bereit. (Lindner und Schmidt 2018). Die in Deutschland verbaute Menge an PVC liegt bei 785.000 t/a (Abbildung 8). Die Abfallmengen an PVC lagen im Jahr 2017 bei insgesamt 695.000 t, davon wurden 257.000 t einer stofflichen Verwertung zugeführt. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die tatsächlich verwertete Menge an PVC höher ist, da die Mengen, die einem „In-House-Recycling“ zugeführt werden, quantitativ nicht erfasst werden (AGPU 2019).

Die Menge an inländisch produziertem Rezyklat lag 2017 bei 1,90 Mio. t, die Verarbeitungsmenge wird mit knapp 1,77 Mio. t angegeben. Mit etwa 758 kt (ca. 43 %) der verarbeiteten Rezyklatmenge machte der Baubereich diejenige Branche mit dem größten Anteil der gesamten verarbeiteten Rezyklatmenge aus, gefolgt vom Verpackungsbereich mit 23 % und der Landwirtschaft mit 11 %. Bei den verarbeiteten Rezyklatmengen im Baubereich handelt es sich größtenteils um PVC.

Die Qualität von Rezyklaten ist letztlich abhängig von der Qualität des Inputmaterials. Wird die Recyclingfähigkeit eines Kunststoffprodukts bereits vor dessen Produktion eingeplant (Stichwort Design-for-Recycling) und beispielsweise auf eine Minimierung der Anzahl unterschiedlicher genutzter Materialien in einer Verpackung oder auf eine Minimierung der Materialeinfärbung gedacht, erleichtert dies am Ende des Produktlebens die Herstellung hochwertiger Rezyklate. Zusätzlich gesteigert werden könnte die Qualität bei Rezyklaten etwa durch eine erhöhte Aufklärung der Verbraucher bezüglich der Getrennsammlung von Abfällen. Auch Investitionen in technische Sortier- und Aufbereitungsprozesse können die Abfallqualität und somit die Rezyklatqualität erhöhen (Arbeitsgemeinschaft Verpackung + Umwelt e.V. 2019).

Abschließend ist noch auf das Mismatch von anfallenden Kunststoffabfällen und benötigten Rohstoffen im Baubereich zu verweisen. Die dargelegten Zahlen für unterschiedliche Werkstoffe in diesem Kapitel zeigen ein Mismatching vorhandener Abfälle und benötigter Qualitäten bzw. Kunststoffsorten auf. Daraus kann abgeleitet werden, dass unter aktuellen Bedingungen die Möglichkeiten für den Einsatz von Rezyklaten aus der Verpackungsaufbereitung in

Bauprodukten begrenzt sind. Vergleichsweise dazu führt der PVC-Recyclingkreislauf zu relativ hohen baubereichenspezifischen Rezyklateinsatzquoten.

5.3 Rezyklateinsatz

Die Voraussetzungen für den Einsatz von Rezyklaten zur Herstellung von Bauprodukten können sich je nach Anwendungsgebiet des jeweiligen Produkts unterscheiden. Im Jahr 2017 wurden folgende Rezyklateinsatzmengen an Produktionsstandorten in Deutschland erzielt (Lindner, 2018):

- ▶ Straßenbauprodukte: 100–150 kt
- ▶ Fenster- und Türprofile: 100–150 kt
- ▶ Rohre: 50–70 kt
- ▶ Baufolien: 30–60 kt

Im Folgenden sollen die Voraussetzungen für den Rezyklateinsatz erst allgemein, anschließend produktspezifischer anhand einiger Beispiele erläutert werden. Hierfür werden zuerst die Grundanforderungen für Bauwerke, wie sie in der Bauproduktenverordnung der Europäischen Union (Europäische Kommission 2011c) festgehalten sind, beschrieben. Anschließend wird der aktuelle Einsatz von Kunststoffrezyklaten zur Herstellung von Bauprodukten im Rahmen unterschiedlicher Produktgruppen – speziell aber für Rohrleitungssysteme – dargelegt und untersucht, die Anforderungen für den Rezyklateinsatz betrachtet und Potenziale und Grenzen aufgezeigt.

5.3.1 Grundanforderungen an Bauwerke nach der europäischen Bauproduktenverordnung EU-BauPVO

Als Rechtsverordnung verfolgt die EU-BauPVO das Hauptziel, EU-weite einheitliche Produkt- und Prüfstandards für Bauprodukte zu etablieren und fungiert somit unter anderem als Grundlage für die CE-Kennzeichnung der Produkte und für die Leistungserklärungen der Hersteller. Ihr Inhalt dient der Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten, also EU-weiter einheitlicher Produkt- und Prüfstandards, wodurch das Inverkehrbringen und Vermarkten von Baustoffen und -produkten am europäischen Binnenmarkt für die jeweiligen Hersteller erleichtert werden soll. Die in der Verordnung aufgeführten Festlegungen gelten selbstverständlich auch für Bauprodukte, welche aus Sekundärrohstoffen gefertigt wurden und geben bereits einen ersten Überblick, welche grundsätzlichen Anforderungen ein Bauwerk und seine Teile erfüllen müssen (Europäische Kommission 2011c).

So werden im Anhang I der Bauproduktenverordnung sogenannte Grundanforderungen an Bauwerke aufgelistet, welche die grundlegendsten Anforderungen an Baustoffe und -produkte bzw. an Bauwerke als Gesamtheit beinhalten. Diese Grundanforderungen sind:

- ▶ Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
- ▶ Brandschutz
- ▶ Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
- ▶ Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung
- ▶ Schallschutz

- Energieeinsparung und Wärmeschutz
- Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

Die im Kontext der vorliegenden Studie insbesondere relevante Grundanforderung „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“ lautet wie folgt (Europäische Kommission, 2011c):

7. Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

Das Bauwerk muss derart entworfen, errichtet und abgerissen werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden und insbesondere Folgendes gewährleistet ist:

- a) Das Bauwerk, seine Baustoffe und Teile müssen nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können;*
- b) das Bauwerk muss dauerhaft sein;*
- c) für das Bauwerk müssen umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden.*

Somit ist der Rezyklateinsatz grundsätzlich ein Ziel, das der Gesetzgeber anstrebt. Hierbei jedoch müssen unter dem Nachhaltigkeitsaspekt die Dauerhaftigkeit von Bauwerken und die Umweltverträglichkeit der eingesetzten Sekundärrohstoffe genauso wie alle anderen Grundanforderungen gewährleistet werden.

Die harmonisierten technischen Spezifikationen, welche (wie zu Beginn dieses Berichts erläutert) bereits für zahlreiche Bauprodukte existieren und in welchen die wesentlichen Merkmale des jeweiligen Bauprodukts in EU-einheitlicher Form beschrieben werden, orientieren sich an den oben genannten Grundanforderungen für Bauwerke und tragen zu deren Einhaltung bei. Die Sinnhaftigkeit des Einsatzes von Rezyklaten lässt sich somit fallspezifisch durch Beurteilung einer möglichen Nicht-Erfüllung von wesentlichen Merkmalen in technischen Spezifikationen beurteilen.

5.3.2 Allgemeine Voraussetzungen für den Einsatz von Rezyklaten

Die Recyclingfähigkeit von Kunststoffen wird durch unterschiedliche Eigenschaften beeinflusst. Da Kunststoffabfälle vor allem im Post-Consumer-Bereich einerseits in Form eines heterogenen Gemisches anfallen und die verschiedenen Kunststoffsorten häufig nur sehr schlecht untereinander mischbar sind, ist eine Separierung in einzelne Kunststofffraktionen (beispielsweise durch eine Nahinfrarot-Spektroskopie) in der Regel eine zwingende Voraussetzung für die Herstellung eines qualitativ hochwertigen Rezyklats. Die enorme Vielfalt an verwendeten Kunststoffsorten, Blends, Farb- und Zusatzstoffen und Additiven erschwert diesen Schritt häufig deutlich. Tabelle 10 gibt einen Überblick darüber, wie gut die Verträglichkeit beim Mischen von zwei verschiedenen Kunststofftypen ist. So lässt sich beispielsweise PVC gut mit PMMA mischen, ohne die verarbeitungstechnischen oder mechanischen Eigenschaften signifikant herabzusetzen. Eine Mischung von PVC mit PP, PE oder PET ist hingegen nicht möglich. Gleichzeitig müssen die Kunststoffabfälle von Verschmutzungen und Störstoffen befreit werden. Neue Entwicklungen in der Sortiertechnik bieten hier vielversprechende Lösungen, welche mittels NIR-Verfahren nicht erzielt werden können. Ein Beispiel sind sogenannte Tracer-Based-Sorting Verfahren. Kunststoffprodukte können z. B. mit Fluoreszenzmarkern versehen und somit eindeutig identifiziert werden. Der Sortierprozess ist nicht mehr kaskadisch über mehrere Stufen, sondern kann direkt, ähnlich dem Briefsortierverfahren, erfolgen (Moesslein 2020).

Tabelle 10: Verträglichkeitsmatrix für die Mischbarkeit verschiedener Kunststoffe

	PS	ABS	PA	PC	PMMA	PVC	PP	PE	PET
PS		6	5	6	4	6	6	6	5
ABS	6		6	2	1	3	6	6	5
PA	5	6		6	6	6	6	6	5
PC	6	2	6		1	5	6	6	1
PMMA	4	1	6	1		1	6	6	6
PVC	6	3	6	5	1		6	6	6
PP	6	6	6	6	6	6		6	6
PE	6	6	6	6	6	6	6		6
PET	5	5	5	1	6	6	6	6	

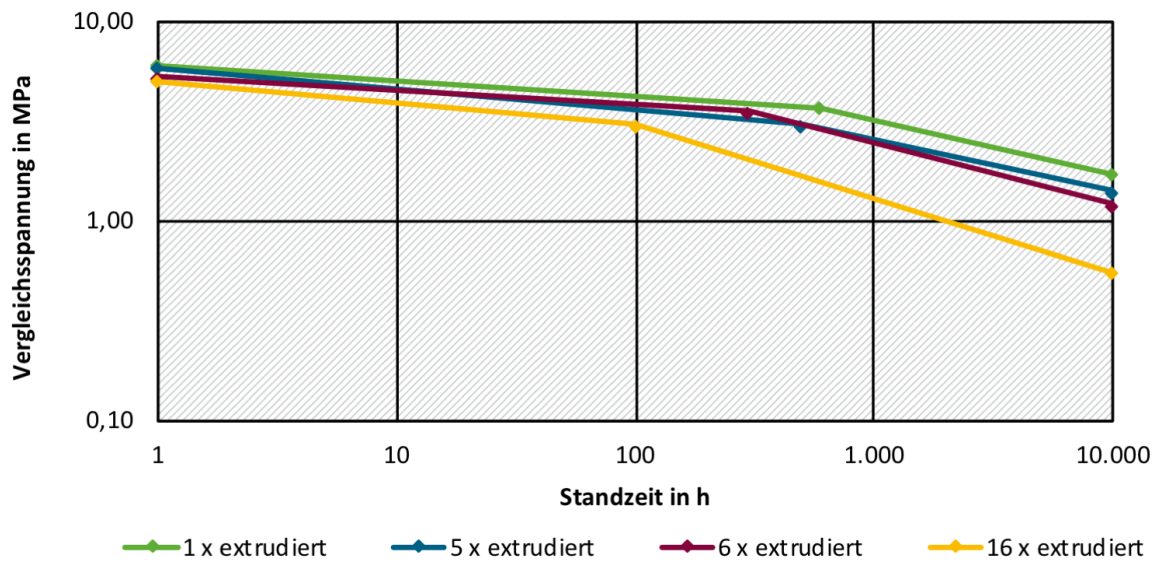
Legende: 1 = gut mischbar; 6 = schlecht mischbar

Quelle: Eigene Darstellung nach (Martens und Goldmann 2016)

Durch den oxidativen Abbau der Polymere, welcher unter Einwirkung von Luftsauerstoff, Wärme oder UV-Strahlung bereits bei der Verarbeitung, der Lagerung und beim Gebrauch von Kunststoffprodukten auftritt, kann es im Laufe der Zeit zudem zu einer Verschlechterung der Werkstoffkennwerte kommen. In der Literatur wird in diesem Zusammenhang im Anwendungsbereich Rohre darauf hingewiesen, dass bei jedem Wiederaufbereitungsschritt von Kunststoffen speziell die Langzeitkennwerte/-eigenschaften deutlich abnehmen. Besonderes Augenmerk wird dabei auf das Zeitstandverhalten unter Innendruck gelegt (Winkler 2020). Mit der Prüfung wird die Vergleichsspannung im Verlauf der Zeit betrachtet. Die Vergleichsspannung ist ein wichtiger Parameter zur Sicherstellung der mechanischen Anforderungen. Fällt dieser Parameter unter einen definierten Wert, kann nicht garantiert werden, dass das Rohr einer auftretenden Druckbelastung standhalten kann, d.h. es wird aller Voraussicht nach platzen. In der Abbildung 22 ist die Vergleichsspannung in Relation zur Standzeit in Abhängigkeit der Extrusionsdurchläufe dargestellt. Es ist sichtbar, dass die Vergleichsspannung ab einer Standzeit von circa 102 h deutlich abnimmt. Dieses Phänomen wird verstärkt, umso häufiger der Kunststoff extrudiert wird.

Auch kann ein erhöhter Einsatz von Rezyklat negative optische Eigenschaften (z. B. fehlender Glanz oder Transparenz) des aus Rezyklat gefertigten Produkts oder veränderte Verarbeitungseigenschaften (z. B. Schmelztemperatur, Viskosität) zur Folge haben (Maile und Roos 2015; Martens 2011). Durch eine Oberflächenbehandlung können einfache Materialfehler und -unstimmigkeiten behoben werden. Angewandte Verfahren sind hier beispielsweise Strahlen, Lasern, Lackierung, PVD-Beschichtung und Metallisierung. Zudem kommen auch Dekorfolien zum Einsatz, um eine Homogenisierung der Oberflächenoptik zu erzielen.

Abbildung 22: Zeitstand-Innendruckverhalten an Rohren aus unterschiedlich häufig extrudiertem PE



Quelle: Eigene Darstellung nach (Maile und Roos 2015) SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Darüber hinaus sind auch verfahrenstechnische Aspekte beim Rezyklateinsatz von entscheidender Bedeutung. Im Folgenden sind diese detailliert aufgeführt:

1. Filtration:

Unabhängig davon, für welche Anwendung das Kunststoffrezyklat bestimmt ist, ist eine gründliche Filtration der Kunststoffschmelze nötig. Dieser Aufbereitungsschritt ist nötig, um vorhandene Störstoffe zu entfernen und somit das Qualitätsniveau des Rezyklates anzuheben (Erema 2016).

2. Neu- und Nachjustierung:

Wird von Neuware auf Rezyklat umgestellt bzw. ist Rezyklat anteilig zugemischt, ist eine Anpassung der Prozessparameter nötig. Eine Neujustierung der Anlagenapparatur ist häufig zeit- sowie kostenintensiv und erfordert eine hohe Expertise. Zudem ist es aufgrund möglicher Inhomogenitäten in Rezyklaten sinnvoll, die Extrusion durch optimierte Geometrien der Förderschnecken, Doppelschnecken und eine Viskositätsregelung zu unterstützen.

3. Erhöhte Komplexität:

Gerade im Bereich der Profile (z. B. Fenster) und Rohre wird beim Einsatz von Rezyklat auf das Verfahren der Co-Extrusion zurückgegriffen. Der Extruder ist dabei so ausgelegt, dass Primär- und Sekundärkunststoff in mehreren Schichten verarbeitet werden. Der Kern besteht dabei aus Rezyklat, die Außenschicht aus Neuware. Würde reine Neuware verarbeitet werden, wäre die Komplexität der Apparatur geringer. Zudem müssen deutlich mehr Prozessparameter aufeinander abgestimmt werden, was ebenfalls die Komplexität während der Verarbeitung erhöht. Die Firma Engel Austria GmbH, Schwertberg, hat ein ähnliches Verfahren entwickelt, wobei in einem Spritzgussverfahren auf Neuware Recyclingmaterial folgt, so dass das Bauteil außen aus Neuware besteht, die innen mit Recyclingkunststoff aufgefüllt wird. Diese Technologie ist unter dem Namen *skinmelt* auf dem Markt und ermöglicht komplexe Bauteilgeometrien bei gleichzeitig hohem Rezyklatanteil. Bei diesem Verfahren werden die beiden Schmelzen bereits vor dem Einspritzen zusammengeführt, wobei die Neuware als erstes

die Kavität erreicht und von der nachströmenden Rezyklatschmelze verdrängt wird. Dadurch wird die Neuware an die Wandung der Kavität gepresst, während sich parallel dazu der Kern mit der Rezyklatschmelze füllt.

Abschließend sind die Voraussetzungen sowie Hemmnisse hinsichtlich des Einsatzes von Kunststoffrezyklaten zusammengefasst und stichpunktartig dargestellt:

Voraussetzungen für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten:

- ▶ Gut sortierte Chargen
- ▶ Möglichst wenig Störstoffe und Verunreinigungen
- ▶ Möglichst geringe Degradierung der Polymerketten
- ▶ Erfüllung der bautechnischen Normen und Kundenanforderungen
- ▶ Gute Verarbeitbarkeit
- ▶ Modifizierte Verfahrens- / Anlagentechnik

Hemmnisse beim Einsatz von Kunststoffrezyklaten:

- ▶ Häufig heterogene Kunststoffabfälle (v.a. im Post-Consumerbereich)
- ▶ Teilweise starke Verunreinigungen (v.a. Lebensmittelverpackungen, Kunststoffprodukte Tiefbau)
- ▶ Oxidativer Abbau der Polymere durch Umwelteinwirkungen unter langer Lebensdauer (Mechanik)
- ▶ Negative optische Eigenschaften (fehlender Glanz oder Transparenz, eingeschränkte Farbauswahl)
- ▶ Geringe Preisunterschiede zwischen Rezyklat und Neuware
- ▶ Verfügbarkeiten (Maile und Roos 2015; Winkler 2020)

5.3.3 Einsatz von Rezyklaten in Rohren

An Rohrleitungssysteme aus Kunststoff werden zahlreiche unterschiedliche und etwa vom verwendeten Werkstoff (z. B. PVC-U, PP oder PE) oder von der Anwendungsart (z. B. Abwasserrohr, Trinkwasserrohr oder Gasversorgungsrohr) des Rohres abhängige Qualitätsanforderungen gestellt. Hersteller von Kunststoffrohren lassen ihre Produkte daher in der Regel durch eine befugte Stelle freiwillig zertifizieren und liefern dadurch einen fundierten Nachweis bezüglich der in den einschlägigen Normen geforderten Qualitätsanforderungen.

Anforderungen werden innerhalb der einschlägigen Normen beispielsweise an geometrische, mechanische oder physikalische Eigenschaften, aber auch an die Farbe oder die Beschaffenheit des Rohres gestellt. Gleichzeitig benennen die jeweiligen Normen entsprechende Prüfverfahren und -parameter, um die Rohrleitungssysteme auf die Einhaltung der jeweiligen Anforderungen prüfen zu können. Im Folgenden sind exemplarisch verschiedene Eigenschaften und Anforderungen von Rohrleitungssystemen aber auch Kabelschächte aus unterschiedlichen

Materialien und mit unterschiedlicher Anwendungsart abgebildet. Um eine bessere Übersichtlichkeit zu ermöglichen, wurde auf die Abbildung der spezifischen Prüfparameter und Prüfverfahren verzichtet. Diese können in den entsprechenden Normen nachgelesen werden.

Tabelle 11: Beispielhafte Anforderungen an Kunststoffrohre für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen aus PVC-U, entnommen aus DIN EN 1401

DIN EN 1401	
Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen – Weichmacherfreies Polyvinylchlorid (PVC-U)	
Eigenschaft	Anforderung
PVC-U-Gehalt	$\geq 80 \%$
Widerstandsfähigkeit gegen Innendruck	Kein Versagen während der Prüfdauer
Widerstandsfähigkeit gegen äußere Schlagbeanspruchung (Umfangsverfahren)	$TIR \leq 10 \%$
Dichte	$1350 \text{ kg/m}^3 \leq \text{Dichte} \leq 1600 \text{ kg/m}^3$
Längsschrumpfung	$\leq 5 \%$, keine Risse oder Blasen
Vicat-Erweichungstemperatur (VST)	$VST \geq 79 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Einachsiger Zugversuch	Bruchdehnung $\geq 80 \%$
Beständigkeit gegen Dichlormethan bei einer festgelegten Temperatur	Kein Angriff
Maximal zulässiger Anteil von Umlaufmaterial	100 %
Maximal zulässiger Anteil von Rücklaufmaterial und Rezyklat mit vereinbarter Spezifikation	20 %
Zulässige Grenzabweichung für Rücklaufmaterial und Rezyklat: Dichte	$\pm 20 \text{ kg/m}^3$
Zulässige Grenzabweichung für Rücklaufmaterial und Rezyklat: Vicat-Erweichungstemperatur (VST)	$\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
PVC-U-Gehalt	$\pm 4 \%$ (Massenanteil)
Ursprung des Materials	PVC-U-Produkte

Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN 1401

Bei den profilierten Rohren für erdverlegte, drucklose Abwasserkanäle und -leitungen darf bei PVC-U auf Rücklaufmaterial und Rezyklat, das von Rohren und Formstücken aus PVC-U stammt, zurückgegriffen werden (dieses darf allein verwendet werden oder dem Neumaterial oder Umlaufmaterial oder einer Mischung dieser beiden Materialien zugesetzt werden, sofern alle anderen Anforderungen der Norm dabei erfüllt werden). Rücklaufmaterial und Rezyklat aus anderen PVC-U-Erzeugnissen als Rohre und Formstücke darf entweder in einer festgelegten

Mittelschicht von bestimmten Rohrtypen eingesetzt werden oder dem Neumaterial oder dem Umlaufmaterial oder einer Mischung aus den beiden Materialien zugesetzt werden, wenn es die in Tabelle 12 aufgeführten Anforderungen erfüllt. Da für profilierte Rohre für erdverlegte, drucklose Abwasserkanäle und -leitungen aus PP und aus PE ein Einsatz von Rücklaufmaterial und/oder Rezyklat, das aus anderen Erzeugnissen als PP-Rohren oder PP-Formstücken bzw. entsprechend PE-Rohren oder PE-Formstücken stammt, (im Gegensatz zu PVC-U) ausgeschlossen ist, zeigt Tabelle 13 ergänzend die Anforderungen und Bedingungen, die das entsprechende Rücklaufmaterial und Rezyklat aus Rohren und Formteilen erfüllen muss.

Tabelle 12: Beispielhafte Anforderungen für Rohrleitungssysteme mit profilierter Wandung aus PVC-U, PP und PE unter spezieller Berücksichtigung der Anforderungen an Rezyklate und Rücklaufmaterialien, entnommen aus DIN EN 13476

DIN EN 13476	
Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen – Rohrleitungssysteme mit profilierter Wandung aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U), Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE)	
PVC-U (Anforderungen an Rücklaufmaterial und Rezyklat aus anderen Quellen als bei den Rohren und Formstücken aus PVC-U)	
Eigenschaft	Anforderung
Dichte	$1390 \text{ kg/m}^3 \leq \text{Dichte} \leq 1700 \text{ kg/m}^3$
Ascherückstand als Inhalt des Füllstoffs	PVC-U Anteil bei Rohren mindestens 80 %; bei Ersetzen von PVC durch CaCO_3 kann der PVC-Gehalt auf 60 % bzw. 75 % (je nachdem ob Mittel- oder Außenschicht) reduziert werden
K-Wert*	$56 \leq \text{K-Wert} \leq 70$
Vicat-Erweichungstemperatur	$\geq 62 \text{ }^\circ\text{C}$
Korngröße	$> 1000 \text{ }\mu\text{m}$: $\leq 15 \%$ (Masseanteil) $< 1400 \text{ }\mu\text{m}$: 100 % (Masseanteil)
Verunreinigungen	$\leq 0,15 \%$
PP (Anforderungen an Rücklaufmaterial und Rezyklat aus Rohren und Formstücken aus PP)	
Eigenschaft	Anforderung
Dichte	$> 900 \text{ kg/m}^3$
Ascherückstand	Mittelschicht A1-Rohr $\leq 40 \%$ alle anderen Schichten $\leq 25 \%$
Schmelzflussrate (MFR)	$\leq 1,5 \text{ g/10 min}$
Fremd-Polymere	$\leq 5 \%$
Art des Pigments und/oder der Zusatzstoffe	Maschengröße ist zwischen Hersteller und Lieferanten zu vereinbaren

DIN EN 13476	
Verunreinigungen	Maschengröße ist zwischen Hersteller und Lieferanten zu vereinbaren
thermische Stabilität OIT	≥ 8 min
flüchtige Stoffe	≤ 300 mg/kg
PE (Anforderungen an Rücklaufmaterial und Rezyklat aus Rohren und Formstücken aus PE)	
Eigenschaft	Anforderung
Dichte	> 930 kg/m ³
Ascherückstand	Mittelschicht A1-Rohr ≤ 40 % alle anderen Schichten ≤ 25 %
Schmelzflussrate (MFR)	$\leq 1,6$ g/10 min
Fremd-Polymere	≤ 5 %
Art des Pigments und/oder der Zusatzstoffe	zwischen dem Hersteller und Lieferanten zu vereinbaren
Verunreinigungen	Korngröße ist zwischen dem Hersteller und Lieferanten zu vereinbaren
thermische Stabilität OIT	≥ 20 min
flüchtige Stoffe	≤ 300 mg/kg

* „Der K-Wert ist - wie die Viskositätszahl - eine die mittlere Molmasse (Molekülkettenlänge) kennzeichnende Größe. Er wird nach einer im Jahre 1929 von Fikentscher angegebenen Gleichung aus dem Viskositätsverhältnis berechnet. Letzteres ist übrigens auch die experimentelle Grundlage für die Berechnung von Viskositätszahlen. Die Rangfolge einer Gruppe von Produkten in Bezug auf Kennzeichnung der Molmasse ist also bei K-Wert und Viskositätszahl gleich. Es hat lediglich historische Gründe, dass zur Kennzeichnung der Molmasse von PVC der K-Wert immer noch angewandt wird. Üblicherweise wird das Molekulargewicht von PVC-U mittels des K-Werts bestimmt und liegt für PVC-U-Rohre im Bereich zwischen 60 und 70. Umrechnungstabellen für die Viskositätszahl und den K-Wert finden sich in der EN ISO 1628-2“ (KRV e.V., s.a.).

Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN 13476

Tabelle 13: Beispielhafte Anforderungen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme zum Ableiten von Abwasser (niedriger und hoher Temperatur) innerhalb der Gebäudestruktur aus PE unter spezieller Berücksichtigung der Anforderungen an Rezyklate und Rücklaufmaterialien, entnommen aus DIN EN 1519-1

DIN EN 1519-1	
Kunststoff-Rohrleitungssysteme zum Ableiten von Abwasser (niedriger und hoher Temperatur) innerhalb der Gebäudestruktur - PE	
Eigenschaft	Anforderung
Zeitstand-Innendruck-Verhalten	kein Versagen während der Prüfung
Schmelz-Massefließrate	$0,2 \text{ g/10 min} \leq \text{MFR (190/5)} \leq 1,1 \text{ g/10 min}$
Thermische Stabilität OIT	$\geq 20 \text{ min}$
Ringsteifigkeit ausschließlich für Anwendungsgebiet "BD"	$\geq 4 \text{ kN/m}^2$
Längsschrumpf	$\leq 3 \%$, keine Risse oder Blasen
Schmelze-Massefließrate (MFR)	$0,2 \text{ g/10 min}$
Maße	Maße nach ISO 3126 bestimmen, genaueres siehe Tabelle in DIN Norm
Wanddicke	s. Tabelle in DIN
Beschaffenheit	glatt, sauber, frei von Riefen, Blasen, Verunreinigungen, Poren, Unregelmäßigkeiten; Enden senkrecht zur Rohrachse geschnitten und gratfrei
Farbe	durchgehende Einfärbung, vorzugsweise in schwarz, andere Farbtöne zulässig
Umlaufmaterial, Rücklaufmaterial, Rezyklat	
Umlaufmaterial	sauberes Umlaufmaterial von Rohrleitungsteilen, die dieser Norm oder EN 12201-2, EN 12201-3, EN 1555-2, EN 1555-3 oder EN 12666-1 entsprechen, uneingeschränkt zugelassen
Material von anderen PE-Erzeugnissen als Rohre und Formstücke	nicht erlaubt
Rücklaufmaterial von Rohren und Formstücken von anderen Werkstoffen als Neumaterial	
Dichte	mit Lieferanten zu vereinbaren
thermische Stabilität OIT	mit Lieferanten zu vereinbaren
MFR	mit Lieferanten zu vereinbaren
Aschenrückstand	$\leq 25 \%$

DIN EN 1519-1	
fremde Polymere	≤ 5 %
Verunreinigungen	mit Lieferanten zu vereinbaren
Art der Pigmente und/oder Additive	mit Lieferanten zu vereinbaren
flüchtige Bestandteile	≤ 300 mg/kg
Ursprung	PE-Rohre/Formstücke, kein anderer Ursprung

Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN 1519-1

Tabelle 14: Beispielhafte Anforderungen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen aus PP unter spezieller Berücksichtigung der Anforderungen an Rezyklate und Rücklaufmaterialien, entnommen aus DIN EN 1852-1

DIN EN 1852-1	
Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte, drucklose Abwasserkanäle und -leitungen - PP	
Eigenschaft	Anforderung
Schmelzfließrate (MFR)	MFR (230/2,16) ≤ 1,5 g/10 min
Widerstandsfähigkeit gegen inneren Überdruck	kein Versagen während der Prüfdauer
Thermische Stabilität (OIT)	≥ 8 min
Elastizitätsmodul von PP-Formmassen	1250 Mpa ≤ E (1min) ≤ 2500 Mpa
mittlere Dichte	0,9 g/cm ³
mittlerer Längenausdehnungskoeffizient	0,14 mm/mK
Wärmeleitfähigkeit	0,2 * 1/(WK*m)
spezifische Wärmekapazität	2000 J/kgK
Oberflächenwiderstand	> (10 ¹²) Ω
Schmelze-Massefließrate (MFR)	0,2 g/10 min
Längsschrumpf	≤ 2 %, keine Risse oder Blasen

DIN EN 1852-1	
Ringsteifigkeit	je nach SN
Widerstandsfähigkeit gegen äußere Schlagbeanspruchung (Umfangsverfahren)	$TIR \leq 10 \%$
Widerstandsfähigkeit gegen äußere Schlagbeanspruchung (Stufenverfahren)	H50-Wert ≥ 1 m, max. ein Bruch unterhalb 0,5 m
Maße	Maße nach ISO 3126 bestimmen, genaueres siehe Tabelle in DIN Norm
Wanddicke	s. Tabelle in DIN
Beschaffenheit	glatt, sauber, frei von Riefen, Blasen, Verunreinigungen, Poren, Unregelmäßigkeiten; Enden senkrecht zur Rohrachse geschnitten und gratfrei
Farbe	durchgehende Einfärbung, vorzugsweise in schwarz, orangebraun oder staubgrau, andere Farbtöne zulässig

Rücklaufmaterial und Rezyklat – Eigenschaften, die in der vereinbarten Spezifikation berücksichtigt werden müssen

Dichte	mit Lieferanten zu vereinbaren
thermische Stabilität OIT	mit Lieferanten zu vereinbaren
MFR	mit Lieferanten zu vereinbaren
Aschenrückstand	mit Lieferanten zu vereinbaren
fremde Polymere	$\leq 5 \%$
Verunreinigungen	mit Lieferanten zu vereinbaren
Art der Pigmente und/oder Additive	mit Lieferanten zu vereinbaren
flüchtige Bestandteile	≤ 300 mg/kg
Ursprung	PP-Rohre/Formstücke, kein anderer Ursprung

Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN 1852-1

Tabelle 15: Beispielhafte Anforderungen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Warm- und Kaltwasserinstallation aus PP unter spezieller Berücksichtigung der Anforderungen an Rezyklate und Rücklaufmaterialien, entnommen aus DIN EN 15874-2

DIN EN 15874-2	
Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Warm- und Kaltwasserinstallation - PP	
Eigenschaft	Anforderung
Längsschrumpf	$\leq 2 \%$
Thermische Stabilität bei Innendruckprüfung	kein Brechen während Prüfdauer
Verhalten unter Schlagbeanspruchung	$\leq 10 \%$
Schmelze-Massefließrate (Granulat)	$\leq 0,5 \text{ g/10 min}$
Schmelze-Massefließrate (Rohr)	30 % als maximaler Unterschied im Vergleich zum Granulat aus selber Charge
Widerstandsfähigkeit gegen Innendruck	kein Versagen während der Prüfdauer
Allgemeines	Maße nach ISO 3126 bestimmen
Maße, Wanddicken	siehe Tabellen in DIN
Beschaffenheit	Innen- und Außenfläche glatt, sauber, frei von Riefen, Blasen, anderen Inhomogenitäten; keine sichtbaren Verunreinigungen; geringe Farbabweichungen zulässig; Rohrenden müssen senkrecht zur Rohrachse sein
Opazität	als opak bezeichnete PP-Rohre dürfen bei Prüfung nach ISO 7686 nicht mehr als 0,2 % sichtbares Licht durchlassen
Umlauf- und Rücklaufmaterial	Verwendung von Umlaufmaterial aus Herstellung und Prüfung von Erzeugnissen nach dieser Norm zulässig, Rücklaufmaterial und Rezyklate nicht erlaubt (s. 15874-1, 5.3)

Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN 15874-2

Tabelle 16: Beispielhafte Anforderungen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Gasversorgung aus PE unter spezieller Berücksichtigung der Anforderungen an Rezyklate und Rücklaufmaterialien, entnommen aus DIN EN 1555-2

DIN EN 1555-2	
Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Gasversorgung - PE	
Eigenschaft	Anforderung
Längsschrumpf (Wanddicke ≤ 16 mm)	≤ 3 %, ursprüngliche Beschaffenheit muss erhalten bleiben
Schmelze-Massefließrate (MFR)	nach Verarbeitung darf die Abweichung von dem zur Herstellung des Rohres verwendeten Los gemessenen Wert höchstens (+/-) 20 % betragen
Oxidations-Induktionszeit (thermische Stabilität)	≥ 20 min
Zielstand-Innendruckverhalten bei 20 °C, 100 h	kein Versagen während der Prüfdauer
Zielstand-Innendruckverhalten bei 80 °C, 165 h	kein Versagen während der Prüfdauer
Zielstand-Innendruckverhalten bei 80 °C, 1000 h	kein Versagen während der Prüfdauer
Bruchdehnung	≥ 350 %
Widerstand gegen langsames Risswachstum PE 80 und 100 $e \leq 5$ mm (Cone-Test)	≤ 10 mm/Tag
Widerstand gegen langsames Risswachstum PE 80 und 100 $e > 5$ mm (Prüfung an gekerbten Rohren)	kein Versagen während der Prüfdauer
Widerstand gegen langsames Risswachstum PE 100-RC Dehnungsverfestigungsprüfung (gepresste Tafel, die aus dem Mahlgut von Rohren hergestellt wurde)	$< G(p) > 50$ Mpa
Widerstand gegen langsames Risswachstum PE 100-RC (beschleunigte Prüfung an gekerbten Rohren) 110 mm SDR 11	kein Versagen während der Prüfdauer
Widerstand gegen langsames Risswachstum PE 100-RC Prüfung an gekerbten Rundstab (aus einem Rohr herausgearbeitet, $e > 16$ mm)	$\geq 1,5 \times 10^6$ Zyklen

DIN EN 1555-2	
110 mm SDR 11	
Widerstand gegen schnelle Rissfortpflanzung	$p_c \geq 1,5 \text{ MOP}$ mit $p_c = 3,6$ pc, s 4 + 2,6
Allgemeines	Maße nach ISO 3126 bestimmen
Maße, Wanddicken	siehe Tabellen in DIN
Beschaffenheit	Innen- und Außenfläche glatt, sauber, frei von Riefen, Blasen, anderen Oberflächenfehler; Rohrenden müssen senkrecht zur Rohrachse sein
Farbe	müssen schwarz (PE 80, 100, 100-RC), gelb (PE 80), orange (PE 100, 100-RC); außerdem dürfen schwarze PE 80-Rohre mit gelben Streifen und schwarze PE 100- und 100-RC-Rohre, je nach Präferenz mit gelben und orangefarbenen Streifen identifiziert werden; zusätzliche Sonderregelungen für koextrudierte Rohre
Rezyklateinsatz	Aus externen Quellen verboten

Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN 1555-2

Tabelle 17: Beispielhafte Anforderungen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen - PVC-U, PP, PE: Anforderungen an Schächte und Zubehörteile mit geringer Einbautiefe, entnommen aus DIN EN 13598

DIN EN 13598	
Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen - PVC-U, PP, PE: Anforderungen an Schächte und Zubehörteile mit geringer Einbautiefe	
Eigenschaft	Anforderung
Werkstoffeigenschaften	muss den Anforderungen aus EN 1401-1, EN 12666-1, EN 13476-1, EN 13476-3 und EN 14758 entsprechen
Aussehen	glatt, sauber, frei von Riefen, Blasen, Verunreinigungen, Poren, Unregelmäßigkeiten; Einsteckenden müssen sauber geschnitten werden und Enden von Rohren und Formstücken senkrecht ihrer Achse verlaufen
Farbe	bei Herstellung in Schichten muss die Einfärbung der Innen- und Außenschicht durchgehend gleichmäßig sein; Außenschicht vorzugsweise schwarz, orangebraun, staubgrau, andere Farbtöne zulässig
Allgemein	Maße nach ISO 3126 bestimmen, genaueres siehe Tabelle in DIN Norm
Maße	s. Tabelle in DIN EN 13598
Steifigkeit des Steigrohrs (Einbautiefe $\leq 1,25$ m)	kein Riss oder Bruch, Steifigkeit $\geq 0,7$ kN/m ²
Steifigkeit des Steigrohrs (Einbautiefe $> 1,25$ m und $\leq 2,0$ m)	kein Riss oder Bruch, Steifigkeit $\geq 2,0$ kN/m ²
Beständigkeit gegen Unterdruck	Keine Beschädigung des Kontrollschachtes, die zur Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit führt
Widerstandsfähigkeit gegen senkrechte Belastung	Horizontale Verformung nicht mehr als 6 %, kein Riss oder Bruch, Verformung der Abdeckung muss EN 1253-2 entsprechen
Physikalische Eigenschaften	physikalischen Eigenschaften von Spritzgusszubehörteilen müssen EN 1401-1, EN 1852-1, EN 12666-1, EN 13476-1, EN 13476-3 oder EN 14758-1 entsprechen
Umlaufmaterial aus Produkten, die diese Norm erfüllen	ohne zusätzliche Anwendungen möglich

Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN 13598

Tabelle 18: Beispielhafte Anforderungen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen - PVC-U, PP, PE: Anforderungen an Schächte und Zubehörteile mit geringer Einbautiefe unter spezieller Berücksichtigung der Anforderungen an Rezyklate und Rücklaufmaterialien, entnommen aus DIN EN 13598

DIN EN 13598	
Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen - PVC-U, PP, PE: Anforderungen an Schächte und Zubehörteile mit geringer Einbautiefe	
PE	
Mindesteigenschaften der vereinbarten Spezifikationen	
Eigenschaft	Anforderung
Dichte	mit Lieferanten zu vereinbaren
Thermische Stabilität OIT	mit Lieferanten zu vereinbaren
Schmelz-Massefließrate MFR	mit Lieferanten zu vereinbaren
Ascherückstand	mit Lieferanten zu vereinbaren
Fremd-Polymere	mit Lieferanten zu vereinbaren
Verunreinigungen	mit Lieferanten zu vereinbaren
Art der Pigmente/ Additive	mit Lieferanten zu vereinbaren
Flüchtige Bestandteile	≤ 300 mg/kg
Eigenschaften von Werkstoffen, die kein Neumaterial sind	
Rotationsguss	
Eigenschaft	Anforderung
max. Abweichung vom angegebenen Wert in [kg/m ³]	(+/-) 25
max. Abweichung vom angegebenen Wert in [min]	≥ 10
max. Abweichung vom angegebenen Wert	Nicht anwendbar
max. Abweichung vom angegebenen Wert in [g/10 min]	Y > 1,5: +20 % Y ≤ 1,5: +0,3
max. Abweichung vom angegebenen Wert in [%]	(+) 10 % des angegebenen Werts
Spritzguss	
Werte ident mit Rotationsguss	

DIN EN 13598

PP

Mindesteigenschaften der vereinbarten Spezifikationen	
Eigenschaft	Anforderung
Dichte	mit Lieferanten zu vereinbaren
Thermische Stabilität OIT	mit Lieferanten zu vereinbaren
Schmelz-Massefließrate MFR	mit Lieferanten zu vereinbaren
Ascherückstand	mit Lieferanten zu vereinbaren
Fremd-Polymere	mit Lieferanten zu vereinbaren
Verunreinigungen	mit Lieferanten zu vereinbaren
Art der Pigmente/ Additive	mit Lieferanten zu vereinbaren
Dichte	mit Lieferanten zu vereinbaren
Eigenschaften von Werkstoffen, die kein Neumaterial sind	

Rotationsguss

Eigenschaft	Anforderung
max. Abweichung vom angegebenen Wert in [kg/m ³]	(+/-) 25
max. Abweichung vom angegebenen Wert in [min]	≥ 8
max. Abweichung vom angegebenen Wert	Nicht anwendbar
max. Abweichung vom angegebenen Wert in [g/10 min]	Y > 1,5: +20 % Y ≤ 1,5: +0,3
max. Abweichung vom angegebenen Wert in [%]	(+) 10 % des angegebenen Werts

Spritzguss

Werte ident mit Rotationsguss

PVC-U

Mindesteigenschaften der vereinbarten Spezifikationen	
Eigenschaft	Anforderung

DIN EN 13598	
PVC-U-Gehalt oder Füllmittelgehalt nach Ascherest	mit Lieferanten zu vereinbaren
Dichte	mit Lieferanten zu vereinbaren
Victat-Erweichungstemperatur	mit Lieferanten zu vereinbaren
Korngröße	Prüfverfahren (z. B. EN 15346) mit
Verunreinigung	Prüfverfahren (z. B. EN 15346) mit Lieferanten absprechen und festhalten
Herkunft des Materials	PVC-U-Produkte

Eigenschaften von Werkstoffen, die kein Neumaterial sind

Spritzguss	
Eigenschaft	Anforderung
max. Abweichung vom angegebenen	(+/-) 25
max. Abweichung vom angegebenen Wert in [min]	NA
max. Abweichung vom angegebenen	(+/-) 3
max. Abweichung vom angegebenen Wert in [g/10 min]	Nicht anwendbar
max. Abweichung vom angegebenen Wert in [%]	(+) 10 % des angegebenen Werts

Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN 13598

Für die Herstellung von Trinkwasserrohren lassen die aktuellen Normen derzeit kein Rücklaufmaterial und kein Rezyklat zu. Konkret ist dies in den Normen DIN EN ISO 15874 (für Kunststoffrohrleitungssysteme für die Warm- und Kaltwasserinstallation aus PP), in DIN EN ISO 15876 (für Kunststoffrohrleitungssysteme für die Warm- und Kaltwasserinstallation aus PB), in DIN EN ISO 15877 (für Kunststoffrohrleitungssysteme für die Warm- und Kaltwasserinstallation aus PVC-C) oder in DIN EN ISO 22391 (Kunststoffrohrleitungssysteme für die Warm- und Kaltwasserinstallation aus PE) festgelegt. Nach Meinung von Fachexperten ist dies in der problematischen technischen Umsetzbarkeit begründet, welche sich daraus ergibt, dass Trinkwasserrohre druckbelastet sind. Andere mechanische Eigenschaften (z. B. MFR oder Schlagzähigkeit) sind, genauso wie geometrische und farbliche Eigenschaften, deutlich einfacher beeinflussbar und stellen daher keine unmittelbar limitierenden Faktoren dar.

Das Einsatzpotenzial für Rezyklate im Rohrbereich ist insbesondere auch abhängig von der verwendeten Kunststoffsorte. Der Rezyklateinsatz gestaltet sich somit bei Rohren aus PVC-U einfacher als bei Rohrleitungssystemen aus PP oder PE. Dies liegt vor allem daran, dass bei der Herstellung von PVC-U-Rohren die Durchführung einer nachträglichen Stabilisierung

verhältnismäßig einfach durchzuführen ist und ist zudem auch der Grund, weshalb für PVC-U-Rohre, wie in den obigen Tabellen zu sehen, auch andere Ausgangsprodukte aus PVC-U für ein entsprechendes Rezyklat in Frage kommen, während es sich bei PP und PE gemäß DIN EN 1519-1 und DIN 1852-1 ausschließlich um Rücklaufmaterial und Rezyklate aus Rohren und Formteilen handeln darf.

Während für drucklose, erdverlegte Abwasserrohre aus PVC-U in DIN EN 1401 bereits eine Vorgabe für einen maximalen Rücklaufmaterial- und Rezyklateinsatz vorliegt (max. 20 %), werden die entsprechenden Normen für drucklose erdverlegte Abwasserrohre aus PP und PE aktuell überarbeitet und sollen anschließend ebenfalls Angaben im ähnlichen Größenbereich enthalten. Hierbei ist jedoch zugleich anzumerken, dass bereits ein Rezyklatanteil von 20 % als hoch bezeichnet werden kann. Während ein Rezyklatanteil in dieser Größenordnung zwar aus technischer Sicht umsetzbar wäre, scheitert dies in der Regel an der fehlenden Verfügbarkeit an Rezyklaten in entsprechender Qualität. So wird die technische Umsetzbarkeit eines höheren Rezyklatanteils ohne Qualitätsverluste in Rohren derzeit industriell getestet, jedoch ist die Umsetzung einer Massenproduktion nicht möglich, da das entsprechende Rezyklatangebot schlicht zu gering ist (Winkler 2020).

Zusätzlich unterscheiden Hersteller im Rahmen der Rohrproduktion häufig nicht zwischen Abwasserrohren (an welche qualitativ geringere Anforderungen gestellt werden und für welche der Einsatz von Rezyklaten grundsätzlich in Frage käme) und Rohren mit höheren Qualitätsansprüchen (für die ein Rezyklateinsatz ausgeschlossen ist). So werden Abwasserrohre häufig aus demselben Kunststoffmaterial wie druckhaltende Rohre gefertigt, obwohl dieses Material eigentlich für deutlich qualitativ höhere Anwendungen in Frage käme. Der Grund hierfür ist, dass die Inbetriebnahme einer zweiten Produktionslinie wirtschaftlich nicht rentabel ist. Die Ursachen sind im Folgenden stichpunktartig angeführt:

- ▶ Zweite Rezeptur
- ▶ zusätzliche Silos für die Lagerung des zweiten Materials
- ▶ zusätzliche Warenannahme für das Rezyklat
- ▶ Eigenüberwachung sowie Qualitätsüberprüfung des Rezyklats
- ▶ grundsätzliche Betriebsumstellung
- ▶ Verwendung von höherpreisigem Material ist somit insgesamt kostengünstiger

5.3.3.1 Einschätzungen des Kunststoffrohrverbandes zum Rezyklateinsatz in Rohren

Im Bereich der Rohrleitungssysteme werden alte Rohre seit 1994 durch die vom Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie (KRV) vertretenen Hersteller gesammelt und wiederverwertet, wobei die gewonnenen Rezyklate anschließend hauptsächlich in Abwasserrohren, Kabelschutzrohren und Dränrohren eingesetzt werden. Die Menge der im Bereich der Rohre aktuell wiederverwerteten Altware wird laut Aussage des Fachverbands auf rund 40.000 t (Stand 2018) geschätzt. Das im Bereich der Rohrleitungssysteme noch großes Potenzial bezüglich eines vermehrten Einsatzes von Sekundärkunststoffen vorhanden ist wird klar, wenn man die Zielstellung des KRVs für die kommenden Jahre betrachtet, wonach es zu einer Verdopplung der Menge an eingesetzten Rezyklaten bei der Herstellung von Rohrleitungssystemen kommen soll (Ziel: 82.000 t an verwerteter Altware) (KRV Impulse 2019).

Eine höhere Einsatzmenge an Sekundärkunststoffen im Bereich der Rohrleitungssysteme wird aufgrund verschiedener, den Rezyklateinsatz begrenzenden Faktoren als aktuell nicht umsetzbar eingeschätzt. Laut dem KRV gehören zu diesen begrenzenden Faktoren:

- ▶ Schwankende/unzureichende Qualität der Rezyklate
- ▶ Diskontinuierliche Verfügbarkeit der Rezyklate
- ▶ Preisunterschiede zwischen aufwendig und kostspielig hergestellten Rezyklaten und günstiger Neuware
- ▶ Unzureichende mechanische Eigenschaften (insbesondere Festigkeit)
- ▶ Anforderungen der Kunden an die Farbgebung der herzustellenden Produkte
- ▶ Negative Geruchseigenschaften bei den herzustellenden Produkten
- ▶ Nachteile bei der Produktion (höherer Maschinenverschleiß, geringere Produktionsgeschwindigkeit)
- ▶ Stetig steigende Qualitätsanforderungen von Kunden und Regulatoren (KRV o. J.)

Als unabdingbare Voraussetzung zur Erreichung dieses Zieles nennt der KRV die Erfüllung der technischen, regulatorischen und politischen Rahmenbedingungen. Nach dessen Ansicht darf eine Wiederverwertung von Kunststoffherzeugnissen nicht durch die europäische Chemikalienpolitik (Stichwort: REACH) erschwert oder verhindert werden. Auch ein pauschales Einsatzverbot für bestimmte Chemikalien werden als wenig zielführend erachtet.

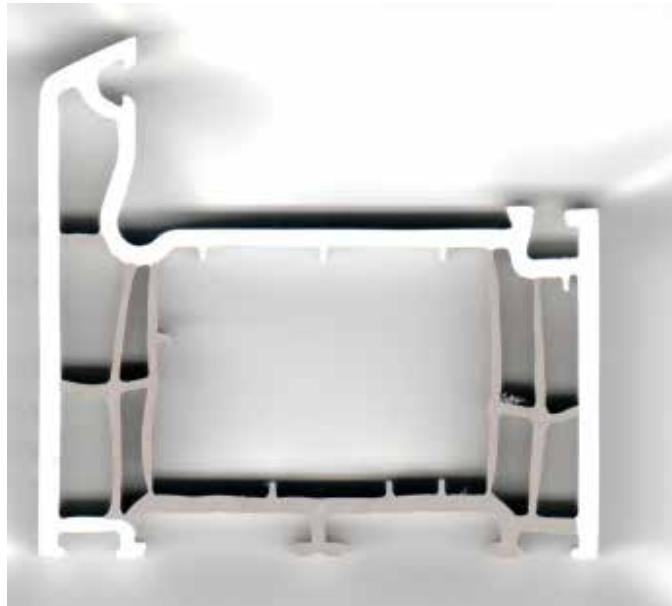
5.3.4 Rezyklateinsatz zur Herstellung von Fensterprofilen

Im Bereich der Profile hat sich besonders bei den Fensterprofilen bereits ein gut funktionierender Materialkreislauf etabliert. Altfenster und Verschnittreste werden hierbei von den Herstellern in Zusammenarbeit mit dem Rewindo Fenster-Recycling-System gesammelt und anschließend in Wiederaufbereitungsanlagen erst geschreddert, dann gereinigt, nach Farbe sortiert und in die unterschiedlichen Materialien aufgetrennt. Hierbei muss etwa darauf geachtet werden, die aus PVC-P bestehende Dichtlippe der Altfenster von dem aus PVC-U bestehenden Fensterprofilen zu trennen, da es sonst zu einer unerwünschten Farbänderung des Rezyklates kommt (Martens und Goldmann 2016). Gleichzeitig müssen sämtliche Bestandteile vorhandener Gummidichtungen vollständig abgetrennt werden, da diese beim Extrudieren nicht schmelzen und beispielsweise unerwünschte Fehler an der Oberflächenbeschaffenheit entstehen würden. Anschließend wird das PVC durch Schmelzfiltration regranuliert und kann als Kunststoffgranulat erneut zur Herstellung von Recycling-Profilen eingesetzt werden. Abhängig von der aktuellen Marktlage und den Rahmenbedingungen kann der ursprüngliche Abfallbesitzer hierbei auch Erlöse erzielen (Holzmann Medien GmbH & Co. KG und GFF 2013; Martens und Goldmann 2016).

In Europa stellen rund 10 %, in Deutschland etwa 18 % des für die Fensterprofilproduktion verwendeten Kunststoffes Rezyklat dar (EPPA 2018). Über den maximalen Rezyklatanteil liegen in der Literatur unterschiedliche Werte vor. Der durchschnittliche, maximale Rezyklatanteil in Fensterprofilen wird häufig mit 50 % angegeben, wobei dieser fertigungstechnisch begrenzt ist, da lediglich der Profilkern – nicht aber die Außenwandung – aus Rezyklatmaterial besteht (siehe auch Abbildung 23) (EPPA 2018). Als Obergrenze für den Rezyklatanteil wird ein Wert von 70 % angenommen, welcher ohne Verfärbung der Außenwandung dann erreicht werden kann, wenn auch in die Außenschicht der Profile Rezyklat extrudiert wird. Durch die Einbringung von

Rezyklat in die Außenschicht wird bei gleichbleibender Wandstärke allerdings die Frischmaterialschiicht dünner, wodurch die Gefahr einer Offenlegung der andersfarbigen Rezyklatschicht (etwa beim Entfernen der Schweißraupe) steigt. Qualitative Unterschiede zwischen Fenstern ausschließlich aus Neumaterial und solchen mit hohem Rezyklatanteil existieren dabei nicht (EPPA 2018).

Abbildung 23: Fensterprofilsystem mit Rezyklatanteil durch Einbringung von Rezyklat in den Profilkern



Quelle: (EPPA 2018)

Eine weitere Erhöhung des Rezyklatanteils bis hin zur Möglichkeit Fensterprofile ausschließlich aus Recyclingmaterial herzustellen ist derzeit wirtschaftlich nicht umsetzbar. Grund hierfür ist, dass die Entwicklung und die Anwendung entsprechender Technologien, welche die Erzeugung eines entsprechend hochwertigen Rezyklats erlauben würden, sehr aufwendig und kostenintensiv wären. Auch das erzeugte Rezyklat würde dadurch so teuer werden, dass dessen Einsatz nicht mehr wirtschaftlich wäre (Frömmig 2019). Begründet durch die hohen Anforderungen bezüglich Bewitterung und UV-Stabilität, schließt auch die Norm DIN EN 12608 für Kunststofffensterprofile den Einsatz von Rezyklaten für die Außenwand von Fensterprofilen aus (EPPA 2018).

Ähnlich wie bei den Rohrleitungssystemen stellt im Zusammenhang mit dem vermehrten Einsatz von Rezyklaten zur Herstellung von Fensterprofilen, neben technischen und konstruktiven Aspekten, auch die notwendige Rezyklat-Verfügbarkeit einen limitierenden Faktor dar. So reichen die aktuell verfügbaren Mengen an Altfensterrezyklat zum Teil nicht aus, um Rezyklatanteilen von über 60 % (wie in einigen kommunalen Programmen gefördert) nachzukommen (EPPA 2018). In diesem Zusammenhang wird auch eine Steigerung der Menge des Recyclingmaterials in den nächsten Jahren kritisch gesehen. Grund hierfür ist unter anderem, dass ständige technische Weiterentwicklungen den vermehrten Einsatz von Verbundstoffen mit sich bringen (so werden zur Erhöhung der Stabilität speziell bei großflächigen Fensterrahmen immer häufiger glasfaserverstärkte Kunststoffe oder Aluminiumteile in die Profilkerns eingebaut), wodurch der Trennaufwand im Rahmen der Altfensteraufbereitung zum Teil deutlich erhöht wird (GFF, 2013).

5.3.5 Rezyklateinsatz bei der Herstellung von Dämmmaterialien

Grundsätzlich können bei der Produktion von Dämmmaterialien aus EPS Produktions- und Verschnittabfälle erneut eingesetzt werden. Das Produktions- und Verschnittrestmaterial wird hierfür gesammelt und zum EPS-Hersteller transportiert. Nach einer optischen Qualitätsprüfung sowie einem Flammschutzmittel-Schnelltest wird das Material geschreddert, nach Sieblinien getrennt und im EPS-Werk weiterverarbeitet. Genauere Details zum Flammschutzmittel-Schnelltest sind im Kapitel 4 angeführt. Als entstehende Recyclingprodukte kommen etwa Putzzuschlagstoffe, lose Schütt-Wärmedämmungen in zweischaligen Mauerwerken, Zuschlagsmaterial in Leichtbeton oder –estrich oder Recyclingperlen als Füllmaterial für Sitzsäcke in Frage (Industrieverband Hartschaum e.V. (IVH) 2020).

Auch gesammelte und leicht mit Putz, Kleber und Sand vermischte EPS-Baustellenabfälle können von groben Verschmutzungen befreit, in einer Mühle gemahlen, entstaubt und schließlich zu einem EPS-Granulat weiterverarbeitet werden. In EPS-Schäumautomaten kann das Granulat anschließend zu EPS-Platten verarbeitet werden, die wiederum als Drainageplatten für die Perimeterdämmung oder als Fußbodendämmung eingesetzt werden können (hierbei sind Rezyklatanteile von 100 % möglich). Eine Herstellung von Dämmplatten in der üblichen Fassadenqualität ist hierbei technisch noch nicht möglich (Albrecht und Schwitalla 2015).

Ein Rücknahmesystem, wie es in der Fensterproduktion vorhanden ist, ist für Dämmstoffe aus ökologischen und ökonomischen Gründen aktuell noch nicht umsetzbar, da die zurzeit anfallenden Rückbaumengen zu gering sind. Da diese Mengen, wie unter anderem im ersten Teil dieser Arbeit aufgezeigt, zukünftig jedoch deutlich wachsen werden, wird derzeit ein entsprechendes System entwickelt. Vor diesem Hintergrund wird für Dämmstoffe aus Kunststoffen auch seit mehreren Jahren ein Verfahren für ein rohstoffliches Recycling entwickelt, was den Vorteil einer Reinigung des Materials auf molekularer Ebene mit sich bringt und qualitätsmindernde Störstoffe bei gleichbleibenden Polymereigenschaften entfernt. Aktuell wird in den Niederlanden im Rahmen der Initiative PolyStyreneLoop zudem eine erste Industrieanlage errichtet, welche mittels des CreaSolv-Verfahrens aus EPS-Abfällen, die bei Umbau- oder Abrissarbeiten anfallen, den Grundstoff Polystyrol oder gar Brom aus vorhandenem Flammschutzmittel wiedergewinnen kann (Albrecht und Schwitalla 2015; Industrieverband Hartschaum e.V. (IVH) 2020).

5.3.6 Rezyklateinsatz in sonstigen Bauprodukten

Die Anwendungsbeispiele für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten im Bereich der sonstigen Bauprodukte sind grundsätzlich sehr divers. Basierend auf einer durchgeführten Recherche in Händler- und Herstellerkatalogen können hierbei beispielhaft die folgenden Produkte genannt werden:

- ▶ Kabelkanäle
- ▶ Sanitärbedarf (z. B. Geruchsverschlüsse)
- ▶ Platten (z. B. Drainageplatten oder Konstruktionsplatten)
- ▶ Zaunelemente
- ▶ Amphibienschutzelemente
- ▶ Paletten

- ▶ Baufolien
- ▶ Abstandshalter
- ▶ Lärmschutzelemente/-wände
- ▶ Fahrbahnschutzelemente
- ▶ Bakenfüße
- ▶ Leitpfosten-Sockel
- ▶ Leitkegel
- ▶ Behälter und Tanks
- ▶ Hochbeete
- ▶ Palisaden
- ▶ Gras-Stopp-Platten
- ▶ Rasengittersteine
- ▶ Mülleimer
- ▶ Matten (z. B. Wartungswegmatten auf Flachdächern oder Fallschutzmatten)
- ▶ Bahnübergänge
- ▶ Stadtmöblierung wie beispielsweise Parkbänke

Wie an diesen Beispielen zu sehen, sind die Anwendungsgebiete für Bauprodukte aus Kunststoff, für deren Herstellung ganz oder teilweise auf Rezyklate zurückgegriffen wird, sehr unterschiedlich. Es zeigt sich, dass der Straßenbau und auch der Garten- und Landschaftsbau gute Möglichkeiten für den Rezyklateinsatz bieten, wenn auch der Bedarf an diesen Produkten vergleichsweise gering ist.

Bei den für den Rezyklateinsatz in Frage kommenden Produkten handelt es sich zudem zum Teil um solche Bauprodukte, die entsprechend Teil D der Muster Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen keinen Verwendbarkeitsnachweis bedürfen und für die es keine anerkannten Regeln der Technik gibt. Für entsprechende Produkte ist anzunehmen, dass ein erhöhter Rezyklateinsatz verhältnismäßig einfach umzusetzen ist. Mögliche Bauprodukte aus Kunststoff, für die es nach Teil D der MVVTB keinen Verwendungszweck bedarf und keine allgemein anerkannten Regeln der Technik existieren (Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) 2017), sind beispielsweise:

- ▶ Dränelemente
- ▶ Schalungsplatten und -körper
- ▶ Spaltenböden
- ▶ Produkte zur Abdichtung von Fugen (z. B. Dichtbänder)
- ▶ Randdämmstreifen für Estriche
- ▶ Träger und Schürzen für Badewannen

► Mobile Trennwände

► Drucklose Behälter

Vorteilhaft an den oben genannten Bauprodukten ist etwa, dass diese grundsätzlich deutlich geringeren Produktionsmengen vorweisen als beispielsweise Rohre oder Profile. Die Problematik der nicht ausreichenden Verfügbarkeit in Frage kommender Rezyklate, wie sie beispielsweise im Bereich der Rohrleitungssysteme oder der Profile häufig aufgeführt wird, ist für diese Produkte somit deutlich geringer bis nicht vorhanden. Da die Qualitätsansprüche an diese Produkte oft vergleichsweise niedrig sind, kann davon ausgegangen werden, dass auch die Problematik der Unwirtschaftlichkeit aufgrund zu teurer Aufbereitungsprozesse hier entfällt. Hieraus ergibt sich insgesamt eine besondere Eignung entsprechender Produkte für einen erhöhten Einsatz von Rezyklaten.

Da im Bereich des Bauens auch technische Kunststoffe Einsatz finden, kann auch das Recycling sowie der Rezyklateinsatz entsprechender Kunststoffe gewisse Potenziale für neue Kreisläufe bieten. Beispielhaft wurden daher Produkte aus Acrylnitril-Copolymeren (Tabelle 19), Polyamiden (Tabelle 20) und Polycarbonat sowie Polymethylmethacrylat (Tabelle 21) inklusive ihrer bautechnischen Normen zusammengestellt. Die jährlich verbaute Menge dieser technischen Kunststoffe wird insgesamt auf 200 kt geschätzt (siehe auch Abbildung 8).

Tabelle 19: Bauprodukte aus Acrylnitril-Copolymeren inkl. Normen

Bauprodukt	Norm
Lichtkuppeln aus Styrol-Acrylnitril-Copolymer (SAN)	Liste EAD; DIN EN 1873;
Lichtkuppeln aus Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS)	Liste EAD; DIN EN 1873;
Dachlichtband aus Styrol-Acrylnitril-Copolymer (SAN)	Liste EAD; DIN EN 14963;
Dachlichtband aus Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS)	Liste EAD; DIN EN 14963;
Rohrleitungssysteme (nicht biegsam) aus Acrylnitril-Butadienstyrol (ABS)	MuVe_TeBau; DIN EN 1455
Rohrleitungssysteme (nicht biegsam) aus Styrol-Copolymer-Blends (SAN+PVC-U)	MuVe_TeBau; DIN EN 1565
Spülkästen aus Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS)	Liste EAD; DIN EN 14055;

Quelle: Eigene Darstellung, SKZ KFE gGmbH

Tabelle 20: Bauprodukte aus Polyamid inkl. Normen

Bauprodukt	Norm
Sportböden (Outdoor) aus Polyamid (PA) (Einstreuungen aus EPDM-/SBR-Granulat möglich)	Liste EAD; DIN EN 14904;
Textiler Bodenbelag aus Polyamid (PA)	Liste EAD; MuVe_TeBau; DIN EN 14041;
Textiler Bodenbelag aus einem Verbund aus Polyamid, Polypropylen und/oder Polyethylenterephthalat (PA, PP, PET)	Liste EAD; MuVe_TeBau; DIN EN 14041;
Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus Polyamid (PA)	Liste EAD; DIN EN 50575; Harmonisierungsvorschrift 2014/35/EU;
Fensterprofile aus Polyamid (PA)	Liste EAD; MuVe_TeBau; DIN EN 14351; DIN EN 16034; DIN 18056;
Beschläge aus Polyamid (PA)	Liste EAD; DIN EN 14846; DIN EN 179; DIN EN 1125; DIN EN 1154; DIN EN 1155; DIN EN 1158;
Folien aus Polyamid (PA)	Eigenrecherche
Netze aus Polyamid (PA)	Eigenrecherche
Ortsfeste Tanks aus Polyamid (PA)	Liste EAD; DIN EN 13341;
Rohrleitungssysteme (biegsam) aus Polyamid (PA)	Eigenrecherche (biegsam, da in Güterverzeichnis so unterteilt)
Kunststoffdübel aus Polyamid (PA)	MuVe_TeBau; ETAG 020;
Verschraubungen aus Polyamid (PA)	Eigenrecherche; Liste HEN, Referenznummer: 180022-00-0704

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 21: Bauprodukte aus Polycarbonat bzw. Polymethylmethacrylat inkl. Normen

Bauprodukt	Norm
Flüssigkunststoff-Abdichtungen aus Polymethylmethacrylat (PMMA)	MuVe_TeBau; bedarf lediglich allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfungszeugnis nach §19 Abs. 1 Satz 2 MBO
Steckdosen, Schalter aus Polycarbonat (PC)	MuVe_TeBau; bedarf keinem Verwendbarkeitsnachweis gemäß § 17 Abs. 3 MBO
Brandmeldeanlagen aus Polycarbonat (PC)	Liste EAD; MuVe_TeBau; DIN EN 54;
Rauchwarnmelder aus Polycarbonat (PC)	Liste EAD; MuVe_TeBau; DIN EN 14604; DIN EN 54-7;
Anlagen zur Verkehrssteuerung aus Polycarbonat (PC)	Liste EAD; DIN EN 12352
Lichtkuppeln aus Polymethylmethacrylat (PMMA)	Liste EAD; DIN EN 1873;
Lichtkuppeln aus Polycarbonat (PC)	Liste EAD; DIN EN 1873;
Dachlichtband aus Polycarbonat (PC)	Liste EAD; DIN EN 14963;
Dachlichtband aus Polymethylmethacrylat (PMMA)	Liste EAD; DIN EN 14963;
Kunststoffplatten aus Polycarbonat (PC)	Liste EAD; DIN EN 1013; DIN EN 13830; DIN EN 14428;
Kunststoffplatten aus Polymethylmethacrylat (PMMA)	Liste EAD; DIN EN 1013; DIN EN 13830; DIN EN 14428;
Kabelschächte aus Polycarbonat (PC)	Eigenrecherche
Badewannen aus Polymethylmethacrylat (PMMA)	Liste EAD; DIN EN 14516; DIN EN 12764;
Duschwannen aus Polymethylmethacrylat (PMMA)	Liste EAD; DIN EN 14527; DIN EN 12764;

Quelle: Eigene Darstellung

In den entsprechenden Normen der in den oben angeführten Tabellen (Tabelle 19 bis Tabelle 21) angeführten Produkte werden lediglich bei den Rohrsystemen aus ABS bzw. SAN und PVC-U Angaben zum Einsatz von Sekundärware gemacht. Die DIN 1455 (Rohrsysteme ABS) erlaubt die Verwendung von Umlaufmaterial, Abfall vor oder nach dem Gebrauch darf hingegen nicht verarbeitet werden. Ähnlich verhält es sich in der zurückgezogenen Norm 1565 (Rohrsystem SAN und PVC-U). Hier ist die Verwendung von Umlaufmaterial ebenfalls gestattet, Rücklaufmaterial oder Rezyklate dürfen hingegen nicht verarbeitet werden.

Bei allen anderen hier gelisteten Produkten aus technischen Kunststoffen sind keine Angaben hinsichtlich des Einsatzes von Sekundärmaterial angeführt, weshalb einem Einsatz von Rezyklaten aus normativer Sicht nichts entgegensteht. Ob dies in der Praxis tatsächlich umsetzbar ist, muss selbstverständlich für jedes Produkt im Einzelfall geprüft werden.

5.4 Produktkennzeichnung für die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen

Nach aktuellem Stand werden Hersteller nicht dazu verpflichtet, Rezyklatanteile oder die Recyclingfähigkeit eines Produktes anzugeben. Wie oben bereits ausgeführt, stellt jedoch die

europäische Bauproduktenverordnung (Europäische Kommission 2011c) die Anforderung, dass für Bauwerke umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden sollen.

Hinweise zum Rezyklateinsatz in Bauprodukten und zu ihrer Recyclingfähigkeit sind ein wichtiges Nachhaltigkeitskriterium bei der Beschaffung von Bauprodukten. Eine besondere Relevanz können diese Aspekte z. B. zukünftig im Rahmen des Nachhaltigen Bauens nach DIN EN 15643 (CEN 2010) erlangen. Basierend auf dieser europäischen Norm haben sich mittlerweile eine Reihe von Systemen zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden etabliert. In Deutschland findet im öffentlichen Bereich das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB System) des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat sowie im privatwirtschaftlichen Bereich insbesondere das System der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen Anwendung. Durch eine eindeutige und prominente Ausweisung des Rezyklatgehalts und der Recyclingfähigkeit kann bspw. künftig durch diese Systeme die Verwendung von Sekundärkunststoff durch eine gute Bewertung gutiert und somit befördert werden.

Mit dem Ziel mehr Transparenz in Wertschöpfungsketten und gegenüber Bauherren zu schaffen, wird im Folgenden beschrieben, welche Angaben zu Rezyklatanteilen und zur Rezyklierbarkeit von Bauprodukten zusätzlich gegeben werden sollten und welche Kommunikationsmittel sich hierfür anbieten.

Rezyklatanteil

Nach DIN EN 15343 ist der Rezyklatanteil als Massen-Anteil [%] im produzierten Bauteil anzugeben, der mittels nachstehender Formel berechnet wird:

$$\text{Prozentualer Anteil des Rezyklats im Produkt} = \frac{\text{Masse an Rezyklat im Produkt} \times 100}{\text{Gesamtmasse des Produkts}}$$

Hierbei sollten nach Normvorgabe nur Produktions- und Gebrauchsabfälle in die Berechnung zur Berechnung des Rezyklatanteils im Produkt einfließen. Material, das bei demselben Fertigungsprozess zurückgewonnen wurde, bei dem es angefallen ist, darf dem Rezyklatanteil nicht zugerechnet werden. Die ISO 14021 weist in diesem Kontext explizit darauf hin, dass somit ein eigentlicher Recyclingprozess entfällt, im Zuge des Fertigungsverfahrens können aber immer noch Koppelprodukte und Abfälle anfallen. Derartige Koppelprodukte und Abfälle müssen daher berücksichtigt werden, wenn die Masse an recyceltem Material bestimmt wird, die in die Gleichung zur Berechnung des Rezyklatgehaltes einfließt.

Recyclingfähigkeit

Für die Bewertung der Recyclingfähigkeit sind u.a. nach den baufachlichen Richtlinien „Recycling“ des Bundesministeriums des Inneren, für Bau und Heimat sowie des Bundesministeriums der Verteidigung nachstehende Kriterien relevant (BMI und BMVg 2018):

- ▶ Stoffliche Zusammensetzung (Mono- oder Mehrschichtmaterial)
- ▶ Widerstand gegen Verwitterung (Wasseraufnahme, Frost)
- ▶ Widerstandsfähigkeit gegen Schlagbeanspruchung
- ▶ Reinheit (Farbe, Geruch, Fremdstoffe)
- ▶ Schadstoffe (ob Schadstoffe bereits mit dem Baustoff selbst, über die Nutzung oder durch Umwelteinflüsse freigesetzt werden.),

- Trennbarkeit (je sortenreiner Materialien getrennt werden können, umso größer ist die Chance, sie wieder einsetzen zu können.)
- Verwertung (Direkte Wiederverwertung, Energetische Verwertung, Werkstoffliche Verwertung, Deponie oder Sondermüll)

Da Hersteller vor der komplexen Herausforderung stehen, die unterschiedlichen Kriterien zu bewerten und daraus sinnvolle Schlussfolgerungen für ein Gesamtergebnis in Bezug auf die Recyclingfähigkeit zu ziehen, ist dies bereits mittels standardisierter Tools möglich und kann darüber hinaus auch zertifiziert werden. Aktuelle Entwicklungen beschränken sich noch auf den Verpackungsbereich. Beispiele dafür sind:

- RecyClass: Recyclingfähigkeit von Verpackungen unter Verwendung einer spezifischen Formel, gem. europäischen Standards
- CHIRA – CHI Recyclability Assessment: Ein Software-Tool zur Bewertung der Recyclingfähigkeit für Verpackungen, unter der Entwicklung des Instituts cyclos-HTP.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass solche Möglichkeiten auch für Produkte aus dem Baubereich entstehen und Anwendung finden. Neben der zur Hilfenahme von derartigen Berechnungstools oder Zertifizierungen bzw. durch eigene Ausführungen zu den oben genannten Kriterien, sollten Hersteller kennzeichnen, ob für ihre spezifischen Produkte Rücknahmesysteme wie in Kapitel 3 bestehen.

Leistungserklärungen und technische Datenblätter

Als geeignete Kommunikationsmittel für den Rezyklatanteil und die Rezyklierbarkeit von Produkten wurden u.a. Leistungserklärungen der Hersteller und Technische Datenblätter und Umweltproduktdeklarationen identifiziert. Im Folgenden wird deren Hintergrund und Inhalt kurz erläutert und aufgezeigt an welchen Stellen die in Rede stehenden Produktkennzeichnungen platziert werden können.

Leistungserklärungen

Die europäische Bauproduktenverordnung (Europäische Kommission 2011c) schreibt vor, dass Hersteller von Produkten, die eine CE-Kennzeichnung tragen und für die es bereits harmonisierte technische Spezifikationen gibt, sog. Leistungserklärungen erstellen müssen. Hersteller garantieren mit Leistungserklärungen die darin festgelegten Eigenschaften der Bauprodukte. Form und Inhalte der Leistungserklärung sind in Anhang III der BauPVO geregelt und in Tabelle 22 übersichtlich dargestellt.

Tabelle 22: Inhalte einer Leistungserklärung nach Artikel 4 der Bauproduktenverordnung

Nr.	Inhalte der Leistungserklärung
0	Leistungserklärung Nr.
1	Kenncode des Produkttyps
2	Identifikation des Bauproduktes z. B. durch Typen-, Chargen oder Seriennummer
3	Verwendungszweck
4	Handelsname Kontaktanschrift des Herstellers

Nr.	Inhalte der Leistungserklärung
5	Kontaktanschrift des Bevollmächtigten
6	System zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit
7	Notifizierte Stelle und Konformitätsbescheinigung
8	Leistungserklärung bezüglich Europäisch Technischer Bewertung
9	Erklärte Leistung z. B. Wesentliche Merkmale / Eigenschaft / Leistung / Harmonisierte technische Spezifikation
10	Die Leistung des Produkts gemäß der Nummer 1 und 2 entspricht der erklärten Leistung nach Nummer 9. verantwortlich für die Erstellung dieser Leistungserklärung ist allein der Hersteller gemäß Nummer 4. Unterzeichnet für den Hersteller und im Namen des Herstellers von: (Name und Funktion): (Ort und Datum der Ausstellung) (Unterschrift)

Quellen: (Bachl 2019; Europäische Kommission 2011b)

Technische Datenblätter

In Technischen Datenblättern erläutern Hersteller die Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten ihrer Produkte. Im Gegensatz zu Leistungserklärungen liegen Datenblätter für alle technischen Bauprodukte vor und haben daher eine breitere Anwendbarkeit. Für die Bauproduktkategorien Rohrleitungssysteme, Dämmmaterialien, Profile und Bodenbeläge wurden folgende gängigen Angaben (Tabelle 23) in technischen Datenblättern ermittelt:

Tabelle 23: Inhalte eines technischen Datenblatts

Nr.	Inhalte des technischen Datenblatts
1	Produkttyp
2	Produktbeschreibung mit Anwendungsbereich
3	Allgemein oder Konstruktion (mit Material)
4	Eigenschaften
5	Technische Daten
6	Dicke
7	Hersteller und Kontakt Hersteller
8	Stand / Veröffentlichung des Datenblatts
9	Weitere: Zertifikate und Labels, CE-Kennzeichnung

Aufgrund der immer größer werden Relevanz des Themas ist geboten, sowohl in Leistungserklärungen als auch in Technischen Datenblättern einen eigenen Zusatzabschnitt mit der Überschrift „Kreislaufrführung“ oder „Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen“ zu ergänzen. Die Eingliederung in andere Kategorien birgt die Gefahr, dass diese Informationen untergehen. Tabelle 24 zeigt, welche Angaben unter diesem Abschnitt gegeben werden können.

Tabelle 24: Möglicher Zusatzabschnitt "Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen" in der Leistungserklärung und in Technischen Datenblättern

Nr.	Aspekte der nachhaltigen Nutzung	Informationen
1	Rezyklatanteil	Berechnung: Masse Rezyklat / Produktmasse [%]
2	Quelle des Rezyklats	z. B. Produktionsabfälle, gewerbliche Abfälle, Gebrauchtabfälle, Post-Consumer-Abfälle
3	Kreislaufführung, Recycling	Hinweis auf bestehende Rücknahmesysteme und Recyclingverfahren
4	Recyclingfähigkeit	Angabe der Recyclingfähigkeit ▪ auf Basis des Ergebnisses eines Design-for-RecyclingTools (unter Nennung des verwendeten Tools) ▪ mit Hinweis auf eine zertifizierte Recyclingfähigkeit ▪ Durch spezifische Angaben auf Basis eigener Versuche / Praxiserfahrungen

Quelle: Eigene Darstellung, SKZ KFE gGmbH

Umweltproduktdeklarationen

Im Rahmen des Nachhaltigen Bauens gemäß DIN EN 15643 (CEN, 2010) sind Umweltproduktdeklarationen (EPD) nach DIN EN ISO 14025 und DIN EN 15804+A2 die relevanten Dokumente zur Kommunikation der Umweltpformance von Bauprodukten. Eine Vielzahl von Bauproduktherstellern veröffentlicht daher über sogenannte Programmhalter, wie das Institut Bauen und Umwelt e.V., EPD, welche insbesondere Ökobilanzergebnisse für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung auf Gebäudeebene enthalten. Derzeit wird in EPD im Kapitel 5 unter dem Abschnitt *Ergebnisse der Ökobilanz Ressourceneinsatz* unspezifisch angegeben, welche Menge Sekundärrohstoff für das deklarierte Bauprodukt zum Einsatz kam. Genauere Angaben zu Art und Herkunft der Sekundärrohstoffe fehlen. Bauprodukthersteller haben in EPD jedoch auch die Möglichkeit, unter Abschnitt 2 *Produkt* weitere Informationen, die sie gegenüber ihren Kunden in der EPD kommunizieren wollen, zu platzieren. Da die EPD als Kommunikationsmittel für die Nachhaltigkeit von Bauprodukten weiter an Bedeutung gewinnt, empfiehlt es sich, die in Tabelle 24 vorgeschlagenen Informationen auch hier zu ergänzen.

Ab 2022 werden gemäß DIN EN 15804+A2 EPD um Circularity Module erweitert. Dies geschieht vor dem Hintergrund, realistische und vergleichbare Ökobilanzdaten für das End-of-Life des Produktes und die Gebäudebilanzierung zur Verfügung zu stellen. Es handelt sich in gewissem Sinne um Angaben zur Recyclingfähigkeit. Die Circularity Module (CMEPD) bündeln alle relevanten Daten zum Lebensende eines Produktes in einem standardisierten Format, das sich in die bewährte EPD-Methodik einfügt. CMEPD werden auf Basis von Daten von Recycling- und Entsorgungsunternehmen erstellt und sollen konkrete Angaben zum Recycling bestimmter Produktgruppen und Materialtypen liefern. So ermöglichen die CMEPD die recyclinggerechte Planung und Realisierung von Gebäuden sowie deren vollständige ökologische Bewertung.

5.5 Zusammenfassung und Empfehlungen

In diesem Kapitel erfolgte die Ermittlung des Einsatzpotentials von Rezyklaten in Bauprodukten aus Kunststoff. Hierfür wurden zunächst die anfallenden Kunststoffabfälle hinsichtlich ihrer Qualität und Quantität untersucht. Anschließend wurden allgemeine Voraussetzungen und

Grundanforderungen für den Einsatz von Rezyklaten zur Herstellung von Bauprodukten detailliert beleuchtet. Darauf aufbauend erfolgte eine Einschätzung des Einsatzpotentials von Rezyklaten hinsichtlich der vier großen Anwendungsbereiche *Rohre, Profile, Dämmmaterialien* und *Sonstiges*. Abschließend wurde für die Kommunikationsmittel *Leistungserklärungen*, *Technische Datenblätter* und *Umweltproduktdeklarationen* aufgezeigt, wie sich die Kennzeichnung eines Rezyklatanteils und der Recyclingfähigkeit von Bauprodukten aus Kunststoffen umsetzen lässt.

Die Qualität von Kunststoffrezyklaten wird maßgeblich von der Beschaffenheit der eingesetzten Sekundärrohstoffe bestimmt. So sind beispielsweise Sortenreinheit, die Reduktion von Störstoffen und Verunreinigungen sowie Unversehrtheit der Polymerketten wichtige Parameter zur Beurteilung der Inputqualität. Aber auch die Berücksichtigung von Design-for-Recycling bei der Produktentwicklung begünstigt die Wiederverwertung des Produktes und schafft eine gute Ausgangsbasis für die Herstellung hochwertiger Rezyklate. Prinzipiell kann davon ausgegangen werden, dass Kunststoffabfälle aus dem Post-Industrial-Bereich als qualitativ hochwertiger einzustufen sind als aus dem Post-Consumer-Bereich.

Die quantitative Erfassung der im Jahr 2017 angefallen Kunststoffabfälle beläuft sich auf 6.154 kt, wovon rund 5.201 kt dem Post-Consumerbereich und rund 953 kt dem Post-Industrialbereich zugeordnet werden können. Der größte Teil wird immer noch einer energetischen Verwertung zugeführt und somit dem Wertstoffkreislauf entzogen. Ein weiterer Aspekt, den es in diesem Kontext zu berücksichtigen gilt, ist das aktuelle Mismatching von anfallenden Kunststoffabfällen und benötigten Rohstoffen im Baubereich. Die Zahlen in diesem Kapitel zeigen für unterschiedliche Werkstoffe ein Ungleichgewicht vorhandener Abfälle und benötigter Qualitäten bzw. Kunststoffsorten im Bauwesen auf. Eine Möglichkeit dies zu beheben, besteht beispielsweise darin, Kunststoffabfälle aus anderen Bereichen wie etwa der Verpackungsbranche zu verwenden. Aber auch hier liegt bezüglich verfügbarer und benötigter Sorten ein grundsätzliches Mismatching vor.

Weiterhin ist zu hinterfragen, wie sinnvoll ein Rohstofftransfer zwischen verschiedenen Material- und Produktkreisläufen vor dem Hintergrund des zusätzlich nötigen Additiveinsatzes sowie der Mengenerhaltung im jeweiligen System tatsächlich ist. Grundsätzlich sollte eine echte und geschlossene Kreislauflösung angestrebt werden. Dies bedeutet im Idealfall über Rücknahmesysteme den jeweiligen Material- und Produktkreislauf geschlossen zu halten, wie es bei PVC bereits gut funktioniert. Der PVC-Recyclingkreislauf führt zu relativ hohen baubereichenspezifischen Rezyklateinsatzquoten, wenn auch hier die Nachfrage noch nicht völlig bedient werden kann. Das Angebot an qualitativ passendem Rezyklat muss daher der spezifischen Nachfrage entsprechend vergrößert werden, was auch für andere Kunststoffsorten anzustreben ist.

Ein weiterer Punkt, der in diesem Kapitel detailliert beleuchtet wurde, sind die Voraussetzungen für den Einsatz von Rezyklaten zur Herstellung von Bauprodukten. Zum einen müssen die aus Rezyklaten gefertigten Produkte den Grundanforderungen der europäischen Bauproduktenverordnung entsprechen, die in harmonisierten Spezifikationen festgeschrieben sind, zum anderen müssen Bauwerks- und Kundenanforderungen erfüllt werden. Die BauPVO fordert zugleich die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen. Konkret bedeutet dies, dass das Bauwerk bzw. das Baumaterial nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden müssen. Auch muss das Bauwerk dauerhaft sein und für dessen Errichtung sind umweltverträgliche Roh- und Sekundärstoffe zu verwenden. Dauerhaftigkeit, Recyclingfähigkeit und Rezyklateinsatz sind Eigenschaften, die durch den Gesetzgeber bereits grundsätzlich Berücksichtigung finden. Die normative und produktspezifische Konkretisierung bleibt jedoch oftmals aus.

Prinzipiell erlauben bereits viele Normen den Rezyklateinsatz, jedoch wird der Einsatz von derartigem Sekundärmaterial von Verarbeitungs- und Kundenseite häufig noch ungern gesehen. Hauptgründe sind hier unzureichende Rezyklatqualitäten und -quantitäten, negative optische Eigenschaften, geringe Preisunterschiede zwischen Neuware und Rezyklat sowie auch eine aufwendige Änderung der etablierten Verfahrens- und Prozesstechnik im Betrieb. Trotz der eben genannten Hemmnisse zeichnet sich mittlerweile, jedoch langsam, eine Trendwende ab, die im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist.

Im Folgenden wird das Rezyklateinsatzpotential der vier untersuchten Anwendungsbereiche aufgezeigt.

Rohre

Die Vielfalt an Rohren- und Rohrsystemen ist groß. So kann zwischen druck- und drucklosen Rohren oder zwischen der Art des zu leitenden Mediums unterschieden werden. Je nach Anwendungsfall sind entsprechende Qualitätsanforderungen einzuhalten. Diese umfassen u.a. Mechanik, Farbe, Geometrie oder Prüfverfahren. Die aktuellen Normen geben hier bereits sehr gute Anhaltspunkte, was den Rezyklateinsatz betrifft. Bei druckbelastenden Rohren lassen die Normen keinen Einsatz von Rezyklat oder Rücklaufmaterial zu, bei drucklosen Rohren hingegen ist ein Rezyklateinsatz von max. 20 % gestattet. Dies gilt natürlich nur unter der Voraussetzung, dass alle anderen Anforderungen, wie Mechanik oder Optik, hinreichend erfüllt werden. Auch die verwendete Kunststoffsorte wirkt sich limitierend auf die Möglichkeiten des Rezyklateinsatzes aus. Eine nachträgliche Stabilisierung von PVC ist relativ einfach durchzuführen, weshalb sein erneuter Einsatz als Rezyklat gut möglich ist. Bei Polyolefinen gestaltet sich dies schwieriger. Aus diesem Grund lassen die Normen hier nur Rücklaufmaterial und Rezyklate aus Rohren und Rohrformteilen zu. Rezyklate aus produktfremden Quellen, wie dies bei PVC der Fall ist, sind nicht zulässig. Mit über 1 Mio. t stellen Rohre und Rohrsysteme mengenmäßig den größten Anteil an den untersuchten Bauprodukten dar. Das Angebot an Rezyklaten kann aktuell nicht die Nachfrage der Unternehmen decken, weshalb das Rezyklateinsatzpotential hier noch gesteigert werden kann.

Fensterprofile

Bei der Fensterprofilproduktion kommen aktuell 18 % Rezyklate zum Einsatz, zudem hat sich bereits ein gut funktionierender Materialkreislauf (Rewindo) etabliert. Experten schätzen das Rezyklateinsatzpotential jedoch weitaus höher auf 50–70 %. Dass der tatsächliche Rezyklateinsatz aktuell noch so gering ist, hat mehrere Gründe. Zum einen sind hier wirtschaftliche Aspekte zu nennen. Die Entwicklung und Anwendung von Technologien sind immer noch sehr aufwendig und kostenintensiv. Auch die hohen Preise für Rezyklate mindern deren verstärkten Einsatz in der Fensterprofilproduktion. Zum anderen limitieren auch die aktuellen Normen den Rezyklateinsatz. Prinzipiell werden hohe Anforderungen bzgl. Bewitterung und UV-Stabilität an Fensterprofile gestellt. Im Profilkern dürfen Rezyklate eingesetzt werden, in der Außenwandung gestattet dies die entsprechende Norm nicht. Auch der Trend in Richtung Verbundsysteme schmälert die gute Recyclingfähigkeit von Altfenstern. Mit dem Einbau von Glasfasern oder Aluminiumteilen in den Profilkern ist eine Trennung, wenn überhaupt möglich, nur unter erhöhtem Aufwand und Mehrkosten durchführbar. Analog zu den Rohren kann auch bei den Fensterprofilen die Nachfrage nach Rezyklaten nicht durch das bestehende Angebot abgedeckt werden.

Dämmmaterialien

Im Vergleich zu den Rohren und Fensterprofilen ist die aktuelle Situation bei Dämmmaterialien hinsichtlich Rezyklateinsatz grundsätzlich als schlechter zu bewerten. Entsprechende

Rücknahmesysteme sind noch nicht etabliert, da die Rückbaumengen noch zu gering sind. Da in Zukunft die Mengen mit hoher Wahrscheinlichkeit steigen werden, wird jedoch bereits ein Rücknahmesystem entwickelt. Auch können Dämmplatten mit Rezyklatanteil noch nicht in der üblichen Fassadenqualität hergestellt werden. Ein werkstoffliches Recycling ist bei Dämmmaterialien nicht ideal, weshalb rohstoffliche Verfahren aussichtsreich erscheinen.

Sonstiges

Die Anwendungsbereiche für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten bei den sonstigen Bauprodukten sind sehr divers. Viele Anwendungen im Straßen- sowie Garten- und Landschaftsbau sind bereits etabliert und gut möglich. Auch Produkte entsprechend Teil D der Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen sind prinzipiell gut geeignet, da hier keine Verwendbarkeitsnachweise erbracht werden müssen und es hierfür keine anerkannten Regeln der Technik gibt. Ein weiterer Vorteil ist, dass aufgrund der relativ geringen Produktmengen die verfügbaren Rezyklatmengen nicht limitierend wirken, wie dies bei den Rohren und Fensterprofilen der Fall ist.

Zur Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten aus Kunststoff lassen sich folgende Empfehlungen ableiten.

- ▶ Neben Investitionen in technische Sortier- und Aufbereitungsapparaturen ist es erstrebenswert, bereits im vorherigen Schritt die Getrenntsammlung von Abfällen zu fördern und die Akteure dafür zu sensibilisieren.
- ▶ Auch wenn derzeit Rezyklate aus der Baubranche noch in sehr geringen Mengen auftauchen, sollte aufgrund der perspektivisch steigenden Mengen eine echte Kreislaufschließung, d.h. "Bauprodukt zu Bauprodukt", angestrebt werden, anstatt Abfälle aus anderen Produktkreisläufen auszuschleusen und durch aufwendige Aufbereitungsschritte und Additivierungen brauchbar zu machen.
- ▶ Vergleichsweise hohe Wiedereinsatzquoten von Rezyklaten sind im Fall von PVC-U bzw. Fensterprofilen zu verzeichnen, was durch das Rücknahmesystem *Rewindo* realisiert wird. Für Bauprodukte aus anderen Kunststoffen, für welche sich zukünftig ein steigendes Abfallaufkommen abzeichnet, sind ähnliche Rücknahmesysteme anzustreben und deren Wirtschaftlichkeit zu prüfen.
- ▶ Können aus Gründen geringer Mengenverfügbarkeiten Abfälle aus dem Baubereich nicht wieder für die Herstellung desselben Produkts dienen (z. B. Rohr zu Rohr), ist anzustreben diese Materialien für andere Bauprodukte zu verwenden. Insbesondere bei Produkten, die entsprechend Teil D der Muster Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen keinen Verwendbarkeitsnachweis bedürfen und für die es keine anerkannten Regeln der Technik gibt, liegen noch große Potenziale für einen höheren Rezyklateinsatz vor.
- ▶ Es wird empfohlen Rezyklatanteile und Recyclingfähigkeit von Bauprodukten aus Kunststoff in *Leistungserklärungen* nach Anhang III der europäischen Bauproduktenverordnung, *Technischen Datenblättern* und *Umweltproduktdeklarationen* auszuweisen. Damit diese Informationen möglichst gut wahrgenommen werden, sollte jeweils ein eigener Zusatzabschnitt "Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen" (siehe Tabelle 24) in die Dokumente eingefügt werden.

6 Kunststoffverpackungen für Bauprodukte

6.1 Einführung

Im Vordergrund dieses Kapitels zu Kunststoffverpackungen für Bauprodukte stehen die Möglichkeiten zur Vermeidung und ökologischen Optimierung von Verpackungen sowie zur Steigerung des Rezyklateinsatzes. Hierzu werden folgende Fragen geklärt:

- ▶ Wie hoch ist der branchenspezifische Bedarf an Kunststoffverpackungen, welche Kunststoffe finden Verwendung und bieten diese Verpackungen die Möglichkeit des Rezyklateinsatzes?
- ▶ Wie erfolgen Rücknahme und Recycling von Einwegverpackungen entlang der baubereichenspezifischen Lieferketten und wie werden diese Verpackungen wiederverwendet oder hochwertig recycelt?
- ▶ Welche Steigerungspotentiale für Mehrweglösungen, das werkstoffliche Recycling der Kunststoffverpackungen oder für den Rezyklateinsatz in diesen Kunststoffverpackungen bestehen? Welche Rezyklate könnten hierfür geeignet sein?

Zur Beantwortung dieser Fragen erfolgt zunächst eine Bestimmung und Eingrenzung des Betrachtungsrahmens sowie eine Begriffsbestimmung. Sodann werden die zur Verpackung von Bauprodukten genutzten Materialien und Verpackungsformen beschrieben und die Stationen des Abfallaufkommens anhand eines Stoffstrombildes dargestellt. Der Teil schließt mit einer quantitativen Einschätzung des Abfallaufkommens an Bauproduktverpackungen. Im nächsten Teil werden ökologische Steigerungspotenziale bestimmt und eine Abschätzung des Mengenpotenzials für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten in Bauproduktverpackungen vorgenommen. Schließlich folgen Empfehlungen für Maßnahmen zur Steigerung des Rezyklateinsatzes. Die Grundlage dieser Studie sind Literatur- und Internet-Recherchen sowie Expert*inneninterviews. Die Ergebnisse aus den Interviews werden anonymisiert wiedergegeben.

6.2 Betrachtungsrahmen und Begriffsdefinitionen

6.2.1.1 Definition und Kategorisierung von Bauprodukten

Der Betrachtungsrahmen dieses Kapitels umfasst Verpackungen von Produkten, die typischerweise über den Bau- und Gartenmarkt sowie den Baustoffhandel vertrieben werden. Dies umfasst sowohl Bauprodukte im Sinne der EU-Bauproduktenverordnung als auch weitere Produkte des Heimwerker- und Gartenbedarfs.

Das Produktangebot in unterschiedlichen Märkten variiert jedoch erheblich, daher erfolgt hier eine weitere Beschränkung auf Produkte, die im Baugewerbe oder bei privaten handwerklichen oder gärtnerischen Tätigkeiten genutzt werden. Vereinfacht werden im weiteren Verlauf dieser Studie alle diese genannten Güter unter dem Begriff Bauprodukte subsumiert. Auch diese Betrachtung umfasst noch eine Vielzahl unterschiedlicher Produkte, die verschiedenste Anforderungen an ihre Verpackung stellen. Aus diesem Grund werden zur weiteren Kategorisierung, angelehnt an den Katalog systembeteiligungspflichtiger Verpackungen (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020a), zusammenhängende Produktgruppen identifiziert. Diese Einteilung beruht hauptsächlich auf der Betrachtung von Produktmerkmalen, wie z. B. der chemischen Beschaffenheit und der Funktionalität des verpackten Erzeugnisses (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2019), denn der Produktinhalt entscheidet maßgeblich darüber, welche Verpackung gewählt werden muss. Die vier verwendeten Produktgruppen sind „08-010

Bauchemie“, „08-020 Baustoffe und Installationen“, „08-030 Bodenbeläge“ und Produkte, die der Kategorie „08-040 Heimwerker und Garten“ zugeordnet werden. Enthalten sind damit alle mit „08-“ beginnenden Produktgruppen im Katalog systembeteiligungspflichtiger Verpackungen (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020a). Die Produktgruppe 08-020 wird nochmals in „Baustoffe“ und „Installationen“ eingeteilt und diese beiden Gruppen getrennt behandelt.

Da der Katalog sowohl systembeteiligungspflichtige als auch nicht systembeteiligungspflichtige Verpackungen beinhaltet, schränkt diese Definition den Betrachtungsrahmen nicht auf den privaten Endverbrauch ein. Tabelle 25 beinhaltet ausgewählte Produktbeispiele für die betrachteten Kategorien.

Tabelle 25: Produktgruppen und Produktgruppennummer mit Beispielen nach (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020a)

Bauchemie 08-010	Baustoffe 08-020	Bodenbeläge 08-030	Heimwerker und Garten 08-040
Lackfarben	Sand	Laminat	Elektrowerkzeuge
Pulverlacke	Pulverförmige Baustoffe wie Zement, Kalk, Gips und Mörtel	Parkett	Handwerkzeuge
Dispersionsfarben	Ziegel und Bausteine	Dielen	Stifte, Nägel, Krampen, Dübel
Spachtelmasse, Dichtungsmasse	Stoffe und Platten zur Wärme- und Schalldämmung	Böden aus PVC, Linoleum, Gummi etc.	Anstreichpinsel, Anstreichbürsten, Farbröller
Holzschutzmittel	Ziersteine	Baufester Teppich	Garten- und Blumenartikel
	Installationen 08-020		
	Armaturen und Siphons		
	Heizkörper und Heizungsanlagen		
	Waschbecken, Badewannen, Duschtassen		
	Fliesen		
	Holzbretter		

6.2.1.2 Legaldefinition des Verpackungsbegriffs

Der Verpackungsbegriff wird rechtlich durch das Verpackungsgesetz (VerpackG) definiert, welches am 1. Januar 2019 in Kraft getreten ist und die EU-Richtlinie 94/62/EG in deutsches Recht umsetzt. Verpackungen sind dort als „aus beliebigen Materialien hergestellte Erzeugnisse zur Aufnahme, zum Schutz, zur Handhabung, zur Lieferung oder zur Darbietung von Waren“ definiert (§ 3 Absatz 1 VerpackG). Das Verpackungsgesetz unterscheidet zwischen drei verschiedenen Verpackungsarten: Verkaufsverpackung, Umverpackung und Transportverpackung. Daran anknüpfend führt das VerpackG außerdem die Differenzierung

zwischen privat und gewerblich genutzter Verpackung ein. Inverkehrbringer*innen von Verpackungen, die für die privaten Endverbraucher*innen oder vergleichbare Anfallstellen bestimmt sind, müssen sich finanziell an einem dualen System oder einer Branchenlösung beteiligen, die für eine flächendeckende Rücknahme der Verpackungen sorgen (§ 7 Absatz 1 VerpackG), sind also systembeteiligungspflichtig. Hersteller von Verpackungen, die laut § 7 Absatz 1 VerpackG systembeteiligungspflichtig sind, müssen diese Verpackungen bei der Zentralen Stelle Verpackungsregister registrieren (§ 9 Absatz 1 VerpackG).

Systembeteiligungspflichtige Verpackungen von Bauprodukten sind über die gelbe Tonne bzw. den gelben Sack, bereitgestellt durch ein duales System, zu entsorgen. Private Endverbraucher*innen, die in den Betrachtungsrahmen dieser Studie fallen, sind Nutzer*innen von Bauprodukten im heimischen Umfeld, auch als DIY-Sektor (Do-it-yourself) bezeichnet. Vergleichbare Anfallstellen sind in diesem Rahmen vor allem z. B. Handwerksbetriebe, „deren Verpackungsabfälle mittels haushaltsüblicher Sammelgefäße [...], jedoch maximal mit einem 1100-Liter-Umleerbehälter je Sammelgruppe, im haushaltsüblichen Abfuhrhythmus entsorgt werden können“ (§ 3 Absatz 11 VerpackG). Die Systembeteiligungspflicht für Verpackungen, die an sogenannten „vergleichbaren Anfallstellen“ zu Abfall werden, bemisst sich also am sogenannten „Mengenkriterium“ (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2019). Nach Aussage eines Experten eines dualen Systems bringe diese Unterscheidung allerdings viele Zweifelsfälle mit sich und eine eindeutige Zuordnung sei nicht immer möglich.

Im Gegensatz dazu sind Verpackungen, die für den gewerblichen Endverbrauch bestimmt sind, sowohl von der Systembeteiligungspflicht als auch der Registrierungspflicht bei der Zentralen Stelle ausgenommen (§ 3 Absatz 8 i. V. m. § 7 Absatz 1 und § 8 Absatz 1 VerpackG). Ihre Entsorgung wird zwischen dem Inverkehrbringer und einem privaten Abfallentsorger geregelt. Nach Einschätzung von Experten zweier Behörden ist der überwiegende Teil des Verpackungsaufkommens aus der Bauindustrie dem gewerblichen Endverbrauch zuzuordnen.

6.2.1.3 Technische Kategorisierung von Verpackungen

Ergänzend zu der oben genannten, gesetzlich eingeführten Kategorisierung werden in diesem Abschnitt technische Unterscheidungen getroffen. Dies ist zum einen wichtig, um Produktion, Einsatz und Aufkommen von Verpackungen tiefergehend einzuordnen, zum anderen lässt diese Kategorisierung eine differenziertere Betrachtung der Recyclingfähigkeit und des Einsatzes von Rezyklaten zu.

Flexible und starre Verpackungsprodukte

Kunststoffverpackungen werden in flexible und starre Gruppen unterteilt. Flexible Kunststoffverpackungen umfassen Folien sowie Beutel, Tragetaschen und Säcke. Starre bzw. formstabile Kunststoffverpackungen umfassen Hohlkörper, wie Flaschen, Becher, Dosen, Fässer, Kanister, Eimer und Intermediate Bulk Container (IBC) sowie sonstige starre Verpackungen, wie Kästen, Steigen, Paletten, Verpackungsbänder und Verschlüsse (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung 2019). Nach Angaben der Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. entfallen sowohl auf flexible als auch auf starre Kunststoffverpackungen etwa 50 % der Produktionsmenge (IK 2018).

Food- und non-food-Verpackungen

Des Weiteren lässt sich zwischen food- und non-food-Verpackungen unterscheiden. Dabei sind die gesetzlichen Anforderungen und Zulassungsverfahren für Lebensmittelkontaktmaterial maßgeblich.

In der Verordnung (EU) Nr. 10/2011 werden Beschaffenheitsanforderungen an Kunststoffmaterialien gestellt, die für den Lebensmittelkontakt bestimmt sind. Für

Kunststoffrezyklate gilt die strengere Verordnung (EU) 282/2008, welcher nur ausgewählte Recyclingkonzepte und Rezyklate gerecht werden. Der Rezyklateinsatz in Lebensmittelkontaktmaterial ist somit nur in Ausnahmefällen möglich. Laut GVM sind rund 44% der in Deutschland hergestellten Kunststoffverpackungen für einen Lebensmittelkontakt bestimmt (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung 2020).

Verpackungen für Bauprodukte und andere Bedarfsgegenstände müssen diesen strengen Anforderungen nicht genügen, was den Einsatz von Rezyklaten erheblich erleichtern kann. Eine Kaskadennutzung ausgedienter Lebensmittelverpackungen, welche rezykliert als Nicht-Lebensmittelverpackungen eingesetzt werden, erscheint möglich.

Verpackungsfunktionen

Die durch das Verpackungsgesetz eingeführten Unterscheidungen für Verpackungen orientieren sich an unterschiedlichen Funktionen (Tabelle 26). Diese wiederum werden durch unterschiedliche Packmittel erfüllt, von denen einige in Tabelle 26 genannt sind.

Während Verkaufsverpackungen typischerweise als Verkaufseinheit aus Ware und Verpackungen angeboten werden und dabei verschiedene der in § 3 Absatz 1 VerpackG genannten Verpackungsfunktionen (Aufnahme, Schutz, Handhabung, Lieferung, Darbietung) erfüllen können, z. B. den Transport eines Produktes vom Handel zum Endverbraucher ermöglichen, handelt es sich bei Umverpackungen um Umhüllungen, die eine bestimmte Anzahl von Verkaufseinheiten enthalten und dem Verbraucher typischerweise zusammen damit angeboten werden oder die zur Bestückung von Regalen dienen (§ 3 Absatz 1 Nr. 2 VerpackG). Transportverpackungen nehmen vor allem eine Schutzfunktion ein, da sie unter anderem die Ware beim Transport vom Hersteller zum Vertreiber vor möglichen Schäden bewahren sollen (Pfohl 2018).

Tabelle 26: Verpackungskategorien nach VerpackG, Verpackungsfunktionen nach (Pfohl 2018) und Beispiele für eingesetzte Packmittel

Verpackungskategorie nach VerpackG	Primäre Funktionen (in Klammern: zugeordnete Funktionen aus §3 Abs. 1 VerpackG)	Packmittelbeispiele
Verkaufsverpackung	Lager- und Transportfunktion (Aufnahme, Schutz, Lieferung), Verwendungsfunktion (Handhabung)	Flaschen, Eimer, Tüten, Schachteln, die zusammen mit dem Produkt eine Verkaufseinheit bilden
Umverpackung	Identifikations- und Informationsfunktion, Verkaufsfunktion (Darbietung)	Blister, Folien, Kartonagen oder ähnliche Umhüllungen, die als zusätzliche Verpackungen um Verkaufsverpackungen verwendet werden
Transportverpackung	Schutzfunktion (Schutz), Lager- und Transportfunktion (Lieferung)	Fässer, Kanister, Kisten, Säcke, Paletten, Kartonagen, geschäumte Schalen, Schrumpffolien und ähnliche Umhüllungen, die vor allem dem Warentransport und der Lagerhaltung dienen

6.2.2 Für das Verpacken von Bauprodukten eingesetzte Packmittel und Kunststoffe

Dieser Abschnitt stellt dar, welche Verpackungen und dazugehörigen Kunststoffsorten für Bauprodukte von besonderer Bedeutung sind. Mit 87 % aller Kunststoffverpackungen finden Polyethylen (PE-LD; PE-HD), Polypropylen und Polyethylenterephthalat vorrangige Anwendung. Hinzu kommen Polystyrol, Polyvinylchlorid und expandiertes Polystyrol (IK 2018).

Diese Polymere können sich in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften wie Schmelzpunkt und Dichte unterscheiden. Solche Materialunterschiede sind jedoch visuell nicht immer wahrnehmbar (Kaßmann, Monika und DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2014). Diese hohe Heterogenität erschwert bereits den Sortierprozess, da IR-spektroskopisch gestützte und dichte-basierte Sortierverfahren erforderlich sind.

Verkaufs- und Umverpackungen

Aus dem Katalog systembeteiligungspflichtiger Verpackungen (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020a) lassen sich erste Hinweise auf die für Bauprodukte eingesetzten Verpackungen finden. Detailliert aufgezeigt werden dort allerdings nur Verkaufs- und Umverpackungen. Tabelle 27 stellt diese Auflistung ausführlich dar. Zusätzlich werden dort auch die typischerweise verwendeten Kunststoffe genannt, soweit diese bestimmbar waren.

Tabelle 27: Packmittel und Anwendung nach Produktkategorien nach (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020a) und typischerweise dafür verwendete Kunststoffe (Niaounakis, 2020; R. Beswick & D. J. Dunn, 2002; Valpak, 2013)

	Baustoffe	Installationen	Bauchemie	Heimwerker und Garten	Wichtigste verwendete Kunststoffe
Folien	X	X		X	PE-LD, PE-HD, PP
Einschläge	X	X	X	X	PE
Schrumpfhäuten		X		X	PE-LD
Stretchfolie		X			PE-LLD
Beutel	X	X	X	X	PET, BOPP, PE, Nylon, andere Polymere, andere Materialien
Säcke	X		X		PE-LD, PE-HD, PP
Big Bags	X		X		PE-HD, PP
Zuschnitte				X	
Polstermaterial	X	X		X	Luftkissen aus PE-LD, PE-HD, EPS
Bänderolen				X	PP, OPP, PET, PE-LD, PVC, PS
Kantenschutz	X	X		X	
Blister				X	PVC, PP
Aufhänger				X	
Halterungen				X	
Hängeetiketten				X	
Umreifungen				X	PP, PET
Versteifungen		X			
Wickelhülsen	X	X		X	
Formteile	X	X		X	
Kisten				X	PE-HD, PP,
Koffer				X	
Dispenser				X	
Schachteln				X	PE-HD, PP

	Baustoffe	Installationen	Bauchemie	Heimwerker und Garten	Wichtigste verwendete Kunststoffe
Stifte			X		
Flaschen			X		PET, PE-HD, PP, PS, PE-LD
Dosen			X		PS,
Fässer			X		PE-HD
Eimer	X		X		PE-HD,
Tuben			X		PE-LD,
Hobbocks			X		
Kanister			X		HD-PE,
Schläuche			X		
IBCs			X		
Kartuschen			X		
Spundfässer			X		
Verschlüsse			X		PE-LD, PP

X = Packmittel wird in dieser Produktkategorie verwendet

Transportverpackungen

Auch zu Transportverpackungen weist der Katalog systembeteiligungspflichtiger Verpackungen (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020a) eine Zusammenstellung der wichtigsten Packmittel auf. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Bereich Folien (Niaounakis 2020). Diese werden je nach Funktion als Transport-, Stretch- oder Bündelungsfolie bezeichnet und zumeist zum Umwickeln von palettierten Waren eingesetzt (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020a). Die genannten Folien bedecken Güter oder Produkte ganz oder teilweise und werden typischerweise auch auf die Palette selbst aufgebracht. Dies dient der Sicherung der Ladung, sowie dem Schutz vor Witterung (Niaounakis 2020). Auch eine Studie des UBA (Schüler 2020) verweist darauf, dass im Bereich der Bauprodukte Stretch- und Schrumpffolien hauptsächlich als Palettenverpackung für Baustoffe und Installationen eingesetzt werden. Hinzu kommen Umreifungen zur Ladungssicherung (Niaounakis 2020). Die Folien sind typischerweise aus nur einer Schicht hergestellt. Hier werden zumeist PE-LD, PE-LLD, PE-HD und PP-Polymere eingesetzt, allerdings können Polymergemische in Monolayerfolien nicht ausgeschlossen werden (Niaounakis 2020).

In dem überwiegend gewerblichen Handel von Bauprodukten sind zudem Mehrwegverpackungen, zu welchen zumeist auch Paletten gehören, stark verbreitet. Ihr Einsatz wird in Kapitel 6.3.1 beschrieben.

6.2.3 Stoffstrombild für die eingesetzten Verpackungen

Bauproduktverpackungen durchlaufen mehrere Wertschöpfungsstufen von der Herstellung über die Nutzungsphase bis zur Entsorgung. Die Quantifizierung des branchenspezifischen Verpackungsbedarfs und -abfallaufkommens erfordert zunächst eine qualitative Analyse der Abläufe (Abbildung 24).

Der Betrachtungsrahmen (durch eine dick gezeichnete, grüne Linie dargestellt) umfasst die inländische Herstellung, Nutzung, Sammlung und Entsorgung der betrachteten Kunststoffverpackungen. Eingehende und ausgehende Stoffströme, wie Im- und Exporte, sowie die in verschiedenen Entsorgungsoptionen fließenden Abfälle werden berücksichtigt.

In der ersten Wertschöpfungsstufe („Herstellung von Kunststoffverpackungen“) werden Polymere zu Kunststoffverpackungsmaterial verarbeitet. Die Polymere und Packmittel sind beispielhaft für die im vorigen Kapitel ausführlich beschriebenen Verpackungsarten. Auf dieser Stufe findet auch Im- und Export von Leerverpackungen statt.

Die Verpackungen werden in der zweiten Stufe („Verpackungsnutzung“) bei der Bauproduktenherstellung als solche eingesetzt und mit den Produkten in Verkehr gebracht. Auf dieser Wertschöpfungsstufe finden ebenso Im- und Exporte von verpackten Bauprodukten statt.

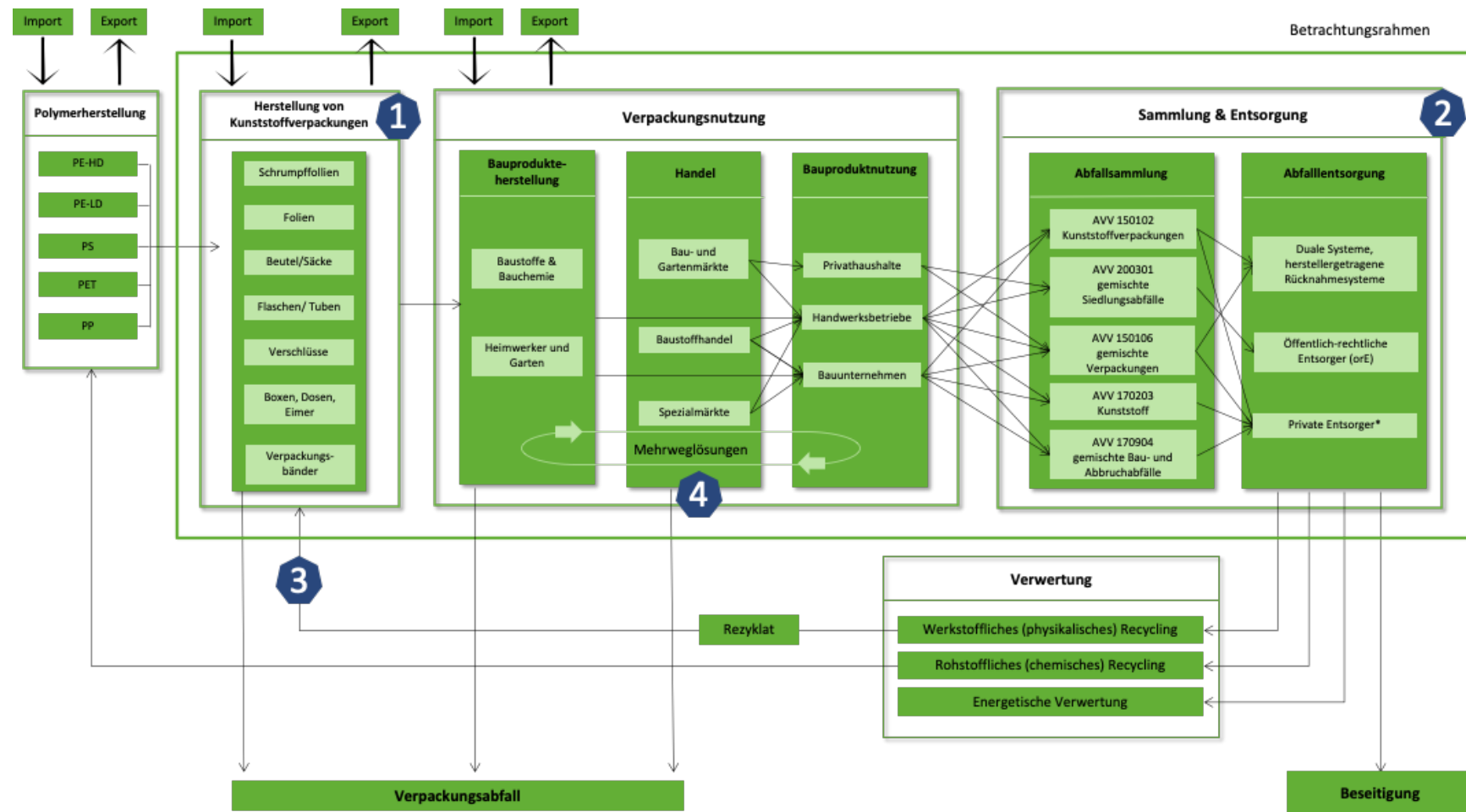
Wie in Abbildung 24 durch drei vertikale Pfeile angedeutet, die den Bilanzrahmen verlassen, fallen bereits bei der Verpackungsherstellung, der Bauprodukteherstellung und im Handel Verpackungsabfälle an. Da diese in einer sektoralen Betrachtung jedoch nicht dem Baugewerbe zuzurechnen sind, sondern dem verarbeitenden Gewerbe bzw. dem Handel, werden diese Abfälle im weiteren Verlauf des Kapitels nicht näher betrachtet. Allerdings handelt es sich bei diesen um sortenreine Abfälle, das hochwertige Recycling ist allein aus wirtschaftlichen Gründen geboten und entspricht dem Regelfall.

Die bei der Bauproduktnutzung auftretenden Verpackungsabfälle werden nach ihrer Anfallstelle, d.h. privaten Endverbrauchern, vergleichbaren Anfallstellen und gewerblichen Anfallstellen, unterschieden (siehe dazu auch Kapitel 6.2). Diese Zuordnung entscheidet bei der dritten Wertschöpfungsstufe „Sammlung und Entsorgung“ über die anzuwendenden Abfallschlüssel und den Entsorgungsweg.

Der Verpackungsabfall des privaten Endverbrauchs wird gemäß der Abfallverzeichnisverordnung unter gemischte Verpackungen (Abfallschlüssel 150106) oder gemischte Siedlungsabfälle (Abfallschlüssel 200301) gesammelt und quantifiziert. Verpackungen von Bauprodukten, die von gewerblichen Endverbrauchern genutzt werden, werden entweder als Plastikverpackungen (Abfallschlüssel 150102), gemischte Verpackungen (Abfallschlüssel 150106), gemischte Bau- und Abbruchabfälle (Abfallschlüssel 170904) oder Kunststoff (Abfallschlüssel 170203) gesammelt. In einem Interview mit einem privaten Entsorger wurde deutlich, dass beim gewerblichen Endverbraucher besonders der verfügbare Platz bspw. auf einer Baustelle darüber entscheidet, wie viele Container zur sortierenden Sammlung aufgestellt werden. Für das hochwertige Recycling ist es selbstverständlich von Vorteil, wenn die Vorgaben des Verpackungsgesetzes eingehalten und verpackungsspezifische Sammelsysteme genutzt werden.

Der Verpackungsabfall des privaten Endverbrauchs wird über die dualen Systeme entsorgt. Gewerbliche Endverbraucher beauftragen private Entsorger. So gesammelte Verpackungsabfälle werden zum Teil der werkstofflichen und seltener der rohstofflichen Verwertung zugeführt, womit sich der Kreis zur Verpackungs- bzw. Polymerherstellung schließt. Die Beseitigung spielt bei Kunststoffverpackungen nur eine sehr untergeordnete Rolle (Schüler 2020), ihrer Position am Ende der Abfallhierarchie entsprechend.

Abbildung 24: Stoffstrombild der Wertschöpfungskette von Kunststoffverpackungen, die zum Verpacken von Bauprodukten verwendet werden.



*Eine private Entsorgung darf nur im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben geschehen. Die Überlassungspflichten nach § 17 KrWG sind zu beachten.
 Die Zahlen (1)-(4) beziehen sich auf die im Text genannten Kreislaufwirtschaftsstrategien.
 Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.

Am dargestellten Stoffstrombild lässt sich verdeutlichen, welche Kreislaufwirtschaftsstrategien auf welcher Stufe der Wertschöpfung ansetzen können, um den Einsatz von Rohstoffen und Energie sowie die mit der Abfallentsorgung verbundenen ökonomischen und ökologischen Kosten zu vermindern: Bei der Herstellung von Kunststoffverpackungen und Bauprodukten (1) kann durch optimiertes Produkt- und Verpackungsdesign eine *Abfallvermeidungsstrategie* ansetzen. Die Sammlung und Entsorgung der Verpackungsabfälle (2) lässt durch ein entsprechendes Abfallmanagement auf eine möglichst hochwertige *werkstoffliche Verwertung* ausrichten. Bei der Herstellung von Kunststoffverpackungen (3) kann ein *Einsatz von Rezyklaten* verfolgt werden, sei es aus Quellen desselben oder eines anderen Stoffkreislaufs.

Mehrweglösungen bewegen sich zwischen Bauproduktherstellung, Handel und Nutzung (4) und erlauben bildlich gesprochen ein „Kurzschließen“ des Stoffkreislaufs, da diese Verpackungen nach dem Einsatz erneut verwendet werden, ohne die Abfalleigenschaft anzunehmen. Die Stufen der Abfallverwertung, der Polymerherstellung und der Herstellung von Verpackungen können somit für eine gewisse Anzahl an Nutzungszyklen übersprungen werden, was ebenfalls eine effektive Strategie der *Abfallvermeidung* ist.

Auf die verschiedenen Kreislaufwirtschaftsstrategien wird im Kapitel 6.3 detailliert eingegangen.

6.2.4 Abschätzung des Verpackungsaufkommens durch Bauprodukte

Die Abschätzung des Verpackungsaufkommens durch Kunststoffverpackungen von Bauprodukten setzt sich in dieser Studie aus drei Betrachtungsebenen zusammen. Dies sind die Verpackungsmittelproduktion, der Verpackungseinsatz und der Verpackungsverbrauch. Die Nutzung dieser Begrifflichkeiten basiert auf der Definition in (Schüler 2020) und wird im

6.2.4.1 Quantifizierung des Verpackungsaufkommens auf unterschiedlichen Ebenen

Produktionsmenge

Die *Produktionsmenge* von Kunststoffverpackungen gibt einen ersten Hinweis auf die in Deutschland eingesetzte und verbrauchte Menge von Kunststoffverpackungen. In Deutschland besteht jedoch ein Exportüberhang von 28 % (Conversio Market & Strategy GmbH 2018). Somit ist der inländische Verpackungseinsatz deutlich geringer als die inländische Produktion. Die Exportmenge wird nicht nach Verpackungsprodukten differenziert und kann aus diesem Grund nur als Durchschnittswert angewendet werden.

Verpackungseinsatz

Der *Verpackungseinsatz* im Inland beschreibt die Nachfrage nach Verpackungsprodukten durch Hersteller von Bauprodukten in Deutschland (Schüler 2020). Die eingesetzten Verpackungen stammen sowohl aus inländischer Verpackungsmittelproduktion wie auch aus importierter Leerverpackung. Zahlen des Verpackungseinsatzes sind die Grundlage für die Einschätzung des baubereichenspezifischen Kunststoffverpackungsbedarfs.

Verpackungsverbrauch

Der *Verpackungsverbrauch* beschreibt den durch Bauprodukte generierten Kunststoffverpackungsabfall. Dieser Wert wird berechnet, indem die Menge der in Deutschland hergestellten Bauprodukte samt ihren Verpackungen um die Importe und Exporte bereinigt wird. Der Wert gibt Hinweise auf den potenziellen Input in das Kunststoffverpackungsrecycling durch Verpackungen von Bauprodukten.

Der Verpackungsverbrauch wird in dieser Studie nach privaten und gewerblichen Endverbraucher*innen getrennt betrachtet.

6.2.4.2 Darstellung der Datenlage

Zunächst wird im Folgenden dargestellt, wie sich die Ebenen des Abfallaufkommens errechnen lassen, Tabelle 28. Dies ist angelehnt an die Methodik in (Schüler 2020). Da jedoch die dazu speziell für den Bereich der Bauprodukte benötigten Daten nicht verfügbar sind, werden im Folgenden Annäherungen an diese vorgenommen.

Tabelle 28: Berechnungsmethode des Aufkommens von Verpackungen (eigene Darstellung nach (Schüler, 2020))

	Index	Benötigte Daten im Idealfall
1	Produktionsmenge von Kunststoffverpackungen für Bauprodukte	Menge der in Deutschland produzierten Bauproduktverpackungen
2	Verpackungseinsatz für in Deutschland hergestellte Bauprodukte	Daten aus 1 exportierte Kunststoffverpackung importierte Kunststoffverpackung
3	Verpackungsverbrauch von in Deutschland verwendeten Bauprodukten	Daten aus 2 Export von verpackten Bauprodukten Import von verpackten Bauprodukten
4	Durch gewerbliche Endverbraucher Durch private Endverbraucher	Daten aus 3 differenziert nach Anfallstellen

Produktionsmenge

In Deutschland sind im Jahr 2017 insgesamt 4378 kt Kunststoffverpackungen produziert worden (Conversio Market & Strategy GmbH 2018). Von diesen entfielen 56%, also rund 2452 kt, auf Verpackungen für den Non-food-Einsatz (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung 2020). Für das Jahr 2018 liegen die Produktionszahlen laut Herstellerverband bei 4461 kt (IK o. J.).

Im weiteren Verlauf werden die bestätigten Zahlen aus dem Jahr 2017 verwendet. Diese lassen sich nun weiter nach hergestellter Menge je Packmittel-Segment untergliedern (Tabelle 29).

Tabelle 29: Herstellungsmenge von Non-food-Kunststoffverpackungen im Jahr 2017 (eigene Darstellung nach Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung, 2020)

Obersegment	Packmittel-Segment	Menge Non-food in kt	Summe je Obersegment in kt
Flaschen und Verschlüsse	PET-Flaschen	29	275*
	Sonstige Flaschen	135	
	Verschlüsse	112	
Folien und Kleinbehälter	Becher	85	1218*
	Beutel, Schalen, Einschläge	759	
	Transportfolien	341	
	Pflanztöpfe	24	
Großverpackungen	Kanister, Eimer, Fässer, IBCs	200	579*
	Kästen, Steigen, Paletten	272	
	Verpackungsbänder	104	
Rest		361	
Gesamt		2452*	

* Abweichende Summen sind auf Rundungsfehler zurückzuführen.

Es liegen keine statistischen Daten hinsichtlich des baubereichenspezifischen Verpackungsbedarfs vor. Somit sind nur Schätzungen möglich. Die Autor*innen schätzen den Anteil an der Menge der Nichtlebensmittelverpackungen auf 15 %, was bei der Produktionsmenge im Jahr 2017 rund 370 kt entspricht. Unter der vereinfachenden Annahme einer im gesamten Non-food-Bereich proportionalen Aufteilung ergibt sich für die Packmittelsegmente folgende Aufteilung:

- Flaschen und Verschlüsse: 40 kt
- Folien und Kleinbehälter: 180 kt
- Großverpackungen: 90 kt
- Rest: 50 kt

Wenngleich diese Daten mit großen Unsicherheiten behaftet sind, erlauben sie eine Einschätzung der Größenordnung. Sie dienen zugleich der Abschätzung des Rezyklateinsatzpotenzials und werden in Kapitel 6.3.3.4 erneut aufgegriffen.

Verpackungseinsatz

Unter Berücksichtigung eines Exportüberhangs von 28 % (Conversio Market & Strategy GmbH 2018) verbleiben von der soeben genannten Produktionsmenge rund 270 kt für den inländischen Einsatz von Kunststoffverpackungen für Bauprodukte.

Verpackungsmittelverbrauch

Der Gesamtverbrauch von Kunststoffverpackungen über alle Branchen hinweg lag im Jahr 2018 bei 3.235,8 kt (Schüler 2020).

Die jährlich vom Umweltbundesamt veröffentlichte Studie zum Aufkommen und zur Verwertung von Verpackungsabfällen gab für das Jahr 2018 Auskunft über den Verpackungsverbrauch, der

durch Bauprodukte generiert wird (Schüler 2020). Zur Einordnung der Studienergebnisse wird zunächst der dort gewählte Betrachtungsrahmen mit dem in dieser Studie gewählten kontextualisiert. In (Schüler 2020) werden die Verpackungen quantifiziert, die in Deutschland durch die Nutzung von Bauprodukten verbraucht werden. Dies umfasst die entleerten, vormals mit Bauprodukten befüllten Verpackungen. Diese stammen sowohl aus inländischer Produktion als auch aus Importen. Als Betrachtungsrahmen werden alle Produkte gewählt, die zu einem relevanten Teil über Baumärkte, Gartenmärkte und den Baustoffhandel in Verkehr gebracht werden (Schüler 2020). Zum Zwecke der Übersichtlichkeit und zur Verdeutlichung, welche Produkte unter diese Definition fallen, wurden drei Produktkategorien gebildet. Diese sind „Baustoffe und Bauchemie“, „Werkzeuge, Eisenwaren, Bauelemente, Installationen“, sowie „Sonstige Artikel des Baumarkts und des Baustoffhandels“. Unter diesen Kategorien werden ausführliche Produktbeispiele genannt. Verglichen mit den Kategorien und den zuzuordnenden Produkten, die in dieser Studie als Betrachtungsrahmen festgelegt wurden, ist die Produktanzahl umfassender. Aus diesem Grund muss davon ausgegangen werden, dass auch der Verpackungsverbrauch entsprechend höher ist. Aus Ermangelung der detaillierten Aufschlüsselung des Verpackungsverbrauchs eines jeden Produktes, können die Ergebnisse nicht auf den engeren Betrachtungsrahmen der hier vorliegenden Studie angepasst werden. Jedoch sind die Ergebnisse richtunggebend und es lässt sich schlussfolgern, dass sie den Verbrauch an Kunststoffverpackungen für Bauprodukte nach oben hin begrenzen.

Insgesamt wurde ein Kunststoffverpackungsverbrauch von 235,9 kt im Jahr 2018 ermittelt. Aufgeschlüsselt nach Produktkategorien entfallen 67 kt/a auf Baustoffe und Bauchemie, 69 kt/a auf Werkzeuge, Eisenwaren, Bauelemente, Installationen und 99,9 kt/a auf die sonstigen Artikel des Baumarkts und des Baustoffhandels (Schüler 2020). Diese Zahlen umfassen Verpackungen des gewerblichen Endverbrauchs sowie Verpackungen aus privaten Haushalten und vergleichbaren Anfallstellen. Differenziert ausgewiesen wird dies nicht, was eine weitere, detailliertere Zuordnung unmöglich macht.

Eine mögliche Überprüfung dieser errechneten Menge ist eine Berechnung des Verpackungsverbrauchs basierend auf der Abfallmenge. Dies wird gestützt durch die Annahme, dass 95 % der verbrauchten Verpackungsmaterialien im selben Jahr im Abfallstrom wiederzufinden sind (Conversio, 2018). Über den Anteil von Kunststoffverpackungen im Abfallstrom des Baugewerbes lassen sich in einer britischen Studie Hinweise finden. Diese gibt an, dass 26% der Bauabfälle Verpackungsabfälle sind. Von diesen werden 17 % den Kunststoffverpackungen zugerechnet (WRAP 2005 wie zitiert in Envirowise, 2006). Dies führt zu einem Kunststoffverpackungsabfall von 4,4 % in Bauabfällen. Bezieht man dies auf die in Deutschland im Jahr 2017 angefallenen 3,87 Millionen t an gemischten Bau- und Abbruchabfälle (Destatis 2019), so ergeben sich rund 170 kt Kunststoffverpackungsabfall. Dies repräsentiert jedoch nur den Verbrauch von Verpackungen auf Baustellen.

6.2.4.3 Ergebnisse

Der vorangegangene Teil macht deutlich, dass die Ebenen der Wertschöpfungskette differenziert betrachtet werden müssen. Die Analyse der Packmittelproduktion ergab, dass schätzungsweise 368 kt/a der in Deutschland produzierten Kunststoffverpackungen zum Verpacken von Bauprodukten genutzt werden.

Der Verpackungseinsatz für Bauprodukte lag bei 170 kt/a Kunststoffverpackungen, nach einer Abschätzung basierend auf der Abfallmenge. Die Datenlage ist vergleichsweise schlecht, so dass diese ermittelten Zahlen mit einer großen Unsicherheit behaftet sind.

Die Ergebnisse zum Verpackungsmittelverbrauch wiederum sind umfassender und bieten überschlüssig Informationen über den Verbrauch von Kunststoffverpackungen durch die Nutzung von Bauprodukten.

Aus der Betrachtung der drei genannten Ebenen des Verpackungsaufkommens lassen sich Rückschlüsse auf das Kunststoffverpackungsaufkommen durch die Nutzung von Bauprodukten ziehen. Die Studie des UBA zu „Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen“ lässt für das Jahr 2018 die Annahme zu, dass sich der jährliche Verbrauch auf rund 240 kt beläuft. Überprüft wurde dies zusätzlich mit der Abschätzung der Menge des Kunststoffverpackungsabfalls von Baustellen in Deutschland. Diese belief sich auf 170 kt/a, beinhaltet jedoch nur den Anteil der gewerblichen Endverbraucher. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Differenz von 70 kt/a auf den privaten Endverbrauch entfällt.

6.3 Ökologische Steigerungspotenziale

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die für Bau- und Baumarktprodukte verwendeten Kunststoffverpackungen überblicksartig dargestellt und quantifiziert. Dabei wurden bereits Ansatzpunkte für Kreislaufwirtschaftsstrategien aufgezeigt (vgl. Abschnitt 1.2), deren Potenziale für eine Einsparung von Ressourcen im Folgenden erörtert werden.

Ziel dieses Kapitels ist es, die für Kunststoffverpackungen von Bauprodukten gegebenen Möglichkeiten zur Einsparung von Ressourcen aufzuzeigen und darzulegen, wie die unterschiedlichen Akteure dazu, unter anderem durch Erhöhung der Kreislaufführung, beitragen können. Neben den Einschätzungen aus der einschlägigen Literatur werden an geeigneter Stelle Praxisbeispiele aufgeführt, um die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen zu verdeutlichen.

Zunächst wird im Kapitel 6.3.1 auf Ansätze zur Abfallvermeidung eingegangen. Das Kapitel 6.3.2 erörtert Recyclingfähigkeit, getrennte Erfassung und Abfallmanagement als Vorbedingungen für eine hochwertige werkstoffliche Verwertung der Verpackungen und stellt den Stand der relevanten Sortier- und Recyclingtechnik dar. Im Kapitel 6.3.3 wird schließlich das Potenzial für den Einsatz von Rezyklaten bei der Produktion der betrachteten Verpackungen theoretisch und anhand von Praxisbeispielen aufgezeigt.

6.3.1 Abfallvermeidung und Wiederverwendung

Im Sinne der Abfallhierarchie stellt Abfallvermeidung die vorrangig zu verfolgende Maßnahme des Umgangs mit Abfall und ein wichtiges Ziel der europäischen und deutschen Gesetzgebung dar (vgl. § 6 KrWG). Dies gilt selbstverständlich auch für den hier betrachteten Fall der Bauproduktverpackungen. Die ökologische Vorteilhaftigkeit liegt darin begründet, dass durch Wiederverwendung (Mehrwegsysteme) oder Verzicht auf Verpackungen, die mit der Herstellung und Entsorgung verbundenen Energieaufwände und Emissionen minimiert werden. In einer volkswirtschaftlichen Betrachtung ist Abfallvermeidung auch ökonomisch sinnvoll, da die durch die Verpackungsabfälle verursachten Umwelt- und Entsorgungskosten vermieden werden können.

6.3.1.1 Verpackungsverzicht und optimiertes Verpackungsdesign

Die einfachste Maßnahme zur Vermeidung von Verpackungsabfällen ist der Verzicht auf Verpackungen, der im Fall von Bauprodukten vergleichsweise weit verbreitet ist. So bieten einige Baumärkte diverse Produkte, von Kleinteilen, wie Schrauben und Nägeln, über einfache Werkzeuge bis hin zu Rohren und Profilen unverpackt an. Auch Bauholz wird häufig ohne Verkaufsverpackung abgegeben. Die Transportverpackungen beschränken sich auf Paletten und sichernde Packhilfsmittel. Schüttgutförmige Baustoffe werden in der Baubranche häufig unverpackt in Silos, Fahrmischern oder Kippfahrzeugen geliefert.

Auch ein optimiertes Verpackungsdesign bietet Möglichkeiten der Abfallvermeidung. Ein Ansatz ist die Verringerung von Materialmassen, wie sie etwa durch die Substitution von

Blisterverpackungen durch Folienbeutel (Klose 2019), die Verringerung von Materialstärken (Schmidt u. a. 2020) oder den Einsatz materialsparender Fertigungs- oder Verpackungstechniken, wie etwa dem Spritzstreckblasverfahren für die Produktion von Flaschen (PackTheFuture 2016) oder dem Stretchhaubenverfahren für die Verpackung palettierter Güter (Schüttgut-Magazin 2015), erreicht werden kann. Auch durch eine Zusammenfassung von typischen Verbrauchsmengen zu größeren Gebindegrößen und die Verringerung von Luftzwischenräumen kann der Materialeinsatz der Verpackung verringert werden (Schmidt u. a. 2020). Die Substitution durch andere Materialien, wie Papier und Pappe oder biobasierte Kunststoffe, ist ein weiterer vorgeschlagener Reduktionsansatz (Schmidt u. a. 2020), dessen ökologische Vorteilhaftigkeit sich allerdings erst im Einzelfall durch einen ökobilanziellen Vergleich erweisen muss und nicht vorausgesetzt werden kann. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung von Papiersäcken mit einer dünnen PE-Schutzschicht anstelle von reinen Kunststoffsäcken als Zement-Verpackung (Grimm 2020). Eine recyclingfreundliche Verpackungsgestaltung und der Einsatz von Kunststoffrezyklaten sind weitere Aspekte eines ökologisch optimierten Verpackungsdesigns, vgl. Kapitel 6.3.2.1 und 6.3.3.

Neben den Herstellern hat auch der Handel die Möglichkeit, auf eine ökologische Verpackungsgestaltung einzuwirken, wovon einige Baumärkte – insbesondere im Bereich von Eigenmarken – bereits Gebrauch machen (Bauhaus o. J.; BaumarktManager 2019; Hornbach Holding 2019, 8; Klose 2019).

6.3.1.2 Wiederverwendbarkeit und Mehrwegsysteme

Einen dritten Ansatz zur Abfallvermeidung stellt die Wiederverwendbarkeit von Verpackungen dar. Ein Beispiel für durch Endverbraucher wiederverwendbare Verpackungen ist die Lieferung von Schüttgütern in wiederverwendbaren Big Bags (FIBC - Flexible Intermediate Bulk Container). Mehrwegverpackungen im engeren Sinne verfolgen das Ziel der Wiederverwendung durch eine systematische Rückführung und Wiederbefüllung der Packmittel. Hierfür werden im Folgenden zunächst einige Beispiele aus dem Baubereich gegeben, bevor auf die logistischen Herausforderungen und die ökologische Bewertung unterschiedlicher Mehrwegsysteme eingegangen wird.

Mehrwegverpackungen im Bausektor

Das klassische Beispiel einer Mehrwegverpackung ist die *Palette*. Nach Experteneinschätzung eines Herstellers für Kunststoffpaletten sind die aktuell für Bauprodukte eingesetzten Paletten in der Regel aus Holz gefertigt. Der Hauptgrund gegen den Einsatz von Kunststoffpaletten liegt in den höheren Kosten im Vergleich zu Holzpaletten, die im Verhältnis zu den vergleichsweise geringen Preisen von Bauprodukten stark ins Gewicht fallen. Jedoch sei grundsätzlich auch ein Einsatz von Kunststoffpaletten denkbar. Dies entspricht den Ergebnissen einer Recherche unter Herstellern von Kunststoffpaletten: Insbesondere durch die Kombination mit Kunststoffkisten werden vielfältige Einsatzmöglichkeiten gesehen (Plastic Pallets 2014). Diese umfassen sowohl den Transport von Bauprodukten zu Baustellen als auch den Abtransport von Abfällen. Als Vorteile gegenüber Holzpaletten werden unter anderem Langlebigkeit, eine hohe Festigkeit und Tragfähigkeit, ein geringeres Gewicht, Unempfindlichkeit gegenüber Witterungsbedingungen und die gute Reinigungsfähigkeit und höhere Arbeitssicherheit (Nägel und Holzsplitter bei Holzpaletten) genannt. Zudem nimmt Kunststoff im Gegensatz zu Holz keine Feuchtigkeit auf, sodass einerseits die transportierten Produkte besser vor Feuchtigkeit geschützt werden, andererseits das Leergewicht der Palette konstant und damit bekannt ist. Durch die höhere Langlebigkeit gelten Kunststoffpaletten trotz der höheren Anschaffungskosten als kosteneffizienter. Einige Kunststoffpaletten lassen sich zudem so ineinander stapeln, dass sie einen geringeren Platzbedarf bei Lagerung und Leertransport aufweisen als Holzpaletten (Simplicity 2019; Marschner 2017; Jones 2018; Plastic Pallets 2014).

Kunststoffpaletten erscheinen aufgrund der genannten Vorteile durchaus geeignet für den Einsatz im Baubereich. Der oben bereits zitierte Experte sieht jedoch die Etablierung einer branchen- bzw. produktspezifischen Standardpalette und die Einrichtung eines Mehrweg-Tauschsystems als eine notwendige Vorbedingung für den Einsatz von Kunststoffpaletten an, was die Erfahrung aus anderen Branchen zeige. Ob der Einsatz von Kunststoffpaletten auch aus ökologischer Sicht sinnvoll ist, bedarf einer genaueren Analyse, die hier nicht abschließend vorgenommen werden kann. Ein Blick auf die Ökobilanz zeigt große Schwankungen je nach betrachteter Palette und gewählter Bilanzierungsmethode und eine starke Abhängigkeit von der Herkunft des eingesetzten Kunststoffs. So weisen Kunststoffpaletten aus Primärmaterial zwar mit 22 bis 166 kg CO₂-eq eine deutlich höhere CO₂-Bilanz auf als Holzpaletten (bis zu 9,9 kg CO₂-eq), diese wird jedoch durch den Einsatz von Sekundärmaterial auf 3,7 bis 4,1 kg CO₂-eq verringert (Deviatkin u. a. 2019). Dies verdeutlicht das ökologische Steigerungspotenzial, das im Einsatz von Rezyklaten in Kunststoffverpackungen für Bauprodukte liegt, auf das im Kapitel 6.3.3 näher eingegangen wird.

Neben *Flachpaletten* eignen sich laut einem Bericht des britischen Abfall- und Ressourcen-Aktionsprogramms (WRAP - Waste and Resources Action Programme) eine Reihe weiterer Mehrwegverpackungen für den Einsatz in der Baubranche. Hier werden nur Kunststoffverpackungen oder Kunststoffverpackungen ersetzende Mehrwegverpackungen anderer Packstoffe wiedergegeben. Faltbare *Boxpaletten* mit Deckel bieten einen hohen Produktschutz und sind daher insbesondere für die Aufnahme empfindlicher Bauprodukte wie Beleuchtung geeignet und ersetzen Einwegverpackungen aus Pappe, Folie und Holzpaletten. Wiederverwendbare *Big Bags*, die mit einem Entleerventil am Boden versehen sind, können feine Schüttgüter wie Sand aufnehmen und anstelle von Papier- oder Plastiksäcken oder einmalig verwendbaren Big Bags eingesetzt werden. Mehrfach verwendbare *Kabeltrommeln* aus Holz können Einmal-Trommeln aus Pappe oder Kunststoff ersetzen. Kleine faltbare oder ineinander stapelbare *Kisten* eignen sich zur Verpackung kleiner Mengen von gemischten und losen Produkten, wie Einbauten, Armaturen und Werkzeugen, und ersetzen Primärverpackungen aus Pappe oder Folie. (Waste and Resources Action Programme o. J.)

Laut der Expertenaussage eines Kunststoffverpackungsherstellers gab es vor ca. zehn Jahren Versuche mit *Kunststoff-Mehrwegeimern*, die allerdings aufgrund mangelnder Umweltvorteile eingestellt worden seien. Der Ansatz sah vor, diese Eimer mit einem austauschbaren, einmalig zu verwendendem Inlay zu versehen, um eine für die Wiederverwendung ungünstige Verschmutzung des Eimers zu minimieren. Jedoch waren die Eimer dennoch so stark verschmutzt, dass sie schließlich ausgetauscht werden mussten. Ein Experte eines Bauunternehmens nannte den Einsatz von *Mehrwegplanen* anstelle von Einwegplanen als ein weiteres Beispiel aus der Praxis. Im Bereich von Bau- und Gartenmärkten wird zudem bereits eine Mehrweglösung für *Pflanzenpaletten* angeboten. Die Kunststofftrays bestehen aus recyceltem Post-Consumer-Polypropylen und werden über ein Poolsystem verwaltet. Sie können am Ende ihres Lebenszyklus vollständig recycelt werden (Klose 2019).

Nach dieser Übersicht über im Baubereich einsetzbare Mehrwegverpackungen wird im Folgenden auf die logistischen Herausforderungen von Mehrwegsyste men und verschiedenen Lösungsansätzen für das Behältermanagement eingegangen.

Logistische Herausforderungen und Lösungsansätze für Mehrwegsyste me

Wie in der Literaturanalyse des Kapitel 3 (Freiwillige Rücknahmesysteme) herausgearbeitet, stellt die für Mehrwegsyste me relevante Rückwärtslogistik im Vergleich zur Vorwärtslogistik besondere Herausforderungen. Dazu zählen eine schwierigere Prognose, variable Produktqualität und -zustand, ein unbestimmter Verbleib, eine komplexe und intransparente Preisgestaltung, komplexere Produktlebenszyklen und Kundenbeziehungen sowie schwierigere

Verhandlungen zwischen den beteiligten Akteuren (U. Hallmann und Jäger 2010). Anders als im B-to-C-Bereich, in dem Mehrwegsysteme vor der Herausforderung stehen, dass Verbraucher*innen sich ungern mit der Sammlung und Rückgabe von Verpackungen beschäftigen (boxline o. J.), bietet der B-to-B-Bereich jedoch vergleichsweise gute Voraussetzungen für die Etablierung von Mehrwegverpackungssystemen.

Der österreichische Logistikverbund Mehrweg bietet auf seiner Website ein Analysewerkzeug an, mit dem das Potenzial für die Nutzung einer Mehrwegtransportverpackung (MTV) für ein gegebenes Produktsortiment untersucht werden kann. Dabei fließen elf Faktoren ein, die durch die Anwender*in auf einer zehnstufigen Ordinalskala eingeschätzt und mit einer Gewichtung versehen werden können, was die Aggregation zu einer Gesamtbewertung erlaubt. Demnach ist eine Mehrweglösung umso erfolgversprechender,

- ▶ je weniger die Primärverpackung angepasst werden muss, um in der MTV verpackt werden zu können,
- ▶ je besser die Größe und Menge des Produktes für die betrachtete MTV geeignet ist,
- ▶ je angemessener die Zahl der Produkte pro MTV für die Abgabestellen ist,
- ▶ je größer die Vorteile einer MTV bei der Transportverpackung sind,
- ▶ je stärker sich der Produktschutz durch die MTV erhöht,
- ▶ je regelmäßiger ein Gesamtgewicht von 12 kg eingehalten wird,
- ▶ je besser die MTV für die Präsentation der Ware verwendet werden können,
- ▶ je besser Marketing-Aspekte erfüllt werden,
- ▶ für je mehr Arten des Transports sich die MTV eignen,
- ▶ je schneller sich die Produkte verkaufen und
- ▶ je umfassendere Synergien mit anderen Produkten, vor allem derselben Warengruppe, genutzt werden können. (Logistikverbund Mehrweg 2017)

Für Mehrwegsysteme ist generell eine Verwendung von standardisierten Behältern sinnvoll, um ökonomische Skaleneffekte zu realisieren, wie bereits durch die Experteneinschätzung eines Kunststoffpalettenherstellers zu einer erforderlichen branchenweiten Standardisierung von Paletten verdeutlicht wurde. Beispiele hierfür sind Europaletten, das Kleinladungsträgersystem des Verbands der deutschen Automobilindustrie (Euroboxen), verschiedene Faltboxsysteme und Big Bags. Es gibt verschiedene logistische Konzepte zur Realisierung von Mehrwegsystemen, von denen die gängigsten im Folgenden beschrieben werden.

Bei *Tauschsystemen* werden an der Beladestelle und/oder an der Entladestelle beladene Ladungsträger gegen leere Ladungsträger gleichen Typs in derselben Anzahl und Qualität getauscht. Der Tausch findet zwischen Sender und Spediteur bzw. zwischen Spediteur und Empfänger statt. Das bekannteste System dieses Typs ist der Europaletten-Pool. Die standardisierten Paletten können gegen eine Lizenzgebühr an die European Pallet Association (EPAL) genutzt und unter allen Lizenznehmern getauscht werden. In Deutschland haben sich zwei Varianten etabliert: Beim Bonner Palettentausch werden die Paletten nur an der Entladestelle getauscht, verbunden mit einer Verpflichtung einer Rückführung der Leerpaletten zum Absender. Dieses Modell bietet sich an, wenn Transporteure dieselben Touren regelmäßig fahren. Beim Kölner Palettentausch werden die Paletten sowohl an der Be- als auch an der

Entladestelle getauscht. Diese Variante ist besonders für wechselnde Touren geeignet. (Grimm 2013)

Eine weitere Möglichkeit ist es, zum Zeitpunkt der Anlieferung die Anzahl und Qualität der angelieferten Paletten einem Palettenkonto gutzuschreiben, und die entsprechende Menge zu einem späteren Zeitpunkt zurückzugeben (Elbert und Lehner 2019).

Demgegenüber ist bei *Poolsystemen* ein Pooling-Anbieter als Manager für die Beschaffung, Reparatur, Verteilung und Entsorgung der Ladungsträger verantwortlich. Die Ladungsträger gehen nach der Benutzung an den Pooling-Anbieter zurück. Dieser übernimmt Qualitätskontrolle, Reinigung und gegebenenfalls Reparatur und Ersatz der Ladungsträger und verlangt für seine Dienstleistung eine Service-Gebühr. (Elbert und Lehner 2019)

Hier gibt es zum einen die Möglichkeit der Miete von Ladungsträgern: Der Befüller mietet die Ladungsträger vom Pooling-Anbieter für den Zeitraum der Nutzung. Der Pooling-Anbieter holt diese anschließend am Entladeort ab. Dieses Modell wird zum Beispiel von Mietpaletten-Anbietern wie CHEP oder LPR realisiert. Ein anderes Modell ist das sogenannte Pool-Management, bei dem die Ladungsträger im Besitz des Pooling-Anbieters bleiben. Bei ordnungsgemäßer Rückgabe wird ein (elektronischer) Gutschein ausgestellt bzw. eine Gutschrift auf einem Bestandskonto gebucht. Auf dieses Modell greifen beispielsweise die Paletten-Pools von Inter.PAL, Polymer Logistics, PAKi, PALETTEN-SERVICE Hamburg und vPOOL zurück. (GS1 Austria und Logistikverbund Mehrweg 2018)

Das *Tauschsystem* bietet in der Theorie den Vorteil, dass zusätzliche Fahrten für den Transport von leeren Ladungsträgern vermieden werden können. In der Praxis wird jedoch häufig von der Ausstellung von Schuld- bzw. Gutscheinen Gebrauch gemacht, wodurch eine Rückgabe der Ladungsträger zu einem späteren Zeitpunkt vereinbart wird. Dadurch werden schließlich doch zusätzliche Fahrten notwendig. Hinzu kommt, dass es in der Regel keine Vertragsbeziehung zwischen Spediteur und Empfänger gibt, sodass es häufig zu Unstimmigkeiten beim Ladungsträgertausch kommt, etwa hinsichtlich der Einschätzung der Qualität, die trotz einer Standardisierung zur Qualitätsbestimmung einer gewissen Subjektivität unterliegt. Hinzu kommt, dass durch saisonale Schwankungen zeitweise nicht genügend Ladungsträger für den Tausch zur Verfügung stehen. (Elbert und Lehner 2019)

Ein weiteres Problem des Tauschsystems sind die relativ hohen Kosten. Lange und Hoffmann ermittelten für den Europaletten-Pool Umlaufkosten (die Gesamtkosten für die einmalige Nutzung einer Palette einschließlich Leergut-Logistik) von 3,81 bis 4,96 EUR je Europalette (Lange und Hoffmann 2009). Der mit Abstand größte Kostenpunkt sind demnach Ersatz- und Reparaturkosten, gefolgt von Kosten für operative Tätigkeiten wie Sortieren oder Qualitätskontrolle, sowie Verwaltungskosten. Kosten für zusätzliche Transporte und offene Forderungen spielen nur eine untergeordnete Rolle. Die Kosten verteilen sich zudem ungleich zwischen den beteiligten Akteuren: Spediteure tragen mit 60 bis 65 % den höchsten Anteil der Umlaufkosten, Verloader 25 bis 30 und Empfänger 10 bis 15 %. In einer ähnlich angelegten Studie zu den Umlaufkosten von Halbpaletten kommen (Lange und Hoffmann 2009) zu dem Ergebnis, dass das Tauschsystem mit der Düsseldorfer Halbpalette Gesamtkosten zwischen 3,39 und 4,81 EUR pro Umlauf erzeugt, während eine vergleichbare Halbpalette im Poolsystem lediglich Umlaufkosten in Höhe von 0,16 bis 0,55 EUR aufweist. Jedoch kommt hier ein Nutzungsentgelt an den Pool-Anbieter hinzu, welches in der Studie nicht systematisch untersucht wurde, jedoch auf bis zu 2 EUR geschätzt wird. Damit ergeben sich in jedem Fall deutlich geringere Gesamtkosten von maximal ca. 2,50 EUR pro Umlauf. (Lange und Siedlarek 2015)

Ökologische Vorteilhaftigkeit von Mehrwegsystemen

Im Hinblick auf die ökologische Bewertung zeigt sich, dass durch den Einsatz von Mehrwegverpackungen (Flach- und Boxpaletten, Big Bags, Kabeltrommeln und Kisten) an Stelle von entsprechenden Einwegverpackungen sowohl Abfall als auch Emissionen von Treibhausgasen vermieden werden können. Dabei gibt es je nach Logistiksystem jeweils eine bestimmte Anzahl von Umläufen, ab denen sich der höhere Aufwand ökologisch amortisiert. Für faltbare Kunststoff-Boxpaletten liegt diese – bezogen auf Treibhausgasemissionen – ohne zusätzliche Leertransporte bei 10 Umläufen, während im Fall separater Abholung 15 Umläufe notwendig sind. Für wiederverwendbare Big Bags liegt der Amortisationspunkt in beiden Fällen rechnerisch bereits bei 1, 2 Umläufen. (Waste and Resources Action Programme o. J.)

Im Fall von IBCs ergab eine vergleichende Lebenszyklusanalyse, dass eine mehrfache Nutzung einschließlich Logistik und Aufbereitung der Behälter bereits ab zwei Umläufen ökologisch einer Verwendung von Einwegbehältern mit anschließendem Recycling oder Entsorgung überlegen ist und die Umweltvorteile mit der Anzahl der Umläufe steigen (Biganzoli u. a. 2018).

Neben der Anzahl der Umläufe von Mehrwegverpackungen stellen Wood und Sturges eine Reihe weiterer Faktoren als relevant für den ökobilanziellen Vergleich von Mehrweg- und Einwegverpackungen heraus: Für die Produktion der Verpackung eingesetzte Rohstoffe und Energie fallen bei Einwegverpackungen stärker ins Gewicht, da die gesamte Belastung auf einen einzigen Transport angerechnet wird. Kürzere Transportdistanzen begünstigen Mehrweglösungen, wobei dieser Faktor bei falt- oder stapelbaren Sekundärverpackungen weniger bedeutsam ist. Bei Mehrwegsystemen muss hingegen jeweils der gesamte Pool der Behälter betrachtet werden, da dieser stets größer ist als die aktuell im Einsatz befindlichen Einheiten. Zudem ist durch die häufig größeren Massen und Volumina von Mehrwegverpackungen die Auslastung von Transportfahrzeugen in der Regel geringer. Bezieht man das Packgut in die Ökobilanzierung mit ein, so spielt auch der bei Mehrwegverpackungen häufig bessere Produktschutz eine Rolle. (Wood und Sturges 2010)

Im ökobilanziellen Vergleich unterschiedlicher Mehrwegkonzepte konnte in einer Fallstudie für eine Lieferkette des Einzelhandels gezeigt werden, dass sowohl für Pooling- als auch für Tauschsysteme die Einrichtung eines zentralen Umschlagplatzes erhebliche ökologische Einsparungen ermöglicht, deren Vorteilhaftigkeit entscheidender ist als die Unterschiede zwischen den verschiedenen Systemen (Accorsi u. a. 2019).

Zusammenfassend gilt, dass Abfallvermeidung und Mehrweglösungen einen Beitrag zur Verringerung des Ressourceneinsatzes und der Umweltfolgen von Bauproduktverpackungen leisten können. Derartige Ansätze bedürfen aber systematischer, ggf. branchenweiter oder sogar -übergreifender Koordination und Management. Es wurde deutlich, dass eine enge Verzahnung von Mehrweg- und Recyclinglösungen sinnvoll ist, indem für die Produktion der Mehrwegbehälter Rezyklat eingesetzt wird und/oder die Behälter am Ende ihres Lebenszyklus wiederum werkstofflich verwertet werden.

6.3.2 Werkstoffliche Verwertung

Die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffverpackungen ermöglicht es, Primärressourcen und Energie einzusparen. So können durch die Substitution von Primärkunststoff durch Sekundärmaterial je nach Kunststoffart rund 1 bis 2 Tonnen Rohstoffe und 40 bis 90 Gigajoule Energie je Tonne Sekundärmaterial eingespart werden (Kranert 2017). Auch ein anteiliger Rezyklateinsatz erzielt ökologische Wirkungen: Am Beispiel von PET-Flaschen wurde gezeigt, dass ein Rezyklatanteil von 35 % bereits zu einer Verringerung des ökologischen Fußabdrucks um etwa ein Viertel führt, während eine Flasche aus 100 % Rezyklat einen um drei Viertel reduzierten Fußabdruck aufweist (Kägi und Dinkel 2018).

Im folgenden Abschnitt wird zunächst die Recyclingfähigkeit von Kunststoffverpackungen als Bedingung für das werkstoffliche Recycling dargestellt. Als weitere Voraussetzung wird die Getrennthaltung an der Anfallstelle aus rechtlicher und organisatorischer Sicht erläutert. Der Abschnitt schließt mit einer Darstellung des Standes der Sortier- und Recyclingtechnik.

6.3.2.1 Recyclingfähigkeit

Eine Voraussetzung für das hochwertige Recycling von Kunststoffverpackungen stellt deren Recyclingfähigkeit dar. Die folgenden Ausführungen sind, wenn nicht anders angegeben, der Veröffentlichung „Circular Packaging Design Guideline - Empfehlungen für die Gestaltung Recyclinggerechter Verpackung“ (FH Campus Wien u. a. 2019) entnommen, die zwar auf österreichische Rahmenbedingungen ausgerichtet ist, jedoch auch für Deutschland eingesetzt werden kann, da die abfallwirtschaftlichen Strukturen ähnlich sind (ebd.). Die im „Mindeststandard zur Bemessung der Recyclingfähigkeit“ (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020b) definierten, spezifischeren Kriterien werden im Anschluss wiedergegeben.

Recyclingfähigkeit (engl. „design for recycling“ oder „recyclability“) von Verpackungen „beschreibt die Eignung einer Verpackung, ein Sortierv Verfahren korrekt zu durchlaufen sowie in einem Recyclingprozess stofflich verwertet werden zu können“ (FH Campus Wien u. a. 2019, 10). Die Bewertung der Recyclingfähigkeit bezieht sich immer auf das gesamte Verpackungssystem aus Verkaufs-, Um- und Transportverpackung und ist auf einen definierten räumlichen und zeitlichen Geltungsbereich beschränkt, da die verfügbaren Sammel- und Verwertungssysteme eine zentrale Rolle spielen. Zur Bewertung der Recyclingfähigkeit werden quantitative sowie qualitative Methoden eingesetzt und kombiniert. Als recyclingfähig gilt ein Verpackungssystem, wenn eine geeignete Sortier- und Recyclinginfrastruktur vorhanden ist, die Sortierung und das Recycling technisch möglich sind und ein Sekundärrohstoffmarkt existiert.

Für Kunststoffverpackungen gelten die folgenden allgemeinen Designempfehlungen:

- ▶ Einsatz weit verbreiteter Materialien wie Polyolefine oder PET,
- ▶ Verwendung möglichst weniger Zusatzstoffe (Additive),
- ▶ Einfache Trennbarkeit der Komponenten,
- ▶ Möglichst transparente, recyclinggerechte Farben.

Verbundmaterialien und Mehrschichtmaterialien sind grundsätzlich problematisch, jedoch können bestimmte Verbunde, etwa co-extrudierte Folien aus verschiedenen PE-Polymeren, verwendet werden.

Für Packhilfsmittel und bestimmte Kunststofftypen lassen sich zudem spezifische Empfehlungen geben:

- ▶ Vermeiden von abtrennbaren Kleinteilen wie Verschlüssen,
- ▶ Verwendung des gleichen Materials und der gleichen Farbe bei Verschlüssen für Flaschen oder Tuben aus PE oder PP
- ▶ Vermeiden von PET in Mehrschichtfolien sowie Blisterverpackungen.

Kriterien für die Recyclingfähigkeit haben auch bereits Einzug in die deutsche Gesetzgebung gehalten. Nach § 21 Abs. 3 VerpackG werden von der Zentralen Stelle Verpackungsregister im Einvernehmen mit dem Umweltbundesamt Mindeststandards für die Recyclingfähigkeit von Verpackungen festgelegt. Diese werden jährlich aktualisiert und dienen den dualen Systemen als Grundlage für die Schaffung von finanziellen Anreizen für recyclinggerechtes

Verpackungsdesign. Auch wenn dieser Mindeststandard unmittelbar nur für systembeteiligungspflichtige Verpackungen anzuwenden ist, stellt er nach Ansicht der Autor*innen einen guten Leitfaden für die Beurteilung der Recyclingfähigkeit dar.

Der Mindeststandard der Zentralen Stelle (Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020b) umfasst drei Kriterien: Das Vorhandensein einer geeigneten Sortier- und Verwertungsinfrastruktur, die maschinelle Sortier- und Trennbarkeit und die Recyclingverträglichkeit des Verpackungsmaterials.

Eine *Sortier- und Recyclinginfrastruktur* wird für folgende Kunststoffverpackungen als gegeben angesehen:

- ▶ Körperförmige Kunststoffverpackungen (Flaschen, Tuben, Eimer, Kanister etc.) aus PE, PP, außer Kartuschen für Dichtmassen
- ▶ Transparente Flaschen aus PET-A
- ▶ Großformatige, nicht Aluminium-bedampfte Folien (> DIN A4) aus PE

Ein begrenztes Vorhandensein einer Recyclinginfrastruktur kann zudem für körperförmige Kunststoffverpackungen aus PS, großformatige Folien aus PP und flexible Kunststoffverpackungen (Tüten, Beutel, Schäume etc.) aus PE und PP angenommen werden. Einen Einzelnachweis für das Vorhandensein einer Recyclinginfrastruktur erfordern hingegen flexible Kunststoffverpackungen aus PP, sowie EPS-Verpackungen (Kantenschutz, Stoßsicherung etc.). Alle anderen Kunststoffverpackungen gelten (derzeit) mangels Recyclinginfrastruktur nicht als recyclingfähig.

Die *maschinelle Sortier- und Trennbarkeit* wird angenommen, wenn keines der folgenden Ausschlusskriterien zutrifft:

- ▶ großflächige Etikettierung (> 50 % der Oberfläche) mit Fremdmaterial
- ▶ Fullsleeve-Etikettierung
- ▶ Multilayer-Aufbau (außer PE-/PP-EVOH)
- ▶ Metallisierung (außer inwändig/ in der Mittelschicht metallisiert)
- ▶ unterschiedliche Kunststoffarten auf Vorder- und Rückseiten
- ▶ großflächig (> 50 % der Oberfläche) aufgebrachte Metallpigmente
- ▶ bei Polyolefinen: Überschreiten einer Dichte von 0.995 g/cm^3 durch Additivieren.

Mit Hinblick auf *Recyclingunverträglichkeiten* werden materialspezifische Ausschlusskriterien definiert: Für Folien und PE-LD werden diverse Barrierschichten ausgeschlossen. Bei formstabilen Verpackungen aus Polyolefinen gelten Silikonkomponenten, geschäumte Elastomere und Nicht-PO-Kunststoffe der Dichte $< 1 \text{ g/cm}^3$ als recyclingunverträglich, im Fall von PE und PP zudem PET-Sleeves, sowie verschiedene Barrierschichten. Für formstabile Verpackungen aus PS werden Fremdkunststoffe oder Multilayer der Dichteklassen 1 bis $1,08 \text{ g/cm}^3$ ausgeschlossen. Für die vorgenannten Verpackungen gelten zudem wasserfeste Klebstoffe in Kombination mit nassfesten Papier-Etiketten als recyclingunverträglich. Bei transparenten PET-Flaschen werden Komponenten aus PET-G, POM und PVC, verschiedene Barrierschichten, Silikonkomponenten, Etiketten oder Sleeves aus PVC, PS oder PET-G, PA-

Additivierung, nicht lösliche Klebstoffapplikationen, nicht magnetische Metalle, Elastomerkomponenten der Dichte $> 1 \text{ g/cm}^3$, sowie Direktdruck ausgeschlossen.

Wie in Kapitel 6.2.4 erläutert, besteht ein Großteil der Kunststoffverpackungen für Bauprodukte aus Folien aus Monomaterial, die auf Baustellen anfallen. Diese sind den oben genannten Kriterien gemäß gut für das werkstoffliche Recycling geeignet. Zudem sind die bei großen kommerziellen Abfallerzeugern anfallenden Folienabfälle im Vergleich zum privaten Endverbrauch weniger stark verunreinigt (Niaounakis 2020), was sich ebenfalls positiv auf die Rezyklierbarkeit auswirkt. Eine systematische Anwendung der dargelegten Kriterien für die Recyclingfähigkeit auf die verschiedenen für Bauprodukte eingesetzten Kunststoffverpackungen ist im Rahmen dieses Projekts jedoch nicht vorgesehen.

6.3.2.2 Getrennthaltung von Kunststoffverpackungsabfällen

Neben der recyclingfähigen Verpackungsgestaltung ist die Getrennthaltung an der Anfallstelle eine weitere wichtige Voraussetzung für ein hochwertiges Kunststoffrecycling (Moser u. a. 2016). Anfallstellen von Bauproduktverpackungen wurden in Kapitel 6.2.3 dargestellt.

Getrennthaltungspflichten

Wie bereits im Abschnitt 6.2 erwähnt, werden typischerweise bei privaten Endverbraucher*innen anfallende systembeteiligungspflichtige Verpackungen im dualen System einer getrennten Sammlung zugeführt. Die Systeme sind nach § 13 VerpackG zu einer vom gemischten Siedlungsabfall (20 03 01) getrennten Sammlung verpflichtet.

Für Bauunternehmen, die aufgrund größerer Verpackungsabfallmengen nicht als private Endverbraucher bzw. haushaltsähnliche Anfallstellen eingestuft werden, ist die Gewerbeabfallverordnung maßgeblich. Nach § 3 Abs. 1 GewAbfV sind Erzeuger und Besitzer von Bau- und Abbruchabfällen verpflichtet, Kunststoffe (Abfallschlüssel 17 02 03) getrennt zu sammeln. Diese Pflicht entfällt jedoch, wenn die getrennte Sammlung technisch nicht möglich oder wirtschaftlich unzumutbar ist (§ 3 Abs. 2 GewAbfV). Als technisch unzumutbar gilt die Getrenntsammlung insbesondere, wenn nicht ausreichend Platz für das Aufstellen von separaten Abfallbehältern zur Verfügung steht (§ 3 Abs. 2 S. 2 GewAbfV). Wirtschaftlich unzumutbar ist die Getrenntsammlung insbesondere dann, wenn aufgrund einer sehr geringen Menge der Abfallfraktion die Kosten für die getrennte Sammlung außer Verhältnis zu den Kosten für eine gemischte Sammlung und anschließender Vorbehandlung stehen (§ 3 Abs. 2 S. 3 GewAbfV).

Von diesen in der Gewerbeabfallverordnung angelegten Ausnahmen von der Getrennthaltungspflicht wird in der Praxis offenbar häufig Gebrauch gemacht. So findet laut Expertenaussagen von Abfallverwertern die Getrennthaltung der Kunststoffverpackungsabfälle auf Baustellen nicht immer konsequent statt. Oft würden Verpackungsabfälle als gemischte Bau- und Abbruchabfälle (Abfallschlüssel 17 09 04) entsorgt, was dem hochwertigen Recycling entgegensteht.

Verpackungsabfallmanagement auf Baustellen

Um Kunststoffverpackungsabfälle auf Baustellen für das Recycling getrennt zu erfassen, ist ein optimiertes Verpackungsabfallmanagement nötig. Dafür ist ein Verständnis für die zeitlichen Entstehungsmuster der betrachteten Abfälle hilfreich. González Pericot et al. (2014) stellen in einer Analyse von zehn Baustellen des Wohnungsbaus fest, dass die meisten Kunststoffverpackungsabfälle mit jeweils rund 20 Gewichts- bzw. Volumenprozent während der Errichtung der Stahlbetonkonstruktion, der Trennwände und bei den Endarbeiten (Fliesenlegen, Putzarbeiten, Verkleidung, Treppenbau, Acrylbeschichtungen, Innenanstrich, Fußbodenausbau, Einziehen von Zwischendecken) anfallen. Abgesehen von der Installation der Haustechnik, bei

der nur geringe Mengen Kunststoffverpackungen anfallen, treten bei allen Phasen zwischen Beginn der Stahlbetonkonstruktion und Abschluss der Endarbeiten Kunststoffverpackungen auf.

Für eine Optimierung des Abfallmanagements auf Baustellen werden folgende Maßnahmen empfohlen (González Pericot 2011):

- ▶ Verpackungsabfall im Abfallmanagementplan einer Baustelle berücksichtigen.
- ▶ Verzeichnis der nächstgelegenen Recyclingunternehmen anlegen.
- ▶ Erforderlichen Platz für die Aufstellung separater Sammelbehälter berechnen, bei ausreichendem Platzangebot getrennte Container für Pappe, Plastik und Holz einrichten. Farbliche Markierung zur Vermeidung von Fehlwürfen.
- ▶ Auspacken der angelieferten Bauprodukte erst unmittelbar vor der Nutzung, um eine Verunreinigung der Verpackung zu vermeiden und gleichzeitig die Produkte optimal zu schützen.
- ▶ Unterweisung des Baupersonals über das Abfallmanagement und die Gründe der Getrenntsammlung des Verpackungsmaterials.

Die ersten drei Forderungen wurden inzwischen durch die Gewerbeabfallverordnung festgelegt. Da ein hoher Anteil der anfallenden Kunststoffverpackungen Folien zur Umwicklung von palettierten Bauprodukten sind (González Pericot u. a. 2014), wird zudem empfohlen, Sammelbehälter für Kunststoff- und Holzabfälle an einer Stelle zu platzieren, an der die palettierten Produkte ausgepackt werden (González Pericot 2011).

6.3.2.3 Sortierung und Recycling von Kunststoffverpackungsabfällen

Wenn die oben beschriebenen Voraussetzungen (Recyclingfähigkeit und getrennte Erfassung) erfüllt sind, können die Kunststoffverpackungen dem Recycling zugeführt werden.

Werkstoffliche Recyclingverfahren für Kunststoffverpackungen sind weit verbreitet und in der Praxis erprobt. Feil und Pretz (2020) beschreiben den aktuellen Stand der Technik, wie im Folgenden zusammenfassend wiedergegeben wird.

Je nach Ursprung und Zusammensetzung der Abfälle werden unterschiedliche Recyclingpfade beschritten. Nach Kunststoffsorten getrennt erfasste Abfallströme, wie in Handel und Gewerbe anfallende Transport- oder Umverpackungen, können direkt von spezialisierten Recyclinganlagen verarbeitet werden. Gemischt erfasste gewerbliche Abfälle werden hingegen in mechanischen Aufbereitungsanlagen behandelt. Wenn diese in relevanten Mengen und ohne größere Verunreinigungen anfallen, können diese dem werkstofflichen Recycling zugeführt werden, andernfalls erfolgt eine energetische Verwertung. Je nach Reinheitsgrad ist zunächst eine Anreicherung in Sortieranlagen erforderlich, bevor in Recyclinganlagen der als Veredelung bezeichnete eigentliche Recyclingprozess stattfindet. Im Fall von getrennt erfassten Verpackungsabfällen aus Privathaushalten, wie sie in Deutschland über die dualen Systeme gesammelt werden, wird eine solche Anreicherung stets angewendet. Bei einer gemischten Erfassung, wie sie in anderen Ländern praktiziert wird, erfolgt zuvor eine weitere Voranreicherung in mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen. (Feil und Pretz 2020)

Für das Recycling von stark verschmutzten Verpackungen, wie etwa gebrauchten Big Bags, ist gegebenenfalls eine besondere Vorbehandlung erforderlich. Entsprechende Anlagen, etwa zum Recycling stark verschmutzter PE-Folien, sind bereits in Betrieb. In einer Vorwaschanlage werden die Abfälle von Störstoffen befreit, bevor der reguläre Recyclingprozess beginnt. (recovery 2018)

Zu Beginn der Anreicherung (auch Sortierung genannt) werden die angelieferten Abfälle zunächst mit Hilfe von Gegenkamm-Schreddern aus den Abfallbeuteln befreit, ohne diese selbst zu zerkleinern, da dies für den weiteren Prozess nachteilig wäre. Der sich anschließende Prozess der Konditionierung dient dazu, den Materialstrom für eine bestmögliche Sortierung vorzubereiten. Mit Hilfe von Trommelsieben und sogenannten Müllsieben wird der Abfallstrom nach Partikelgröße in typischerweise drei Fraktionen klassiert. Die Feinfraktion (etwa unter 40 mm) wird ausgestoßen, während die Mittelfraktion (etwa bis 160 mm) und die Grobfraktion getrennt weiterverarbeitet werden. Anschließend werden flache 2D-Partikel (etwa Folien und Papier) und 3D-Partikel (wie Flaschen und Schalen) mit Hilfe von Ballistik-Abscheidern, Luftstromsichtern oder Trommelscheidern voneinander getrennt. Nach der Konditionierung erfolgt die Sortierung mit dem Ziel, recycelbare Vorkonzentrate zu erzeugen. Zunächst werden Eisen- und Nichteisenmetalle mit Magnetabscheidern bzw. Wirbelstromabscheidern aussortiert. In der sensorbasierten Sortierung werden Partikel spezifischer Kunststoffsorten aufgrund ihrer chemischen Struktur mit Hilfe von NIR-Sensoren (Nahinfrarot) bzw. aufgrund der optischen Arteikeigenschaften wie Form, Größe oder Farbe mit VIS-Sensoren (sichtbares Licht) erkannt und durch einen gezielten Druckluftstrom separiert. Auch eine Kombination verschiedener Sensoren und der Einsatz von Laser-Triangulationssensoren zur Erkennung von 3D-Formen ist möglich. Manuelle Sortierung hingegen wird fast ausschließlich zur Qualitätskontrolle eingesetzt. Zum Abschluss der Anreicherung werden die Vorkonzentrate mit Ballenpressen zu Ballen verdichtet, um sie für einen effizienten Transport zur Recycling-Anlage vorzubereiten. (Feil und Pretz 2020)

Die Veredelung (Recycling im engeren Sinne) beginnt mit dem Zerkleinern der angelieferten Vorkonzentrat-Ballen mit Hilfe von Einwellenzerkleinerern. Anschließend werden zum Schutz der Maschinen zunächst metallische Verunreinigungen sowie Ballendraht entfernt. Dann schließen sich Nass- oder Trockenverfahren zur Reinigung und Sortierung an. In beiden Fällen werden zunächst Frikionswäscher zur Beseitigung von Klebstoff und Etiketten eingesetzt. Als Nassmethoden zur Sortierung kommen die statische Schwimm-Sink-Trennung, die auch in Kombination mit der Nasswäsche erfolgen kann, sowie die dynamische Schwimm-Sink-Trennung mit Hilfe von Hydrozyklonen oder Zentrifugen zum Einsatz. Diese Methoden basieren alle auf der Dichte des zu trennenden Abfalls und können daher Kunststoffsorten und Störstoffe mit hinreichend unterschiedlichen Dichtebereichen voneinander trennen. Unter den trockenen Sortierv Verfahren greift die Zickzack-Sichtung, bei der schwere von leichten Partikeln in einem vertikalen Luftstrom voneinander getrennt werden, ebenfalls auf Dichteunterschiede zurück. Zur Trennung unterschiedlicher Polymere oder Störstoffe mit ähnlichen Dichtebereichen werden, wie bereits bei der Anreicherung, sensorbasierte Verfahren eingesetzt. Neben NIR- und VIS-Sensoren kommen induktive Sensoren zum Einsatz. Letztere werden verwendet, um restliche Metall-Verunreinigungen auszusortieren. Die elektrostatische Separation als weiteres trockenes Sortierv Verfahren nutzt Unterschiede der dielektrischen Konstanten und der elektrischen Leitfähigkeit unterschiedlicher Kunststoffsorten. Die gereinigten und sortierten Kunststofffraktionen werden schließlich mithilfe von Schneidmühlen zu Flakes verarbeitet. Diese werden mechanisch oder thermisch getrocknet und abschließend mit Hilfe von Agglomeratoren oder Extrudern zu Granulaten verarbeitet, um die nachfolgenden Prozesse Lagerung, Transport und Verarbeitung zu erleichtern (Feil und Pretz 2020).

Der spätere Einsatz der Rezyklate entscheidet schließlich darüber, ob ein geschlossenes Kreislaufsystem erreicht wird, oder die aufbereiteten Materialien im Sinne eines Downcyclings für minderwertigere Anwendungen eingesetzt werden. Für den Fall von PE-LD- und PE-LLD-Rezyklaten könnten Schätzungen des Verbandes Plastic Recyclers Europe zufolge bei einer entsprechenden Nachfrage bereits bis zu 50 % der heute auf den Markt gebrachten PE-LD- und

PE-LLD-Rezyklate wieder für Folienanwendungen eingesetzt werden (Plastics Recyclers Europe 2019).

6.3.3 Rezyklateinsatz

Neben der werkstofflichen Verwertung der Verpackungsabfälle ist der Einsatz von Rezyklaten bei der Herstellung neuer Verpackungen ein Kernelement der Kreislaufwirtschaft. Zwar werden generell geschlossene Kreisläufe angestrebt und bieten sich häufig an, grundsätzlich kann aber der Einsatz von Rezyklaten auch branchenübergreifend erfolgen. Es folgt eine Potenzialabschätzung für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten in Bauproduktverpackungen. Dies umfasst eine politische, qualitative und schließlich quantitative Betrachtung.

6.3.3.1 Politische und ökologische Relevanz des Einsatzes von Kunststoffrezyklaten

Seit einigen Jahren verbessert sich das Image des Rezyklateinsatzes in Verpackungen deutlich. Dies lässt sich an den Gewinnern des „Pack The Future“-Awards erkennen: Während unter den Gewinnern in den Jahren 2014, 2015 und 2017 nur jeweils maximal eine Verpackung hauptsächlich für den Rezyklateinsatz ausgezeichnet wurde, waren es 2019 fünf und 2020 drei Verpackungen (PackTheFuture 2020). Auch in der politischen Debatte gewinnt das Thema an Bedeutung. Die Europäische Kommission benannte in ihrer Kunststoffstrategie (Europäische Kommission 2018a) die schwache Nachfrage nach recycelten Kunststoffen als Hindernis und kündigte an, neben der Entwicklung von Qualitätsstandards, der Förderung von Forschungs- und Innovationsprojekten und der Initiierung einer Selbstverpflichtungskampagne auch gezielte sektorspezifische Maßnahmen zur Marktaufnahme von recycelten Kunststoffen zu prüfen. Im neuen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft schlägt die Kommission verbindliche Anforderungen an den Rezyklatanteil von Verpackungen vor (Europäische Kommission 2020). Die Industrie ist der Selbstverpflichtungskampagne gefolgt. Die im Rahmen der Kunststoffstrategie durch die Europäische Kommission initiierte „Circular Plastics Alliance“ hat das Ziel, den EU-Markt für Kunststoffrezyklate bis 2025 auf 10 Million t/a zu erhöhen und wird inzwischen von 240 unterzeichnenden Organisationen unterstützt (Europäische Kommission o. J.). Die Industrievereinigung Kunststoffverpackungen hat sich das Ziel gesetzt, in Deutschland bis 2025 eine Million t/a Rezyklate oder nachwachsende Rohstoffe zur Produktion von Kunststoffverpackungen einzusetzen (IK o. J.). In einem gemeinsamen Diskussionspapier fordern AGVU (Arbeitsgemeinschaft Verpackung + Umwelt) und IK (Industrievereinigung Kunststoffverpackungen) die Politik zu einer Definition von Zielen und der Setzung geeigneter Rahmenbedingungen auf (AGVU und IK 2020).

Die ökologischen Vorteile der Substitution von Primärkunststoff durch Rezyklat wurden bereits im vorigen Kapitel genannt und gelten auch bei einem anteiligen Rezyklateinsatz.

6.3.3.2 Möglichkeiten des Einsatzes von Kunststoffrezyklaten in Bauproduktverpackungen

Im Vergleich zu Lebensmittelverpackungen bieten Bauproduktverpackungen als typische Non-Food-Verpackungen gute Voraussetzungen für den Einsatz von Rezyklaten. So schätzt die Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung in einer Studie im Auftrag des Handelsverbands Deutschland, dass bezogen auf die Verbrauchsmengen 73 % der überwiegend im Non-Food-Bereich eingesetzten Kunststoffverpackungen keine bis maximal moderate Hemmnisse für den Einsatz von Rezyklaten aufweisen (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung 2019). Die Studie betrachtet verschiedene Packmittel und unterscheidet neben Food- und Non-Food-Anwendungen auch zwischen überwiegend privatem und sonstigem Endverbrauch. Hinsichtlich der Rezyklatherkunft legt die Studie einen Fokus auf Post-Consumer-Rezyklate. Die Ergebnisse für den Rezyklateinsatz in Non-Food-Verpackungen sind in Tabelle 30 zusammenfassend dargestellt.

Als Packmittel mit keinen bzw. geringen Hemmnissen für den Rezyklateinsatz werden Pflanztöpfe für den privaten Endverbrauch sowie Kästen, Steigen, Paletten und Verpackungsbänder für den sonstigen Endverbrauch angesehen. Packmittel mit geringen Hemmnissen werden nicht gesondert ausgewiesen. Moderate Hemmnisse weisen Kanister und Eimer für alle Endverbraucher, PET- und sonstige Flaschen, Etiketten, Tragetaschen, Kleinbehälter und Verschlüsse für den privaten Endverbrauch und Fässer, IBCs, Transportfolien, Beutel, Schalen, Einschlüge und Big Bags für den sonstigen Endverbrauch auf. Große Hemmnisse bestehen bei Beuteln, Schalen, Einschlügen, Big Bags sowie EPS und anderen Schaumstoffen für den privaten Endverbrauch (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung 2019).

Tabelle 30: Eignung von überwiegend im Non-Food-Bereich eingesetzten Kunststoffverpackungen für den Rezyklateinsatz, differenziert nach überwiegender Anfallstelle. (Eigene Darstellung nach Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung, 2019)

Hemmnisse	Packmittelform	Überwiegende Anfallstelle	
		Privater Endverbrauch	Sonstiger Endverbrauch
Keine bis sehr geringe Hemmnisse	Kästen, Steigen, Paletten		X
	Verpackungsbänder		X
	Pflanztöpfe	X	
Geringe Hemmnisse	k.A.	k.A.	k.A.
Moderate Hemmnisse	Kanister, Eimer	X	X
	Fässer, IBCs		X
	PET-Flaschen	X	
	Transportfolien		X
	Etiketten	X	
	Tragetaschen	X	
	Sonstige Flaschen	X	
	Sonstige Kleinbehälter	X	
	Verschlüsse	X	
	Beutel, Schalen, Einschlüge, Big Bags		X
	Beutel, Schalen, Einschlüge, Big Bags	X	
Große Hemmnisse	Schaumstoff / EPS	X	

Mit Ausnahme von Schaumstoffen und überwiegend für den privaten Endverbrauch vorgesehenen flexiblen Verpackungen bestehen nur geringe bis moderate Hemmnisse für den Rezyklateinsatz in Non-Food-Verpackungen. Im Folgenden werden die geringen bis moderaten Hemmnisse analysiert und Vorschläge für deren Überwindung erarbeitet.

6.3.3.2.1 Hemmnisse für den Rezyklateinsatz in ausgewählten Packmitteln

In der oben zitierten Studie der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung werden fünf Kriterien für die Bewertung des Rezyklateinsatzes definiert: Die Verfügbarkeit der Rezyklate, die Fähigkeit, die nötigen Funktionen mit Rezyklaten zu erfüllen, die Rechtslage bezüglich der Anwendung, die Kosten im Vergleich zu Neumaterial sowie die ökologische Sinnhaftigkeit des Rezyklateinsatzes. Diese Kriterien werden in insgesamt 17 Unterkriterien weiter ausdifferenziert. Die Bewertungskriterien wurden für die vorliegende Studie übernommen und auf für den Baubereich besonders relevante Verpackungskategorien (Paletten, Kästen/Steigen, Eimer, Kanister und Flaschen, Folien) angewandt. In semi-strukturierten Expert*inneninterviews wurden die Hemmnisse für den Einsatz von Post-Consumer-Rezyklat anhand der genannten Kriterien je Verpackungskategorie abgefragt.

Bei Kunststoffpaletten ist laut Aussage eines Palettenherstellers der Rezyklateinsatz aufgrund der Kostenvorteile bereits weit verbreitet und es liegen keine technischen Hemmnisse für den Rezyklateinsatz vor. Die Verfügbarkeit von Rezyklaten sei ausreichend und die Rechtslage stehe dem Rezyklateinsatz nicht entgegen. Es wurde lediglich ein veränderter Geruch bemerkt, der auch auf darauf transportierte Kartonverpackungen übergehen könne. Dieses geringe Hemmnis kann allerdings für Bauprodukte als weniger relevant erachtet werden. Mit Hinblick auf die Kosten wurde aufgeführt, dass eventuell kleinere Anpassungen der eingesetzten Verarbeitungsmaschinen vorgenommen werden müssen, etwa der Einsatz anderer Schneckengeometrien. Hinsichtlich der Ökologie wurde genannt, dass gegebenenfalls mehr Materialeinsatz notwendig sei, um die gleiche Steifigkeit zu erreichen. Da sich dies jedoch nicht wesentlich auf das Gesamtgewicht der Palette niederschläge, kann hier ebenfalls nur von einem geringen Hemmnis ausgegangen werden. Kunststoffpaletten werden nach Kenntnisstand eines Experten aktuell nicht im Baubereich eingesetzt, dies sei jedoch grundsätzlich möglich (vgl. 6.3.1). Einem Rezyklateinsatz stehe unter dieser Voraussetzung nichts im Wege.

Für den Rezyklateinsatz in der Produktion von Eimern, sowie Kästen und Steigen gibt es nach Einschätzung eines Recyclers ebenfalls keine grundsätzlichen Barrieren. Die Verfügbarkeit geeigneter Rezyklate ist gegeben, rechtliche Hemmnisse bestehen nicht (mit Ausnahme der Verpackung gefährlicher Güter, siehe unten). Was die Verpackungsfunktion angeht, wurde eine Einschränkung der Gestaltbarkeit im Hinblick auf die Farbgebung konstatiert, andererseits könne der Rezyklateinsatz inzwischen bereits positiv für das Marketing hervorgehoben werden. Wie bei Paletten wird der veränderte Geruch im Bereich von Bauproduktverpackungen nicht als Hemmnis eingestuft. Eine ausreichende Widerstandsfähigkeit wird durch Beimischung geringer Mengen (etwa 10 %) Neumaterial erreicht. Mit Blick auf die Kosten wurde die mangelnde Wettbewerbsfähigkeit der Rezyklate im Vergleich zu Neumaterial als Hemmnis genannt. Diese hänge jedoch stark vom variablen Preisniveau der Primärrohstoffe ab. Als weiterer Kostenfaktor wurde die zum Teil notwendige Nachrüstung von Absauganlagen zur Verringerung der Geruchsbelästigung bei der Verarbeitung der Rezyklate genannt. Hinsichtlich der Ökologie führte der Experte auf, dass zwar die Materialstärken unverändert seien, jedoch die Dichte der Rezyklate durch den Einsatz von Füllstoffen geringfügig erhöht sein könne, was sich in einer sehr geringen Verschlechterung der Materialeffizienz äußert. Für den Fall, dass die Farbgebung eine entscheidende Rolle für die Vermarktung des Produkts spielt, seien zudem spezielle Maßnahmen, wie etwa die Verwendung von entsprechend gestalteten In-Mould-Etiketten, erforderlich, die den Materialverbrauch geringfügig erhöhen könnten.

Bei Kanistern und Flaschen gelten im Wesentlichen die gleichen Hemmnisse wie bei Eimern, Kästen und Steigen. Jedoch wurde als zusätzliches Hemmnis genannt, dass das für diese Verpackungen vorwiegend eingesetzte PE-HD nicht in großen Mengen als Post-Consumer-Rezyklat anfallt.

Im Experteninterview mit einem Folienhersteller wurden keine grundsätzlichen Hemmnisse für den Einsatz von Rezyklaten in Folienverpackungen für Bauprodukte gesehen. Jedoch wurden Hemmnisse hinsichtlich der Verfügbarkeit der Rezyklate für den Fall einer insgesamt stark gesteigerten Nachfrage nach Rezyklaten genannt. Als problematisch wurde insbesondere gesehen, dass Rezyklat hoher Qualität nur in begrenzten Mengen zur Verfügung stehe, während der Rückgriff auf schlechtere Qualitäten zu einer Erhöhung der Schichtdicken und damit des Materialeinsatzes führe. In Bezug auf die weiteren abgefragten Kriterien wurden keine Hemmnisse identifiziert, jedoch wurde darauf hingewiesen, dass es aktuell keinen überzeugenden Anreiz für Bauproduktehersteller gebe, auf rezyklierte Folien zurückzugreifen.

Für die Beurteilung, ob eine Verpackung für den Einsatz von Rezyklaten geeignet ist, muss auch das Packgut berücksichtigt werden. Die gilt insbesondere bei der Verpackung von gefährlichen Gütern.

6.3.3.2.2 Voraussetzungen für den Rezyklateinsatz in Verpackungen gefährlicher Güter

Unabhängig von der konkreten Verpackungsform gelten besondere Voraussetzungen für die Verwendung von Rezyklaten in Verpackungen gefährlicher Güter. Diese werden durch die ISO 16103 beschrieben (International Organisation for Standardisation 2005). Hierunter fallen einige der für die Baubranche relevanten Produkte und ihre Verpackungen wie etwa Lacke, Klebstoffe oder Reinigungsmittel. Die ISO 16103 wird durch verschiedene internationale Handelsabkommen umgesetzt und ist als europäische Norm anerkannt. Folgende Punkte werden in der Norm als Voraussetzung für die Verwendung von Rezyklaten sinngemäß genannt:

- ▶ Die verwendeten Rezyklate müssen aus Industrieverpackungen stammen.
- ▶ Die Rezyklate dürfen nicht aus Verpackungen stammen, die selbst aus Recyclingmaterial hergestellt worden sind.
- ▶ Die Verpackungen, aus denen die Rezyklate stammen, dürfen nicht älter als 10 Jahre sein und dürfen nicht für die Verpackung giftiger, stark oxidierender oder infektiöser Materialien verwendet worden sein.
- ▶ Die verwerteten Verpackungen müssen nach Kunststoffsorte sowie Herstellungsverfahren getrennt worden sein.
- ▶ Die Behälter müssen entleert worden und eine Homogenisierung der verwendeten Materialien muss erfolgt sein.
- ▶ Die Qualität sowie Homogenität der Chargen muss durch die Prüfung des Rezyklates bezüglich der Materialparameter Dichte, Schmelzflussindex und der Bruchdehnung sichergestellt und dokumentiert werden. Außerdem müssen an Produkten Fall- und Stapeldruck sowie für Flüssigkeiten Dichtheits- und hydraulische Innendruckprüfungen durchgeführt werden.
- ▶ Die Verträglichkeit mit dem Füllgut muss sichergestellt werden.

Die Norm zeigt damit auf, wie eine Qualitätssicherung für den Rezyklateinsatz in Verpackungen ausgestaltet werden kann. Für andere Verpackungen sind ähnliche, an den Sicherheitsanforderungen des Packguts ausgerichtete Prüfungen denkbar.

6.3.3.3 Beispiele für den Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen

Die Analyse der Hemmnisse hat verdeutlicht, dass der Rezyklateinsatz bei einem Großteil der für Bauprodukte relevanten Kunststoffverpackungen möglich ist. Ergänzend erfolgt eine Recherche konkreter Beispiele.

Für den Heimwerker- und Gartenbedarf sowie für Baustoffe wurden folgende Verpackungsbeispiele für Rezyklateinsatz gefunden:

- ▶ Deckfolie für palettierte Pflastersteine (RINN 2018)
- ▶ Folienbeutel für Werkzeuge und Eisenwaren (Bauhaus o. J.)
- ▶ Luftpolsterfolie als Packhilfsmittel für Klebstoffverpackungen (Uzin o. J.)
- ▶ Eimer für Dispersionsfarben (REWE Group 2018), Lacke (Interseroh o. J.), Abdichtmassen, Mörtel und Grundierungen (PCI 2020, 20) oder Tapetenkleister (Henkel 2020)
- ▶ Kanister für PU- und Dispersionsgrundierungen (Uzin o. J.)
- ▶ Kartuschen für Dichtungsmassen (Fischbach o. J.)
- ▶ Flaschen für Klebstoff (Henkel 2018), Reinigungsmittel (Dr. Schnell o. J.) und Flüssigdünger (Systalen 2018)
- ▶ Pflanztöpfe (Bauhaus o. J.) und Pflanzenpaletten (Klose 2019)
- ▶ Koffer für Elektrowerkzeuge (Experteninterview mit einem Recycler)

Um weitere mögliche Anwendungsgebiete zu identifizieren, wurde die Recherche auf andere Packgüter ausgeweitet, sofern ein Transfer auf Bauprodukte möglich erschien. Die Ergebnisse sind in Tabelle 31 dargestellt, wobei jeweils nur ein Beispiel je Packmittel und Material aufgenommen wurde. Sofern in den aufgeführten Quellen keine Angaben zum Rezyklatanteil oder -ursprung gemacht wurden, wurden die entsprechenden Anbieter kontaktiert, sofern bekannt, und deren Angaben ergänzt.

Tabelle 31: Beispiele für den Einsatz von Rezyklaten in Kunststoffverpackungen.

Packmittel	Material	Beschreibung	Rezyklatanteil	Rezyklat-Ursprung	Quellen
Schrumpfolien und -Hauben	PE-LD	Transparente PE-LD Folie aus mindestens 50% Post-Consumer Rezyklat. Foliendicke sowie Verarbeitungsparameter sind gleich wie bei aus Neuware hergestellten Folien.	mindestens 50 %	Post-Consumer	(Barbier Group o. J.)
Stretchfolie	PE-LD/LLD	Stretchfolie aus mindestens 25 % Post-Consumer-Rezyklat. Keine wesentlichen Leistungsverluste in der Performance. Foliendicke: 8 Mikrometer, sowohl als Handstretch- als auch Maschinenstretchfolie erhältlich.	25 %	Post-Consumer	(elipso und IK 2020; IK und Plastics Europe Deutschland e.V. 2020b)

Packmittel	Material	Beschreibung	Rezyklatanteil	Rezyklat-Ursprung	Quellen
Handstretchfolie	PE-LLD	Handstretchfolie aus 75 % Rezyklat, von dem wiederum mindestens 51 % Post-Consumer-Rezyklat stammt.	75 %	Post-Consumer / Pre-Consumer (gemischt)	(KunststoffWeb 2020c)
Folienbeutel	PE-LD	Diverse Beutel mit einem Recyclinganteil bis zu 100 %, in den Ausführungen Post-Consumer und Post-Industriell erhältlich.	bis zu 100 %	Post-Consumer / Pre-Consumer (je nach Ausführung)	(Strubl o. J.)
Tuben	PE-HD	Tubenkörper aus 96 % Post-Consumer-Rezyklat. Eingesetzt für kosmetische Produkte.	96 %	Post-Consumer	(Brunn 2019)
Tuben	PE-LD	Kunststofftuben aus 19 % Pre-Consumer-Rezyklat, das mit Hilfe von lösemittelbasiertem Recycling aus Mehrschichtfolien-Abfällen gewonnen wurde.	19 %	Pre-Consumer	(KunststoffWeb 2020a)
Big Bags	PP	Geschlossener Werkstoff-Kreislauf für Big-Bags von der Herstellung über Verwendung, Rücknahme bis zum Recycling und Einsatz des Rezyklats. Der Rezyklatanteil des Gewebes wird als „hoch“ angegeben.	„hoch“	Post-Consumer	(Plasticker 2019)
Big Bags	PET	Big Bags aus Post-Consumer-Rezyklat, das aus gebrauchten PET-Flaschen gewonnen wird. Nach Gebrauch können die Big Bags erneut dem Recyclingkreislauf zugeführt werden.	96 %	Post-Consumer	(elipso und IK 2020; IK und Plastics Europe Deutschland e.V. 2020a)
Eimer	PP	Eimer für Wandfarben, Lacke und Isolieranstriche aus nahezu 100 % recyceltem Kunststoff, überwiegend aus Post-Consumer-Abfällen.	nahezu 100 %	Post-Consumer (überwiegend)	(RECYCLING magazin 2011)
Kisten	PP	Euro Box aus recyceltem Pre-Consumer Polypropylen.	k.A.	Pre-Consumer	(SSI Schäfer o. J.)
Paletten	PE / PP (gemischt)	Einwegpaletten aus recyceltem PE und PP.	100 %	Post-Consumer	Angaben des Herstellers auf Nachfrage hin

Packmittel	Material	Beschreibung	Rezyklat-anteil	Rezyklat-Ursprung	Quellen
Paletten	PE-HD	Mehrwegpaletten aus recyceltem PE-HD für den langfristigen und häufigen Einsatz.	100 %	Post-Consumer	Angaben des Herstellers auf Nachfrage hin
IBCs und Plastiktonnen	PE-HD	Großpackmittel aus einer Mischung von Post-Consumer- und Pre-Consumer-Rezyklat aus der unternehmenseigenen Produktion.	35 % bis 95 % (je nach Modell)	Post-Consumer / Pre-Consumer (gemischt)	(Mauser Packaging Solutions 2019)
Kanister	PE-HD	Kanister verschiedener Größen für PU- und Dispersionsgrundierungen aus 100 % recyceltem PE-HD.	100 %	Post-Consumer	(Plasticker 2020)
Flaschen	PE-HD	Ein-Liter-Flasche für Reinigungsmittel aus recyceltem PE-HD. Der Verschluss besteht zu 100 % aus recyceltem PP.	100 %	Post-Consumer	(neue verpackung 2018)
Flaschen	PP	Klebstoffverpackung mit Auftragsdüse aus Post-Consumer Rezyklaten.	100 %	Post-Consumer	(Henkel 2018)
Flaschen	PET	Flaschen für Haushalts- und Kosmetikprodukte. Je nach Produkt stammen die Post-Consumer-Abfälle zu 20 bis 100 % aus dem Dualen System, der Rest stammt aus Einweg-Pfandflaschen.	100 %	Post-Consumer	(Frosch o. J.)
Kartuschen	PE-HD	Kartusche für plastische und dauerelastische Dichtungsmassen wie z. B. Silikon.	mind. 30 %	k.A.	(Fischbach o. J.)
Verschlüsse	PP	Verschlüsse für die Verpackung von Reinigungs- und Haushaltsprodukte.	50 %	Post-Consumer	(KunststoffWeb 2020b)
Schutzverpackungen	EPS	Aus recyceltem Polystyrolschaummaterial bestehende Schutzverpackung zum Schutz beim Transport.	100 %	Post-Consumer	(elipso und IK 2020)
Luftpolsterfolie	PE	Luftpolsterfolie aus mindestens 50 % PE-Rezyklat aus unternehmenseigenen Produktionsabfällen, sowie externen Quellen.	mind. 50 %	Pre-Consumer	(packaging journal 2019)

Packmittel	Material	Beschreibung	Rezyklatanteil	Rezyklat-Ursprung	Quellen
Umreifungsbänder	PET	Umreifungsband aus Flaschenmahlgut.	100 %	Post-Consumer	(Plasticker 2008)
Umreifungsbänder	PP	Umreifungsband aus 100 % recyceltem Polypropylen.	100 %	k.A.	(Bindemann Verpackung o. J.)
Pflanztöpfe	PP	Pflanztopf aus Post-Consumer-Rezyklat, blauem Farb-Additiv und Füllstoffen.	100 %	Post-Consumer	(Der Grüne Punkt 2020; Pöppelmann o. J.)
Pflanzpaletten	PP	Mehrweg-Pflanzpalette aus Post-Consumer-Rezyklat.	100 %	Post-Consumer	(Klose 2019)

Die Übersicht verdeutlicht, dass ein Einsatz von Rezyklaten in allen für Bauprodukte relevanten Verpackungsformen möglich ist. Neben den bereits genannten Beispielen erscheint ein Rezyklateinsatz etwa in folgenden Kunststoffverpackungen für Bauprodukte denkbar:

- ▶ Dehnlfolien, Schrumpffolien und -Hauben für palettierte Baustoffe
- ▶ Folienbeutel für Installationen, Heimwerker- und Gartenartikel, sowie Kleinteile
- ▶ Big Bags für schüttgutförmige Baustoffe
- ▶ Kunststoffpaletten für Baustoffe
- ▶ Kisten für kleinteilige Bauprodukte
- ▶ Flaschen Kanister, IBCs und Fässer für flüssige Bauprodukte
- ▶ Kartuschen und Tuben für pastöse Massen
- ▶ Luftpolsterfolie, Umreifungsbänder und EPS-Dämmmaterial als Packhilfsmittel

Zusammenfassend lässt sich beobachten, dass Rezyklate bereits vereinzelt in Kunststoffverpackungen für Bauprodukte eingesetzt werden, wobei noch ein großes Steigerungspotenzial besteht. Durch die Erschließung weiterer Anwendungsgebiete, eine breitere branchenweite Anwendung und eine Erhöhung der Rezyklatanteile kann insgesamt eine Erhöhung der eingesetzten Rezyklatmenge erreicht werden. Voraussetzung ist allerdings die Verfügbarkeit entsprechender Rezyklatqualitäten in ausreichender Menge.

6.3.3.4 Abschätzung des Mengenpotenzials für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten in Bauproduktverpackungen

Die Quantifizierung des Rezyklateinsatzpotenzials in Bauproduktverpackungen erfolgt auf der Basis der Produktionsmenge der für Bauprodukte verwendeten Kunststoffverpackungen in Deutschland. Diese wurde in Kapitel 2.4.2 mit 370 kt/a abgeschätzt, verteilt auf vier Packmittelobersegmente. Von dieser Produktionsmenge ist jedoch nur ein Teil für den Einsatz von Rezyklaten geeignet, der je nach Packmittel stark variiert. Tabelle 32 stellt für die verschiedenen Packmittelobersegmente neben der für Bauprodukte abgeschätzten

Produktionsmenge und dem derzeitigen Rezyklatanteil dar, welcher Rezyklatanteil zusätzlich bei moderaten Einschränkungen realisiert werden könnte. Die prozentualen Angaben wurden der Studie „Potenzial zur Verwendung von Recycling-Kunststoffen in der Produktion von Kunststoffverpackungen in Deutschland“ (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung 2020) entnommen. Es wird hier vereinfachend angenommen, dass die relativen Rezyklateinsatzpotenziale für Bauproduktverpackungen den dort angegebenen Durchschnittswerten der jeweiligen Packmittel-Obersegmente entsprechen.

Tabelle 32: Produktionsmengen, aktueller und potenzieller Rezyklateinsatz bei moderaten Einschränkungen

Die Abschätzung der Produktionsmengen wurden aus Kapitel 2.4.2 Darstellung der Datenlage übernommen. Die prozentualen Angaben wurden (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung 2020) entnommen.

Packmittel-Obersegment	Produktionsmenge von Bauproduktverpackungen in kt/a	Derzeitiger Rezyklateinsatz		Zusätzlicher Rezyklateinsatz bei moderaten Einschränkungen	
		Anteil an der Produktionsmenge	Absolute Menge in kt/a (Bauproduktverpackungen)	Anteil an der Produktionsmenge	Absolute Menge in kt/a (Bauproduktverpackungen)
Flaschen und Verschlüsse	40	16 %	7	21 %	9
Folien und Kleinbehälter	180	8 %	15	1 %	2
Großverpackungen	90	17 %	15	36 %	31
Rest	50	0 %	0	9 %	5
Gesamt	370*	10 %	37	12 %	44*

Die Produktionsmenge geht auf eine Stelle genauer als hier wiedergegeben in die Berechnung ein, um eine mögliche Fehlerfortpflanzung gering zu halten.

*Abweichende Summen ergeben sich aus Rundungsfehlern.

Aus der in Tabelle 32 wiedergegebenen Berechnung ergibt sich eine Abschätzung des derzeitigen Rezyklateinsatzes in Kunststoffverpackungen für Bauprodukte von rund 40 kt/a, der um weitere 40 kt/a auf 80 kt/a gesteigert werden könnte, wenn moderate Einschränkungen in Kauf genommen werden. Auch wenn diese Abschätzung aufgrund der mangelnden Datenlage auf zahlreichen Annahmen basiert, kann sie als richtungsweisend für die Steigerung des Rezyklateinsatzes in Bauproduktverpackungen betrachtet werden.

6.4 Rezyklatquote für Folienprodukte

Wie in Kapitel 5.1 und 6.1 schon aufgezeigt, besteht sowohl auf EU- als auch auf nationaler Ebene ein breiter Konsens, dass die Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft ein Ziel für die nahe Zukunft darstellt, was eine Steigerung des hochwertigen Rezyklateinsatzes impliziert.

Eine Möglichkeit zur Erhöhung des Rezyklateinsatzes ist eine vorgeschriebene Rezyklatquote (Ressourcenkommission 2019). Die Rezyklatquote gibt den Anteil von Rezyklat an der gesamten

Masse des zur Produktion verwendeten Materials an. Eine Rezyklatquote von 25 % bedeutet also, dass ein Viertel des in der Produktion verwendeten Materials Rezyklat ist. Sie kann sowohl für ein einzelnes Produkt als auch für ganze Produktgruppen oder die gesamte nationale Produktion angegeben werden.

Die Rezyklatquote kann als Indikator dafür aufgefasst werden, inwiefern die dritte Stufe der Abfallhierarchie, das Recycling, umgesetzt wird. Im Gegensatz zur Recyclingquote misst die Rezyklatquote an dem Punkt, an dem der Kreislauf wieder geschlossen wird, vgl. Abbildung 24. Wird eine Mindest-Rezyklatquote politisch vorgeschrieben, kann damit die Umsetzung des Recyclings im Zuge einer Kreislaufwirtschaft erwirkt werden. Zwei sich daraus ergebende positive Effekte sind zu erwarten. Zum einen müssen die entsprechenden Daten von den produzierenden Firmen erhoben werden. Dies erlaubt ein deutlich verbessertes Monitoring des Rezyklateinsatzes. Zum anderen entsteht durch die Rezyklatquote eine stabile Rezyklatnachfrage, was eine Kaskade positiver Effekte anstoßen kann. Die induzierte Rezyklatnachfrage ermöglicht Planungssicherheit auf der Entsorgerseite und macht damit Investitionen in hochwertige, effektive Recyclingtechnologien möglich. (Umweltbundesamt 2016). Das wiederum führt zu hochwertigeren und im Vergleich zu Neuware konkurrenzfähigeren Rezyklaten.

Für die Rezyklatquote sind verschiedene Ausgestaltungsmöglichkeiten denkbar. Für Produktkategorien kann ein Mindest-Rezyklatgehalt festgelegt werden. Hersteller dieser Produkte sind dann verantwortlich, diesen minimalen Rezyklatgehalt zu erreichen. Eine mittlere Rezyklatquote als Gesamtquote für die verschiedenen Produkte des Herstellers ist möglich, um Produkte mit hohen Anforderungen in Spezialanwendungen zu berücksichtigen. Ein anderer Ansatz ist das Verhältnis zwischen Rezyklat und Neuware für die gesamte Produktion eines Materialtyps festzulegen. Umgesetzt wird diese Quote über einen Zertifikatehandel – Hersteller von Rezyklaten erhalten Zertifikate für verkauftes Rezyklat, Hersteller von Neukunststoffen müssen diese Zertifikate erwerben, bevor sie ihre Kunststoffe verkaufen können. Für den Fall des Zertifikatehandels ist zu erwarten, dass die Substitution durch Rezyklate so kosteneffizient wie möglich abläuft. Für den Fall der herstelleraufbauenden Rezyklatquote würden alle Hersteller das Know-How aufbauen, Rezyklate einzusetzen. Kritisch zu bemerken ist, dass eine Rezyklatquote sowohl als Instrument als auch als Maßstab keinen Aufschluss über die Entwicklung der absolut eingesetzten Mengen gibt. Bei gleichbleibender Relation würde ein Mengenwachstum bspw. nicht abgebildet, obwohl dies ggf. auch nicht wünschenswert ist.

Wie auch schon für die Produktkennzeichnungen in Kapitel 5 angemerkt, sollte in der Diskussion berücksichtigt werden, ob Post-Industrial-Abfallströme Teil des von der Quote erfassten Rezyklates werden. Diese Ströme werden auch heute schon wirtschaftlich recycelt. Falls diese Abfallströme mit einberechnet werden, muss die Quote entsprechend höher ausfallen. In diesem Text genannte Quoten sind daher exklusive der Post-Industrial-Mengen zu verstehen.

In Deutschland wird die Einführung einer Rezyklatquote für bestimmte Bereiche erwogen und ist in den "Referentenentwurf für ein Gesetz zur Umsetzung von Vorgaben der Einwegkunststoffrichtlinie und der Abfallrahmenrichtlinie im Verpackungsgesetz und in anderen Gesetzen" mit eingeflossen. Es wird eine Rezyklatquote von zunächst 25 % angestrebt, die mit der Zeit steigen soll. Im dort betroffenen Bereich der PET-Flaschen bietet sich eine Rezyklatquote an, da durch die Pfandpflicht ein hochwertiger Materialstrom bereits zur Verfügung steht, der gut recycelt werden kann.

Auch Folienverpackungen für Bauprodukte bieten sich für das Recycling an und auch hier ist von positiven Effekten durch eine Rezyklatquote auszugehen. Folien machen einen wesentlichen Teil des für die Verpackung von Bauprodukten verwendeten Kunststoffes aus. Die hauptsächlich

verwendeten Kunststoffsorten sind dabei PE-LD sowie PE-LLD. Beide lassen sich gut recyceln und werden auch für systempflichtige Verpackungen verwendet. Damit ist für diese Anwendung von einem hohen Angebot an Rezyklatware auszugehen, was wie in Kapitel 5 dargestellt, eine Hürde für den breitflächigen Rezyklateinsatz ist. Es wird daher empfohlen, die Einführung einer Rezyklatquote in diesem Bereich eingehend zu prüfen und auf europäischer Ebene zu unterstützen (siehe hierzu auch Kapitel 7).

Zur Beurteilung der technischen Realisierbarkeit des Rezyklateinsatzes in Verpackungsfolien für Bauprodukte wird im Folgenden der Herstellungsprozess von Folien mit den spezifischen Herausforderungen für den Einsatz von Rezyklat dargestellt. Dann werden zwei Best-Practice Beispiele vorgestellt, die die Machbarkeit des Einsatzes hoher Anteile von Post-Consumer-Rezyklat in diesen Produkten demonstrieren.

Man unterscheidet für die Folienherstellung zwischen Blas- und Castfolien, wobei Blasfolien einen größeren Anteil im Verpackungssektor aufweisen. Für die Herstellung von Blasfolien wird Kunststoffschmelze von einem Extruder durch eine Ringdüse gedrückt und gleichzeitig mit Druckluft von innen aufgeblasen. Die so entstandene Folie wird durch Luft gekühlt und dann aufgewickelt. Für die Herstellung von Schrumpffolie wird die Folie nochmals erwärmt, verstreckt und dann abgekühlt. Herausforderungen für den Prozess beim Einsatz von Rezyklaten sind hier vor allem partikuläre Verunreinigungen sowie Schwankungen des Schmelzflussindex. Vorhandene Produktionslinien können aber ohne größere Investitionen auf die Verarbeitung von Rezyklat umgestellt werden.

Für die Herstellung von Castfolien wird die Kunststoffschmelze von einem Extruder durch eine breite Schlitzdüse gedrückt und auf eine gekühlte Walze gegossen. Auch hier bilden Verunreinigungen und Schmelzflussindex prozessspezifische Herausforderungen für den Rezyklateinsatz. Generell sind die Anforderungen aufgrund der größeren Folienstärke etwas geringer. Ein Rezyklateinsatz ist folglich gut möglich.

Zur Erreichung des Rezyklatanteils können entweder Mischungen von Rezyklat und Neuware verarbeitet werden, oder die Folien werden durch Coextrusion als Multilayerfolien hergestellt, in denen nur ein Teil der Schichten Rezyklat enthält. Für die Herstellung von Castfolien bietet sich der erste Ansatz an, da die Düsentechnik für Multilayerfolien hier aufwendiger zu realisieren ist. Für die Herstellung von Blasfolien sind entsprechende Anlagen weit verbreitet.

Seitens des Herstellungsprozess ergeben sich weitere Herausforderungen durch die Anforderungen des Produktes. Das sind zum einen funktionelle Anforderungen wie Reißfestigkeit oder Bruchdehnung, zum anderen ästhetische Anforderungen wie Transparenz, Bedruckbarkeit oder Geruch.

Dass trotzdem auch hohe Rezyklatanteile in Folien für Bauproduktverpackungen möglich sind, zeigen die hier vorgestellten Best-Practice Beispiele.

PE-Folie, Stretch-Haube - Trioloplast Sifab

Das Unternehmen Trioplast bietet unter der Dachmarke Trioloplast verschiedene Folien mit hohem Rezyklatanteil an. Neben der hier vorgestellten Stretch-Haube befinden sich auch Abfallsäcke in verschiedenen Größen, sowie Silage- und Gartenbau-Folie im Programm des Herstellers.

- ▶ Herstellung: Extrusion, Folienblasen
- ▶ Rezyklatgehalt: >50 % PCR
- ▶ Sonstige Merkmale: Nach Herstellerangaben eine der dünnsten Folien auf dem Markt, schwarz oder weiß, bedruckbar, Antirutschfunktionalität, recycelbar

Quellen: (Trioplast 2021; Trioplast 2019)

PE-Folie, Schrumpffolie - Barbier Recyplast 50

Die 2016 eingeführte Marke Recyplast 20 mit 20 % PCR wurde von Barbier zu Recyplast 50 aufgewertet. Mit der neuen Marke werden jetzt Schrumpffolien angeboten, die zur Hälfte aus PE-Rezyklat bestehen.

- ▶ Herstellung: Extrusion, Folienblasen
- ▶ Rezyklatgehalt: 50 % PCR
- ▶ Sonstige Merkmale: transparent, Folienstärke und Verarbeitungsparameter entsprechen Neuware

Quellen: (Barbier Group o. J.; Barbier Group o. J.; Barbier Group o. J.)

Im Agrarbereich, in dem Folien einen großen Anteil an der Kunststoffproduktion haben, wurde für 2019 ein Rezyklateinsatz von 36.5 % PC- und PI-Rezyklat erreicht. Der Verband der Europäischen Kunststoffrecycler, „Plastic Recyclers Europe“, geht von mehr als einer Verdopplung des Anteils der aus Rezyklat hergestellten PE-Folienprodukte in der nächsten Dekade aus. Prinzipiell ist Folienrecycling also technisch machbar. Eine Rezyklatquote von 30% scheint gut möglich und sollte daher im Falle der Einführung einer Quote als Ziel verfolgt werden.

Wie in Kapitel 5 schon aufgezeigt sind für den Rezyklateinsatz Investitionen notwendig, da zusätzliche Lagerplätze und Qualitätskontrollen vorgehalten bzw. -genommen werden müssen. Durch die Einführung einer Rezyklatquote pro Hersteller bedeutet dies keinen Wettbewerbsnachteil, da sie für alle Verpackungsmittelhersteller gilt, die diesen Markt bedienen wollen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine Rezyklatquote für Folien in Bauproduktverpackungen ökologisch sinnvoll und technisch machbar ist. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Optionen zur Umsetzung sollten weiter untersucht werden.

6.5 Empfehlungen und Maßnahmen

Die vorangegangene Untersuchung hat gezeigt, dass sowohl für die Abfallvermeidung als auch für das Kunststoffrecycling im Verpackungsbereich Ansätze in der Bauindustrie bestehen und gesteigert werden können. Zur weiteren Stärkung der Kreislaufwirtschaft dienen folgende Empfehlungen und Maßnahmen:

- ▶ Optimierung des Managements von Mehrwegbehältern und Transportverpackungen. Insbesondere für Paletten aus Kunststoff und IBCs konnten sinnvolle Anwendungsfälle identifiziert werden, wobei Kunststoffpaletten bereits vollständig aus Rezyklat gefertigt werden können. Diese bedürfen aber eines geeigneten Behältermanagementsystems, welches unter ökonomischen Gesichtspunkten zu führen ist. Auf Basis dieser Untersuchung scheinen Pooling-Systeme hierfür geeignet. Es ist zudem zu prüfen, ob die Verteuerung von Einwegverpackungen, z. B. durch eine Abgabe, die Einführung von Mehrweglösungen begünstigen kann.
- ▶ Bei Umverpackungen ist jeweils zu prüfen, inwiefern diese tatsächlich benötigt werden. Die Untersuchung hat gezeigt, dass auch der Handel mit unverpackter Ware in vielen Fällen gut möglich ist. Derartige Lösungen sind zu bevorzugen.
- ▶ Auch bei Verkaufsverpackungen sollte auf Mehrweglösungen gesetzt werden. So kann den Kund*innen nahegelegt werden, eigene Behälter, Taschen etc. zum Transport vorzuhalten.
- ▶ Entscheidungen für oder gegen Mehrweglösungen sind sowohl auf der Basis ökologischer als auch ökonomischer Gesichtspunkte zu optimieren. Hier braucht es ggf. gerade für die ökologische Dimension Entscheidungsgrundlagen bspw. in der Form repräsentativer, öffentlich verfügbarer Lebenszyklusanalysen.
- ▶ Eine konsequente Getrenntsammlung von Verpackungen im B-to-B Geschäft und ein gewissenhaftes Zuführen zum werkstofflichen Recycling ist eine *conditio sine qua non* für die Schließung von Kreisläufen innerhalb des Bereichs von Kunststoffverpackungen für Bauprodukte. Ein deutliches Hindernis, welches sich auf dem Weg hin zu mehr Recycling gezeigt hat, ist die Vermischung von Verpackungen mit anderen Bau- und Abbruchabfällen am Anfallort, insbesondere auf Baustellen. Während dies durch die Gewerbeabfallverordnung verhindert werden sollte, sorgen die dort getroffenen Zugeständnisse hinsichtlich der Zumutbarkeit nach Einschätzung der Sachlage für eine häufige Umgehung der getroffenen Regelungen. Die Begründungen von Ausnahmen in der Gewerbeabfallverordnung sollten daher überprüft werden. Insbesondere die Frage der wirtschaftlichen Zumutbarkeit ist hier zu nennen, da Entsorgungskosten vielfach bauseitig an den Bauherrn weitergegeben werden. Somit könnten die genannten Einschränkungen auf die technische Durchführbarkeit reduziert werden.
- ▶ Die vorausgehende Hypothese, dass Verpackungen für Bauprodukte ein hohes Potenzial für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten aufweisen, wird auf Basis der erzielten Erkenntnisse bestätigt. Dies ist allerdings an verschiedene Voraussetzungen geknüpft. Diese betreffen u.a. die Verpackungseigenschaften im Hinblick auf ihre Recyclingfähigkeit und zum anderen die Einführung der marktlichen oder regulatorischen Voraussetzungen.
 - Hinsichtlich der Verpackungsgestaltung sollte eine konsequente Gestaltung nach dem Mindeststandard zur Bemessung der Recyclingfähigkeit der Zentralen Stelle Verpackungsregister erfolgen. Der Mindeststandard ist zwar an (duale) Systeme adressiert, enthält aber die auch durch Hersteller nutzbaren *technischen* bzw. *gestalterischen* (Design-for-Recycling) Voraussetzungen für eine Steigerung hochwertigen Recyclings. Auch rezyklierte Verpackungen sollen die Maßgaben der Recyclingfähigkeit erfüllen.
 - Kunststoffrezyklate unterliegen dem Preiswettbewerb mit Primärmaterial. Insbesondere in Zeiten, in denen Primärmaterial besonders günstig zur Verfügung steht, erwächst damit ein Nachteil für Rezyklate, die mit höherem Aufwand (Reinigung, Sortierung,

Behandlung usw.) auf den Markt gebracht werden müssen und auch im Verarbeitungsprozess höhere Kosten erzeugen. Eine Verbesserung der Recyclingfähigkeit im Sinne von „Design-for-Recycling“ kann hier schon kostenreduzierend wirken. Weitere Möglichkeiten zur Erzielung eines höheren Rezyklateinsatzes sind auf regulatorischer Seite die Einführung von Mindesteinsatzquoten für Rezyklate und eine Verteuerung des Primärmaterials bspw. durch Abgaben auf dieses. Beide Ansätze sind jedoch anspruchsvoll und bedürfen einer intensiven vorbereitenden Analyse, die an dieser Stelle nicht vorgenommen werden kann, auch sollten sie zur Vermeidung von Marktverzerrungen, und um der Komplexität der Lieferketten gerecht zu werden, möglichst auf europäischer Ebene verfolgt werden.

- Um sicherzustellen, dass Rezyklate auch bei einem gesteigerten Einsatz in ausreichender Qualität und Menge zur Verfügung stehen, sollte geprüft werden, ob entsprechende Recyclinginfrastrukturen zur Verfügung stehen oder zeitnah errichtet werden können. Bei Bedarf kann eine Förderung des Infrastrukturaufbaus sinnvoll sein.
 - Begrüßenswert sind in diesem Zusammenhang Selbstverpflichtungen der Industrie, bspw. das Ziel der IK, den Einsatz von Rezyklaten (oder nachwachsenden Rohstoffen) in Verpackungen von 0,4 Mio. t/a auf 1 Mio. t/a zu erhöhen (IK 2018). Bei diesen Selbstverpflichtungen handelt es sich um Ziele, welche dazu geeignet sind, die Umsetzung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft deutlich zu steigern.
- Das System benötigt eine deutliche Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen für Politik und Unternehmen. Voraussetzung hierfür ist eine Verbesserung der Datengrundlage. Datenbereitstellung zum Inverkehrbringen, zur Nachverfolgbarkeit und zum Verbleib von Verpackungen können Such- und Transaktionskosten senken, Markttransparenz erhöhen und auch behördliche Steuerung effektiver gestalten.
- Aufgrund der allgemein positiven Sicht auf die Verwendung von Rezyklaten auf Seiten der Endverbraucher*innen kann der Rezyklatanteil in Verpackungen nach DIN 6120 auf Produkten werbewirksam und dennoch sachlich korrekt gekennzeichnet werden. Dies kann als Entscheidungshilfe bei Käufen einen zusätzlichen Anreiz für den Rezyklateinsatz darstellen.

7 Empfehlungen

Aus den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel ergeben sich die folgenden Empfehlungen an verschiedene Akteure wie Industrie, Politik und Forschung.

7.1 Technische Dokumentation / Produktkennzeichnung

Hinweise zum Rezyklateinsatz in Bauprodukten und zu deren Recyclingfähigkeit sind ein wichtiges Kriterium für deren nachhaltige Nutzung. Die eindeutige Ausweisung von Rezyklateinsatz und Recyclingfähigkeit kann daher auch als Voraussetzung zur Förderung sowie Garantie einer nachhaltigen Beschaffung für Kunststoffe im Baubereich gesehen werden. Folgende Aspekte sind hierfür als sinnvoll zu erachten:

- ▶ Einführung einer Verpflichtung der Hersteller, Angaben zur Recyclingfähigkeit ihrer Produkte und zum Einsatz von Rezyklat in ihren Produkten zu machen:
 - Angabe des Rezyklatanteils als Massen-Anteil [%] im produzierten Bauteil. Hierbei sollten nach Normvorgabe DIN EN 15343 nur Produktions- und Gebrauchsabfälle in die Berechnung einfließen. Material, das bei demselben Fertigungsprozess zurückgewonnen wurde, bei dem es angefallen ist, darf dem Rezyklatanteil nicht zugerechnet werden.
 - Angaben zur Herkunft des Rezyklats sollen bereitgestellt werden: Handelt es sich beispielsweise um Produktionsabfälle oder gewerbliche Abfälle?
 - Möglichkeiten der Kreislaufführung sollen aufgezeigt werden. So könnten etwa Hinweise auf bestehende Rücknahmesysteme für ausgediente Bauprodukte gegeben werden.
 - Zum Abbilden der Recyclingfähigkeit sind Angaben zur stofflichen Zusammensetzung des Produktes, zum Degradierungsgrad der Polymerketten, zur Reinheit der Materialien, zu Schadstoffen sowie zur Trennbarkeit und Verwertung empfehlenswert. Die Ermittlung der Recyclingfähigkeit sollte auf Basis eines Design-for-Recycling-Tools, unter Nennung dessen exakter Bezeichnung, erfolgen. Zudem ist der Hinweis auf eine zertifizierte Recyclingfähigkeit mittels anerkannter Labels erstrebenswert. Auch spezifische Angaben zur Recyclingfähigkeit auf Basis eigener Versuche oder Erfahrung stellen eine praktikable Möglichkeit dar.
- ▶ Es wird empfohlen, Rezyklatanteile und Recyclingfähigkeit von Bauprodukten aus Kunststoff in *Leistungserklärungen* nach Anhang III der europäischen Bauproduktenverordnung, *Technischen Datenblättern* und *Umweltproduktdeklarationen* zu kennzeichnen. Damit diese Informationen möglichst gut wahrgenommen werden, sollte jeweils ein eigener Zusatzabschnitt "Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen" (siehe Tabelle 24) in die Dokumente eingefügt werden.
- ▶ Weitere Konkretisierungen hinsichtlich einer Umsetzung der Aspekte Dauerhaftigkeit, Recyclingfähigkeit und Rezyklateinsatz in der BauPVO sowie in Normen sollten vorgenommen werden.

7.2 Rezyklatquote für Folien für Bauproduktverpackungen

Eine Rezyklatquote für Folienverpackungen für Bauprodukte von 30 % wird empfohlen. Zum einen wird so die konsequente Umsetzung des Recyclings in einer Kreislaufwirtschaft gefördert. Zum anderen ist zu erwarten, dass hiermit weitere Transformationsprozesse im System angestoßen werden. Investitionen in hochwertige Recyclinginfrastruktur sind durch eine sichere Nachfrage besser planbar. Firmen werden ertüchtigt, Rezyklate einzusetzen und können diese Fähigkeiten auch in anderen Bereichen (wie z. B. Agrarfolien) anwenden. Die Datenlage zum Rezyklateinsatz verbessert sich. Die technische Machbarkeit einer solchen Rezyklatquote wurde an den Beispielen in 6.4 gezeigt. Allerdings bedarf eine derartige Quote auch der Berücksichtigung einiger Parameter. So muss Rezyklat der gewünschten Qualität in ausreichender Menge verfügbar sein bzw. ein Umgang mit möglichen Lieferengpässen für Rezyklat definiert werden. Zudem muss auch in importierten Produkten der tatsächliche Rezyklatanteil überprüfbar sein. Gleichsam sollte ein solcher Ansatz auf europäischer Ebene verfolgt werden, bspw. um Verlagerungen bzw. Marktverzerrungen zu vermeiden. Auch erscheint dies auf Basis der EU Abfallrahmenrichtlinie geboten.

7.3 Anwendung des Design-for-Recycling

Es besteht ein Bedarf an größeren Mengen höherwertigem Rezyklats, gleichzeitig wird derzeit nicht der komplette Abfallstrom recycelt. Der Anteil an recycelten Produkten muss also erhöht werden. Ein wichtiger Ansatzpunkt hierfür ist die konsequente Anwendung des Design-for-Recyclings. Das bedeutet in diesem Kontext u.a.:

- ▶ Verwendung von Monomaterialien oder gute Trennbarkeit der verschiedenen genutzten Materialfraktionen. Als positive Beispiele sind hier Bodenbeläge mit leicht trennbarer Rückenschicht oder Monomaterial-Folien aus dem Verpackungsbereich zu nennen. Negative Beispiele sind nicht recyclingfähige Mehrschichtbodenbeläge aus verschiedenen Kunststoffen oder additivierte Polyolefine mit einer Dichte von mehr als 0.995 g/cm³.
- ▶ Der Einsatz von Schadstoffen muss minimiert werden. Das hierzu benötigte Wissen zu Schadstoffen und möglichen Alternativen muss frei verfügbar sein und leicht zugänglich gemacht werden.
- ▶ Bauproduktverpackungen können sich an den Mindeststandards zur Bemessung der Recyclingfähigkeit der Zentralen Stelle Verpackungsregister orientieren. Hier wird das Vorhandensein von Sortier- und Verwertungsinfrastruktur für ein hochwertiges werkstoffliches Recycling eingefordert. Ebenso werden Sortierbarkeit der Verpackung, Trennbarkeit der Komponenten und Vermeidung von Unverträglichkeiten der Komponenten als Anforderungen genannt.
- ▶ Beachtung einer guten Rückbaubarkeit – viele der verbauten Kunststoffprodukte werden auf einen kostengünstigen und schnellen Einbau optimiert, die Rückbaubarkeit spielt – wenn überhaupt – nur eine untergeordnete Rolle. Ein Beispiel für gute Rückbaubarkeit sind Textile Bodenbeläge, die nicht verklebt werden müssen, schlecht rückbaubar sind dagegen verklebte Dämmstoffe. Der Aspekt der Rückbaubarkeit muss schon bei der Planung berücksichtigt werden. Das hierfür notwendige Wissen sollte Eingang in die Ausbildung der beteiligten Gewerke bzw. der Architektur- und Ingenieurbüros finden.

Das Design-for-Recyclingsollte nicht einer möglichen Abfallvermeidung, Wiederverwendung oder anderen höherwertigen Schritten entgegenstehen. Eine verstärkte Berücksichtigung dieser Prinzipien muss letztlich von der produzierenden Industrie umgesetzt werden. Von regulatorischer Seite ist das Design-for-Recycling für Bauprodukte nur schwer einzufordern. Andererseits begünstigen alle regulatorischen Ansätze, die zu einem höheren Rezyklateinsatz führen, ein verstärktes Design-for Recycling.

7.4 Erzeugung reiner Abfallströme

Die Abfallströme aus der Baubranche müssen besser verwertbar werden. Dazu bieten sich verschiedene Maßnahmen an:

- ▶ Die getrennte Erfassung von Kunststoffabfällen birgt noch großes Verbesserungspotential. Die notwendigen gesetzlichen Regeln hierfür existieren. Die GewAbfV beinhaltet eine Getrennthaltungspflicht für verschiedene Fraktionen. Allerdings sind hier Ausnahmen möglich, wenn die getrennte Sammlung wirtschaftlich oder technisch nicht möglich ist. Sind reinere Kunststoff-Abfallströme aus Bau- und Abbruchabfällen als Grundlage für eine bessere Rezyklatnutzung gewünscht, müssen die Ausnahmen von der Getrennthaltungspflicht überdacht werden. Eine Reduktion der Ausnahmetatbestände oder eine genauere Prüfung ihres tatsächlichen Vorliegens bieten sich an. Die Behandlung in einer Vorbehandlungsanlage ist zwar von der GewAbfV als Ersatzlösung vorgesehen, für ein hochwertiges Recycling jedoch nicht zielführend, da die hier anfallenden Kunststoffströme nicht hochwertig werkstofflich recycelt werden können. Dies gilt insbesondere auch für Kunststoffverpackungen aus Bauprodukten.
- ▶ Neben Investitionen in technische Sortier- und Aufbereitungsanlagen ist es erstrebenswert, bereits im vorherigen Schritt die Getrenntsammlung von Abfällen zu forcieren und die entsprechenden Akteure zu sensibilisieren.
- ▶ Die Zuordnung von Dämmstoffen aus Kunststoff zum Abfallschlüssel 17 06 04 gemeinsam mit mineralischen Dämmstoffen sollte geändert werden. Zielführend für ein hochwertiges Recycling wäre hier die Einführung eines separaten Abfallschlüssels für Dämmstoffe aus Kunststoff oder die Aufnahme in den Abfallschlüssel für Kunststoffe.
- ▶ Die technische Dokumentation der Produkte sollte verpflichtende Angaben zu Rückgabe und Recyclingmöglichkeiten enthalten. Der notwendige Zusatzaufwand auf Seiten der Hersteller hierfür ist gering.
- ▶ Die Grenzen des Gehaltes an Kunststoffen in Bauschutt sollten überprüft werden. Durch die geringe Dichte von Kunststoffen im Vergleich zu Mineralik und die massenbezogene Bilanzierung können hier beträchtliche Mengen an Kunststoffen abfließen.
- ▶ Für die einzelnen Produktgruppen sollte geprüft werden, inwiefern ein Rücknahmesystem mit anschließendem werkstofflichem Recycling vorteilhaft ist und zum hochwertigen Recycling beitragen kann.

- Verpackungen sind getrennt von Produktabfällen zu erfassen. Es gilt einerseits das Verpackungsgesetz (unabhängig von der Systembeteiligungspflicht) und andererseits die Gewerbeabfallverordnung.

7.5 Regulierung von Additiven

Die Regulierung von Additiven bildet einen wichtigen Punkt für das werkstoffliche Recycling. Sie weist zwei grundlegende gegensätzliche Aspekte auf. Zum einen ist das frühe Verbot bedenklicher Stoffe wichtig, um Altlasten im System zu vermeiden. Diese machen ein späteres aufwendiges und teures Ausschleusen notwendig oder verhindern ein werkstoffliches Recycling. Zum anderen kann ein pauschales Verbot bestimmter Additive bestehende Geschäftsmodelle und funktionierende Recyclingkreisläufe unmöglich machen. Hier sind faktenbasierte Entscheidungen auf Grundlage unabhängiger Untersuchungen zur Toxikologie und Migration wichtig. Sowohl Überregulierung als auch eine zu sorglose Regulierung stehen auf lange Sicht dem werkstofflichen Recycling im Wege. Deutschland und die EU sollten hier ihre Vorreiterrolle weiter ausbauen. Aus Sicht der produzierenden Industrie ist außerdem die Planungssicherheit wichtig.

7.6 Preisliche Konkurrenz der Rezyklate ermöglichen

Rezyklate müssen sich im Wettbewerb gegen Neuware behaupten, für die viele Kosten externalisiert sind. Im bestehenden System ist der Preisunterschied zwischen Rezyklaten und Neuware nicht groß genug, um den Rezyklateinsatz betriebswirtschaftlich zu rechtfertigen. Folgende Ansätze sind denkbar, um diesem Ungleichgewicht entgegenzuwirken:

- Die Einführung einer Rezyklatquote hat unter diesem Gesichtspunkt mehrere positive Auswirkungen. Zum einen wird der verpflichtend zu nutzende Rezyklatanteil der Produktionsmenge vom Wettbewerb mit Neuware entkoppelt. Dies garantiert Ressourcen- und Umweltschutz und verhindert, dass der Preis als Hauptkriterium zur Materialauswahl herangezogen wird. Zum anderen wird durch die Rezyklatquote eine stabile Nachfrage geschaffen, was Investitionen in Sortier- und Aufbereitungstechnik ermöglicht. Die Rezyklatqualität steigt, die Produktionskosten sinken und ein "spill-over" Effekt ist möglich, sodass langfristig über den Anteil der Quote hinaus Rezyklat verwendet wird. Auch die zusätzlichen Produktionskosten auf Seiten der Hersteller bei der Produktion mit Rezyklaten werden geringer, da Einstiegshürden wie z. B. der Einkauf von Rezyklat oder Produktionsprozesse mit Rezyklat schon genommen wurden und der Mehraufwand auf diese Weise sinkt.
- Eine Internalisierung der Umweltkosten für Neuware würde die preisliche Konkurrenz von Rezyklaten verbessern. Geht man, wie vom UBA empfohlen, von Kosten von mindestens 180 Euro pro Tonne CO₂ aus, ist Rezyklatkunststoff aufgrund seiner geringeren Treibhausgasemissionen preislich konkurrenzfähiger (Umweltbundesamt, 2019, p. 9). Für Neuware ist, je nach Kunststoff, eine Preissteigerung im unteren zweistelligen Prozentbereich zu erwarten.
- Auch für andere in diesem Kapitel angesprochene Maßnahmen wie Design-for-Recycling, reinere Abfallströme oder Förderung der Recyclinginfrastruktur ist anzunehmen, dass sie sich positiv auf den Preisunterschied zwischen Neuware und Rezyklaten auswirken

7.7 Weitere Maßnahmen

Folgende weitere Maßnahmen sind zu empfehlen:

- ▶ Die Förderung des Aufbaus einer geeigneten Recyclinginfrastruktur wird schon praktiziert und kann z. B. durch Etablierung neuer Technologien einen Beitrag zum hochwertigen werkstofflichen Recycling liefern.
- ▶ Entscheidungsgrundlagen schaffen. Um zielgerichtete Entscheidungen treffen zu können, bedarf es in vielen Fällen einer entsprechenden Datengrundlage. Diese ist nur in Teilbereichen vorhanden, wie in Kapitel 2 und 6 gezeigt wurde. Die Erhebung entsprechender Daten in aggregierter Form sollte von staatlicher Seite vorangetrieben werden.
- ▶ Rücklaufmaterial aus der Baubranche umfasst derzeit noch sehr geringe Mengen. Da zukünftig ein höheres Aufkommen an Bauabfällen zu erwarten ist, sollten dennoch echte Kreislaufschließungen, d.h. „Bauprodukt zu Bauprodukt“ angestrebt werden, anstatt Abfälle aus anderen Produktkreisläufen auszuschleusen und durch aufwendige Aufbereitungsschritte und Additivierungen nutzbar zu machen.
- ▶ Vergleichsweise hohe Wiedereinsatzquoten von Rezyklaten sind im Falle von PVC bzw. Fensterprofilen zu verzeichnen, was durch das Rücknahmesystem *Rewindo* realisiert wird. Für Bauprodukte aus Kunststoff, für welche sich zukünftig ein steigendes Abfallaufkommen abzeichnet, sind ähnliche Rücknahmesysteme anzustreben und deren Wirtschaftlichkeit zu prüfen.
- ▶ Können aus Gründen geringer Mengenverfügbarkeiten Abfälle aus dem Baubereich nicht wieder für die Herstellung desselben Produkts dienen (z. B. Rohr zu Rohr), ist anzustreben, diese Materialien für andere Bauprodukte zu verwenden. Insbesondere bei Produkten, die entsprechend Teil D der Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen keinen Verwendbarkeitsnachweis bedürfen und für die es keine anerkannten Regeln der Technik gibt, liegen noch große Potenziale für einen höheren Rezyklateinsatz vor.

Die vorliegenden Ergebnisse wurden mit Expert*innen mit unterschiedlichen Bezügen zu und Perspektiven auf das Recycling von Bauprodukten aus Kunststoff diskutiert. Hier wurde noch einmal deutlich, dass diese Kunststoffe aufgrund ihrer langen Nutzungsdauer und der erschwerten Trennbarkeit der Abfallströme eine besondere Herausforderung für das Recycling darstellen. Diese weisen aber aufgrund der hohen und steigenden Mengen trotzdem eine hohe Relevanz für Umwelt- und Klimaschutz auf. Zudem wurde die enorme Herausforderung betont, die der Systemwandel von einem linearen System hin zu einer Kreislaufwirtschaft darstellt, denn es handelt sich um die Transformation der gesamten Wertschöpfungskette. Abgesehen von der technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit ist hierfür zusätzlich ein Kulturwandel erforderlich. Auf Seiten der Kunststoffindustrie müssen alte Routinen verdrängt, Geschäftsmodelle angepasst und zum Teil bestehende funktionierende Geschäftsbeziehungen ersetzt werden. Gleichzeitig muss für einen erfolgreichen Wandel auch auf Seiten der Konsumenten ein grundlegendes Umdenken stattfinden. Rezyklate müssen als gleichwertiger Werkstoff anerkannt werden. Eine weitere Voraussetzung für den Transformationsprozess ist somit auch die enge Kooperation aller beteiligten Akteure. Zum einen muss diese Kooperation

entlang der Wertschöpfungskette stattfinden, sodass Transparenz und dadurch Vertrauen bezüglich der Qualität und Herkunft der Materialien geschaffen werden. Eine standardisierte, digitale Weitergabe von Informationen und Daten entlang der Wertschöpfungskette ist hierfür wichtig, doch auch hier stellt die lange Nutzungsdauer der Bauprodukte eine Herausforderung dar. Auch wurde das Design for Recycling als weitere wichtige Komponente innerhalb der Wertschöpfungskette herausgearbeitet, welche möglichst in Kooperation der Marktteilnehmenden angegangen werden sollte. Als weiteres entscheidendes Kooperationsfeld wurde die Zusammenarbeit von Politik bzw. Behörden mit der Industrie genannt. Eine Form der Regulierung hin zu besserem Recycling wird von vielen verschiedenen Akteuren als nötig und positiv gesehen. Wichtig für einen Wandel sei dabei allerdings im Rahmen des Möglichen zu bleiben, größere Veränderungen schrittweise einzuführen und die Unternehmen einzubinden bzw. bei der Umsetzung zu unterstützen. Auch hier wurde deutlich, dass Maßnahmen wie eine Rezyklatquote auf europäischer Ebene umgesetzt werden sollten. Weiterhin wurde die konsequente Umsetzung des „Green Procurement“ gefordert, um Absatzmärkte für Rezyklate zu schaffen.

8 Quellenverzeichnis

Accorsi, R., Baruffaldi, G., Manzini, R. & Pini, C. (2019): Environmental Impacts of Reusable Transport Items: A Case Study of Pallet Pooling in a Retailer Supply Chain. Sustainability 11(11), 3147.

AGPR (2020): AGPR - Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling - Website.
<http://www.agpr.de/cms/website.php?id=/de/aktuelles.htm&nid=6&nidsub=1> (10.05.2020).

AGPR (o. J.): AGPR - Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling: Prozess.
<http://www.agpr.de/cms/website.php?id=/de/recycling-prozess.htm&nid=1&nidsub=3> (10.07.2020).

AGPU (2019): Die PVC-Kabelbranche richtet sich neu aus. <https://www.agpu.de/die-pvc-kabelbranche-richtet-sich-neu-aus/3588> (1.12.2020).

AGVU & IK (2020): Gesetzliche Mindestquoten für Rezyklate in Kunststoffverpackungen? - Diskussionspapier zur aktuellen Debatte. https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/wp-content/uploads/2020/06/Diskussionspapier_AGVU_IK_-Mindesteinsatzquoten-f%C3%BCr-Kunststoff-Rezyklate-FINAL.pdf (18.09.2020).

Albrecht, W. (2019): Recycling von Wärmedämmstoffen. In: Bauphysik Kalender 2019. John Wiley & Sons, Ltd, 121–138. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783433609842.ch4> (10.07.2020).

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 der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Anglo Reycling (2020): Home | Anglo Recycling | Giving Textiles a Second Life. Anglo Recycling
<https://www.angloreycling.com/> (10.05.2020).

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2020): Heizwerte der Energieträger und Faktoren für die Umrechnung von natürlichen Einheiten in Energieeinheiten zur Energiebilanz 2018(Stand: 11.04.2020) Energieträger.
https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=heizwerte2005bis2018.pdf (11.01.2021).

Arbeitsgemeinschaft Verpackung + Umwelt e.V. (2019): AGVU-Empfehlungen zur Erhöhung des Einsatzes von Rezyklaten. <https://www.agvu.de/wp-content/uploads/2019/09/AGVU-Empfehlungen-zur-Erh%C3%B6hung-des-Rezyklateinsatz-Sept.-19.pdf> (01.04.2021).

Ausschuss für Gefahrstoffe (2020): Technische Regeln für Gefahrstoffe, Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe, TRGS 905, Ausgabe März 2016, Zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2020, S. 201 [Nr. 9-10] v. 13.03.2020. https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-905.pdf?__blob=publicationFile (20.01.2021).

AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (2020): Auskunft im Rahmen eines durchgeführten Experteninterviews.

Bachl (2019): Downloads zum Produktbereich PUR und Leistungserklärung.
<https://www.bachl.de/index.php/purpir/downloads-zu-bachl-pur-pir> (5.01.2021).

Barbier Group (o. J.): Production equipment. Barbier Group <https://www.barbiergroup.com/en/barbier-group-2/production-equipment/> (19.01.2021)a).

Barbier Group (o. J.): RECYPLAST®50. <https://www.barbiergroup.com/en/barbier-group-2/our-innovations-2/recyclast50/> (29.10.2020)b).

Barbier Group (o. J.): RECYPLAST Film. Barbier Group <https://www.barbiergroup.com/en/barbier-group-2/our-innovations-2/recyclast-film/> (19.01.2021)c).

Bauforumstahl.V. (o. J.): Heizwertkunststoff.

<https://bauforumstahl.de/upload/documents/brandschutz/kennwerte/Heizwertkunststoff.pdf> (11.01.2021).

Bauhaus (o. J.): Nachhaltigkeit. <https://www.bauhaus.info/unternehmen/nachhaltigkeit> (20.07.2020).

BaumarktManager (2019): Toom optimiert Verpackungen nachhaltig.

<https://www.baumarktmanager.de/toom-optimiert-verpackungen-nachhaltig/150/69301/> (8.10.2020).

Bauzentrum München (2017): Leitfaden Dämmstoffe 3.0. Mit Schwerpunkt Naturdämmstoffe.

Landeshauptstadt München (Referat für Gesundheit und Umwelt), München.

https://www.muenchen.de/rathaus/dam/jcr:c44833ca-c8b6-4b63-ba37-3c5c588d3b53/leitfaden_daemmstoffe_3_0.pdf (29.12.2019).

Beauson, J., Lilholt, H. & Brøndsted, P. (2014): Recycling solid residues recovered from glass fibre-reinforced composites – A review applied to wind turbine blade materials. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 33(16), 1542–1556.

Beton wiki (2017): Alkaligehalt des Zementsteins – beton.wiki.

https://www.beton.wiki/index.php?title=Alkaligehalt_des_Zementsteins (22.01.2021).

BG BAU (2020): Epoxidharze | BG BAU - Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft.

<https://www.bgbau.de/themen/sicherheit-und-gesundheit/gefahrstoffe/gefahrstoffe-beim-bauen-renovieren-und-reinigen/epoxidharze/> (20.01.2021).

Biganzoli, L., Rigamonti, L. & Grosso, M. (2018): Intermediate Bulk Containers Re-use in the Circular Economy: An LCA Evaluation. *Procedia CIRP* 69, 827–832.

Bindemann Verpackung (o. J.): PP-Umreifungsband 905, schwarz - 16,0x0,50mmx2000m - Reißkraft 200 Kg - Kern 406 mm. <https://www.bindemann-verpackung.de/PP-Umreifungsband-905-schwarz-160x050mmx2000m-Reisskraft-200-Kg-Kern-406-mm.html> (30.10.2020).

BMI & BMVg (2018): Baufachliche Richtlinien Recycling. https://www.bfr-recycling.de/downloads/Baufachliche_Richtlinien_Recycling.pdf (5.01.2021).

BMU (2018): Ressourcenschonung durch Hohlkörperblasanlage zur Herstellung von Leitpfosten mit Rezyklatanteil.

Bonnet, M. (2014): Kunststofftechnik - Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.

boxline (o. J.): Mehrweg statt Einweg - Whitepaper Logistikatgeber.

<https://www.boxline.com/pub/media/wysiwyg/certificate/White-Paper-Mehrweg-statt-Einweg-20110715.pdf> (29.10.2020).

Brunn, M. (2019): Tube aus Systalen Primus HDPE. *RECYCLING magazin*

<https://www.recyclingmagazin.de/2019/10/18/tube-aus-systalen-primus-hdpe/> (29.10.2020).

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR) (2017): Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). BBSR, Bonn.

<https://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-undgebaeuedaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html> (11.01.2020).

Bürger, V., Hesse, T., Palzer, A., Köhler, B., Herkel, S., Engelmann, P. & Quack, D. (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Energieeffizienzpotentiale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

bvse (2020): Modernste Sortieranlage für Bau- und Gewerbeabfälle in Mecklenburg-Vorpommern in Betrieb.

<https://www.bvse.de> <https://www.bvse.de/recycling/recycling-nachrichten/6060-modernste-s> (10.07.2020).

CEN (2010): Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 1: Allgemeine Rahmenbedingungen; EN 15643-1:2010-12.

Chokri, C. (2011): Textile Werkstoffe für den Leichtbau - Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg.

Conversio (2018): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017 - Kurzfassung.

Conversio Market & Strategy GmbH (2018): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017.

Cousins, D.S., Suzuki, Y., Murray, R.E., Samaniuk, J.R. & Stebner, A.P. (2019): Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades. Journal of Cleaner Production 209, 1252–1263.

Creacycle (o. J.): Creacycle. <https://www.creacycle.de/de/> (7.12.2020).

Creacycle (2020): Der CreaSolv® Prozess. <https://www.creacycle.de/de/der-prozess.html> (7.12.2020).

DD/H - Das Dachdecker-Handwerk (2019): Recycling Bitumen: neues Verfahren bei Asphaltherstellung. www.ddh.de/vom-dach-auf-die-strasse/150/65784/ (9.07.2020).

Dehne, I., Oetjen-Dehne, R., Siegmund, N., Dehoust, G. & Möck, A. (2015): Stoffstromorientierte Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Deilmann, C., Krauß, N., Gruhler, K. & Reichenbach, J. (2014): Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raum-forschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn.

Deilmann, C., Reichenbach, J., Krauß, N. & Gruhler, K. (2017): Materialströme im Hochbau: Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Stand: Dezember 2016, C. Asam und W. Haferkorn [Hrsg.], Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn.

Der Grüne Punkt (2020): Erfolgsstory Pöppelmann - Pflanztopfserie schließt den Wertstoffkreislauf. <https://www.gruener-punkt.de/de/rezyklat-systalen/referenzen-systalen/erfolgsstory-poeppelmann.html> (29.10.2020).

Deutsche Umwelthilfe e.V. (DUH) (2017): Unter den Teppich gekehrt. Das große Entsorgungsproblem der Teppichbodenindustrie in Deutschland. https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Kreislaufwirtschaft/Teppich-Recycling/170228_DUH_Studie_Das_gro%C3%9Fe_Entsorgungsproblem_der_dt_Teppichindustrie_DT_FINAL.pdf (12.02.2020).

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (2017): Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB), in seiner Fassung vom 31.08.2017.

Deviatkin, I., Khan, M., Ernst, E. & Horttanainen, M. (2019): Wooden and Plastic Pallets: A Review of Life Cycle Assessment (LCA) Studies. Sustainability 11(20), 5750.

Diederich, D., Butt, D.T. & Reipke, J. (2017): Chemische Analysen zur Einstufung von künstlichen Mineralwollen. Analytik News, 4.

Diemert, J., Hauk, J., Stieneker, A. & Woidasky, J. (2008): Polyvinylchlorid (PVC). In: P. Elsner, P. Eyerer, und T. Hirth [Hrsg.] DOMININGHAUS - Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen. VDI-Buch. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. <https://www.springer.com/de/book/9783540724018> (20.01.2021).

Drozdowski, G. (2007): Lagerstätten nutzbarer Festgesteine in Nordrhein-Westfalen. Geologischer Dienst NRW, Krefeld

Dr. Schnell (o. J.): MILIZID ECO. <https://www.dr-schnell.com/shop/kategorien-in-der-uebersicht/gebaeudereinigung/sanitaerreiniger/1481/milizid-eco> (28.10.2020).

DUH (2020): Pressemitteilung - Deutsche Umwelthilfe fordert konsequenten Vollzug der Gewerbeabfallverordnung als unerlässlichen Beitrag zum Klimaschutz. Deutsche Umwelthilfe e.V. <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/deutsche-umwelthilfe-fordert-konsequenten-vollzug-der-gewerbeabfallverordnung-als-unerlaesslichen-bei/> (25.11.2020).

Elbert, R. & Lehner, R. (2019): Influence of a Reasonable Allocation of Pallets in the Pallet Exchange System. In: Advances in Production, Logistics and Traffic. Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic. Springer, Cham, 90–101. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-13535-5_7 (16.07.2020).

elipso & IK (2020): PackTheFuture Award Innovation Book. http://www.packthefuture.com/wp-content/uploads/2014/05/Awardbooklet20_DINA5_200512.pdf (01.04.2021).

Envirowise (2006): Managing packaging waste on your construction site. http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/GG606_final.pdf (20.10.2020).

EPPA (2018): Kunststoff-Fensterprofilsysteme mit Rezyklatanteil. Wissenswertes über den Einsatz von Rezyklat in Kunststofffenstersystemen.

Erema (2016): Laserfilter. Das Hochleistungs-Filtriersystem. <https://www.erima.com/de/filtrieren/> (26.11.2020).

Ernst, W. (2017): Zur Lebensdauer von Flachdächern mit Kunststoffbahnen. In: Bautechnik (94. Jahrgang, Heft 4). Ernst & Sohn. Berlin.

EU-Recycling (2019): Bodenbelag-Recycling: Angesichts der Quoten auf dem Teppich bleiben. <https://eu-recycling.com/Archive/23613> (10.07.2020).

Eurobitume (2019): Eurobitume Deutschland Statistik Bitumenverbrauch 2018. <https://www.eurobitume.eu/media/releases/?filter=21> (18.01.2020).

Europäische Kommission (o. J.): Circular Plastics Alliance. Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs - European Commission https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/circular-plastics-alliance_en (30.10.2020).

Europäische Kommission (2011a): EU-Verordnung Nr. 143/2011. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:044:0002:0006:de:PDF> (1.12.2020).

Europäische Kommission (2020): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft - Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN> (01.04.2021).

Europäische Kommission (2018a): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Eine europäische Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_3&format=PDF (01.04.2021).

Europäische Kommission (2018b): Mitteilung der Kommission im Rahmen der Durchführung der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, 2018/C 092/06 (09.03.2018) und 417/07 (16.11.2018).

Europäische Kommission (2011b): Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, Anhang 3, in seiner Fassung vom 09. März 2011. („BauPVO“).

Europäische Kommission (2011c): Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, in seiner Fassung vom 09. März 2011. („BauPVO“).

Europäisches Komitee für Normung (2013): DIN CEN/TS 14541, Kunststoffrohrleitungen und Formstücke – Eigenschaften für die Verwendung von Rücklaufmaterial und Rezyklat aus PVC-U-, PP- und PE-Materialien; Deutsche Fassung CEN/TS 14541:2013.

Europäisches Komitee für Normung (2014): DIN EN 12597:2014-08, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Terminologie; Dreisprachige Fassung EN_12597:2014. Beuth Verlag GmbH. <https://www.beuth.de/de/-/-/194352262> (30.11.2020).

Europäisches Komitee für Normung (2008): DIN EN 15342:2008-02, Kunststoffe – Kunststoff-Rezyklate – Charakterisierung von Polystyrol (PS)-Rezyklaten; Deutsche Fassung EN_15342:2007. Beuth Verlag GmbH. <https://www.beuth.de/de/-/-/99337297> (13.07.2020).

Europäisches Komitee für Normung (2007): DIN EN 15345:2007 Kunststoffe – Kunststoff-Rezyklate – Charakterisierung von Polypropylen (PP)-Rezyklaten; Deutsche Fassung.

Europäisches Komitee für Normung (2015): DIN EN 15346:2015-01, Kunststoffe – Kunststoff-Rezyklate – Charakterisierung von Polyvinylchlorid (PVC)-Rezyklaten; Deutsche Fassung EN_15346:2014. Beuth Verlag GmbH. <https://www.beuth.de/de/-/-/206286023> (13.07.2020).

Europäisches Komitee für Normung (o. J.): DIN prEN 15344:2020 Kunststoffe – Kunststoff-Rezyklate – Charakterisierung von Polyethylen (PE)-Rezyklaten; Deutsche und Englische Fassung.

Europäisches Komitee für Normung (2019): DIN prEN 17410:2019 Kunststoffe – Geregeltes Verfahren für das Recycling von gebrauchten PVC-U-Fenstern und Türen; Deutsche und Englische Fassung.

Europäisches Parlament (2020): Pressemitteilung: Parliament objects to lead in PVC to protect public health and the environment | Aktuelles | Europäisches Parlament. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20200206IPR72018/parliament-objects-to-lead-in-pvc-to-protect-public-health-and-the-environment> (20.01.2021).

European Chemicals Agency (o. J.): ANNEX XVII TO REACH – Conditions of restriction Entry 51. <https://echa.europa.eu/documents/10162/aaa92146-a005-1dc2-debe-93c80b57c5ee> (20.01.2021)a).

European Chemicals Agency (o. J.): ANNEX XVII TO REACH – Conditions of restriction Entry 52. <https://echa.europa.eu/documents/10162/57096439-2ddd-4f14-b832-85181a09f595> (20.01.2021)b).

European Chemicals Agency (2019): Data on Candidate List substances in articles. https://echa.europa.eu/documents/10162/13642/data_candidate_list_substances_in_articles_en.pdf/d48a58e4-0d67-4c54-86a5-0b15877a8c93 (20.01.2021).

European Chemicals Agency (2021a): Hexabromocyclododecane - Substance Information - ECHA. <https://echa.europa.eu/de/substance-information/-/substanceinfo/100.042.848> (20.01.2021).

European Chemicals Agency (2021b): Lead compounds - Registry of restriction intentions until outcome - ECHA. <https://echa.europa.eu/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/substance/100.239.189> (20.01.2021).

Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie e.V. (KRV) (2018): Relevante Zahlen aus der Konjunktur der Kunststoffrohrindustrie. <https://www.krv.de/artikel/relevante-zahlen-aus-der-konjunkturder-kunststoffrohrindustrie> (23.01.2020).

Fahr (2018): Materialmarkierung von Polysecure. https://www.tecpart.de/images/tecpart/intern/p_fachgruppen/TOP-4---Tracer-based-sorting--Tracerbasierte-Kunststoffsartierung.pdf (5.05.2020).

- Feil, A. & Pretz, T. (2020): Mechanical recycling of packaging waste. In: Plastic Waste and Recycling. Elsevier, 283–319. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128178805000116> (2.10.2020).
- Feng, Y., Zhao, F. & Xu, H. (2016): Recycling and Utilization of Waste Glass Fiber Reinforced Plastics. MATEC Web of Conferences 67, 07012.
- FH Campus Wien, Packforce Austria & Circular Analytics (2019): Circular Packaging Design Guideline - Empfehlungen für die Gestaltung recyclinggerechter Verpackungen. https://www.fh-campuswien.ac.at/fileadmin/redakteure/Forschung/FH-Campus-Wien_Circular-Packaging-Design-Guideline_FIN_DE_Web.pdf (01.04.2021).
- Fischbach (o. J.): Produktblatt „Fischbach Recycling Kartusche“. https://www.fischbach-fi.com/assets/uploads/TYP_rE_310_L_DE.pdf (29.10.2020).
- Flemming, M., Ziegmann, G. & Roth, S. (1995): Faserverbundbauweisen. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Frömmig, J. (2019): Der PVC-Fensterkreislauf funktioniert in Deutschland sehr gut. <https://www.k-zeitung.de/der-pvc-fensterkreislauf-funktioniert-in-deutschland-sehr-gut/> (10.01.2021).
- Frosch (o. J.): Frosch für saubere Meere - Unsere Recyclat-Initiative. https://frosch.de/Nachhaltigkeit/Saubere-Meere.html?gclid=EAlaIqobChMIkLDet-C96glVgojVCh3H-A6HEAAYASAAEglikvD_BwE (29.10.2020).
- Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung (2019): Hemmnisse für den Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen - Kurzfassung. Mainz. https://www.hde-klimaschutzoffensive.de/sites/default/files/uploads/document/2019-04/1904_KF_Hemmnisse%20Rezyklateinsatz_HDE-KSO.pdf (01.04.2021).
- Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung (2020): Potenzial zur Verwendung von Recycling-Kunststoffen in der Produktion von Kunststoffverpackungen in Deutschland. Mainz. <https://www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html> (18.09.2020).
- González Pericot, N. (2011): Management of Waste from Packaging of Construction Materials in Building Construction Works. The Open Construction and Building Technology Journal 5(1), 149–155.
- González Pericot, N., Villoria Sáez, P., Del Río Merino, M. & Liébana Carrasco, O. (2014): Production patterns of packaging waste categories generated at typical Mediterranean residential building worksites. Waste Management 34(11), 1932–1938.
- Greenstream (2020): Greenstream Flooring CIC. Greenstream Flooring CIC <https://www.findcarpettiles.co.uk/> (10.05.2020).
- Grimm, R. (2013): Europalette: System des Palettentausches. BaustoffWissen <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/logistik/europalette-die-zustimmung-schwindet/> (6.10.2020).
- Grimm, R. (2020): Zement-Lagerung: Studie zu Papiersäcken. BaustoffWissen <https://www.baustoffwissen.de/kategorie-ausbildung/azubi-ratgeber/arbeitsalltag/zement-lagerung-studie-zu-zementsaecten-papier-oder-kunststoff-sintef-esg/> (9.10.2020).
- GS1 Austria & Logistikverbund Mehrweg (2018): Warenanlieferung im Handel ohne Paletten – Tausch. https://l-mw.at/wp-content/uploads/2018/08/03_GS1_LMW_Publikation_Anlieferung-ohne-Paletten-Tausch_2018.pdf (01.04.2021).
- Hagnell, M.K. & Åkermo, M. (2019): The economic and mechanical potential of closed loop material usage and recycling of fibre-reinforced composite materials. Journal of Cleaner Production 223, 957–968.
- Hallmann & Jäger (2010): Management von Rücknahmesystemen der nächsten Generation. DOI 10.1007/s00550-010-0177-5 .

- Hallmann, U. & Jäger, F. (2010): Management von Rücknahmesystemen der nächsten Generation. UmweltWirtschaftsForum 18(2), 111–120.
- Heinzlreiter, M. (2016): Hochwertige Recycling-Granulate aus PE-Produktionsabfällen. Plastverarbeiter.de <https://www.plastverarbeiter.de/64221/hochwertige-recycling-granulate-aus-pe-produktionsabfaellen/> (30.11.2020).
- Henkel (2020): Nachhaltigkeitsbericht 2019. Düsseldorf. <https://www.henkel.de/resource/blob/1040466/296deab56ec26a8e3a2c3426fde60113/data/2019-nachhaltigkeitsbericht.pdf> (01.04.2021).
- Henkel (2018): Pattex Made-at-Home geht mit nachhaltiger Verpackung voran. <https://www.henkel.de/presse-und-medien/presseinformationen-und-pressemappen/2018-06-28-pattex-made-at-home-geht-mit-nachhaltiger-verpackung-voran-860582> (27.10.2020).
- Henning, O., Küjl, A., Oelschläger, A. & Phillip, O. (1989): Technologie der Bindebaustoffe – Band 1 Eigenschaften, Rohstoffe, Anwendungen. 2. Auflage, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Hinz, W. (1971): Silikate – Grundlagen der Silikatwissenschaft und Silikattechnik, Band 2 – Die Silikatsysteme und die technischen Silikate. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Hischier, Wäger & Gauglhofer (2005): Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE). doi:10.1016/j.eiar.2005.04.003 .
- Holz Berufsgenossenschaft (2000): BGI 729 Faserverstärkte Polyesterharze Handhabung und sicheres Arbeiten. <https://www.arbeitssicherheit.de/schriften/dokument/0%3A5004896%2C8.html> (20.01.2021).
- Holzmann Medien GmbH & Co. KG & GFF (2013): Das Praxismagazin für Produktion und Montage.(12/2013). https://www.gff-magazin.de/files/smfiledata/5/7/2/3/8/3/GFF_12_2013.pdf (01.04.2021).
- Hornbach Holding (2019): Nichtfinanzielle Konzernklärung 2018/19. München. https://www.hornbach-holding.de/media/de/mediacenter/publications/geschaeftsberichte_1/hh_3/2018_7/2019_nfe_final.pdf (01.04.2021).
- Hornbogen, E., Eggeler, G. & Werner, E. (2019): Werkstoffe – Aufbau und Eigenschaften von Keramik, Metallen, Polymer- und Verbundwerkstoffen. 12. aktualisierte Auflage, Springer Vieweg, Berlin.
- Hosokawa Alpine (2016): Kabelrecycling - klar und deutlich getrennt. https://www.hosokawa-alpine.de/fileadmin/user_upload/content/Mechanische_Verfahrenstechnik/Applikationen/R/Kabelrecycling/0141-DE-2015-12_-_Kabelrecycling.pdf (01.04.2021).
- IK (o. J.): Forecast Produktion Kunststoff-packmittel und Verpackungs-folien in Deutschland 2019. <https://kunststoffverpackungen.de/marktdaten/produktion/> (22.10.2020).
- IK (o. J.): Nachhaltigkeit & Kreislaufwirtschaft. IK <https://kunststoffverpackungen.de/themen/nachhaltigkeit-kreislaufwirtschaft/> (30.10.2020)b).
- IK (2018): Nachhaltigkeitsbericht 2018. <https://kunststoffverpackungen.de/wp-content/uploads/2019/09/Sustainability-Report-2018> (01.04.2021).
- IK & Plastics Europe Deutschland e.V. (2020a): Big Bags aus recycelten PET-Flaschen aus Indonesien. Newsroom.Kunststoffverpackungen <https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/2020/05/28/big-bags-aus-recycelten-pet-flaschen/> (29.10.2020).
- IK & Plastics Europe Deutschland e.V. (2020b): DUO EARTH 4 Stretchfolie mit Post Consumer Recykat Bestandteilen. Newsroom.Kunststoffverpackungen <https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/2020/05/14/duo-earth-4-stretchfolie-mit-post-consumer-recyklat-bestandteilen/> (29.10.2020).

Illig, H., Ehrig, R., Herrmann, V., Hübscher, M., Katzschmann, R., Lange, J., Lauenroth, P., Renno, D. & Schier, H. (1983): ABC Glas. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

Industrieverband Hartschaum e.V. (IVH) (2020): Recycling von EPS-Hartschaum. Kreislaufwirtschaft im Blick. <https://www.ivh.de/umwelt/recycling/> (10.01.2021).

Initiative Erntekunststoffe Recycling Deutschland (ERDE) (2020): Erde steigert Agrarfoliensammlung in 2019 deutlich. <https://www.erde-recycling.de/pr-media/aktuelles.html> (7.05.2020).

Interface (o. J.): Evergreen. <http://www.interface-resource-europe.com/evergreen.htm> (29.10.2012).

International Organisation for Standardisation (2005): DIN EN ISO 16103:2005-09; Verpackung - Verpackungen zur Beförderung gefährlicher Güter - Recycling-Kunststoffe; Deutsche Fassung. <https://www.beuth.de/de/-/-/78179355> (16.07.2020).

Interseroh (o. J.): toom Baumarkt. <https://www.interseroh.de/referenzen/toom-baumarkt/> (27.10.2020).

Iwaya, T., Tokuno, S., Sasaki, M., Goto, M. & Shibata, K. (2008): Recycling of fiber reinforced plastics using depolymerization by solvothermal reaction with catalyst. *Journal of Materials Science* 43(7), 2452–2456.

Job, S. (2013): Recycling glass fibre reinforced composites – history and progress. *Reinforced Plastics* 57(5), 19–23.

Jones, S. (2018): How Does The Construction Industry Make Use Of Plastic Pallets? Medium <https://medium.com/@plasticpallets/how-does-the-construction-industry-make-use-of-plastic-pallets-7047cc45ea42> (14.10.2020).

Kägi, T. & Dinkel, F. (2018): Ökobilanz von PET-Flaschen mit unterschiedlichem Rezyklatanteil. carbotech. https://www.petrecycling.ch/tl_files/content/PDF/Wissen/Oekologie/PET-Recycling_Schweiz_Oekobilanz_PET-Flaschen_Rezyklatanteil.pdf (01.04.2021).

Kaßmann, Monika & DIN Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.] (2014): Grundlagen der Verpackung - Leitfaden für fächerübergreifende Verpackungsausbildung. 2., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Klausner & Hendrickson (2000): Reverse-Logistics Strategy for Product Take-Back. <http://dx.doi.org/10.1287/inte.30.3.156.11657> (01.04.2021).

Klose, U. (2019): Baumärkte haben wieder die Schrauben lose. *UmweltDialog* <https://www.umweltDialog.de/de/umwelt/plastik-muell/2019/baumaerkte-haben-wieder-die-schrauben-lose.php> (6.10.2020).

Kranert, M. [Hrsg.] (2017): Einführung in die Kreislaufwirtschaft: Planung - Recht - Verfahren. 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.

Krauß, O. & Werner, T. (2014): Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich.

Kreislaufwirtschaftsgesetz (2017): Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.

KRV (2015): Recycling als gesamtwirtschaftliche Herausforderung - Politische Rahmenbedingungen und Initiativen der Industrie - KRV Positionspapier zum Kunststoffrohrrecycling. <https://www.krv.de/artikel/krv-impulse-okt-2015> (01.04.2021).

KRV Impulse (2019): Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffrohrindustrie. https://www.krv.de/system/files/downloads/krv-impulse-web_210519.pdf (11.05.2020).

KRV (o. J.): Allgemeines. Kunststoffrohrverband e.V. - Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie <https://www.krv.de/wissen/allgemeines-33> (26.02.2021).

- KunststoffWeb (2020a): APK: LDPE-Rezyklat für laminierten Tuben. KunststoffWeb https://www.kunststoffweb.de/technologie-news/apk_ldpe-rezyklat_fuer_laminierten_tuben_tn103475 (29.10.2020).
- KunststoffWeb (2020b): Borealis/Menshen: Verpackungsverschlüsse aus PCR-Material. KunststoffWeb https://www.kunststoffweb.de/technologie-news/borealis_menshen_verpackungsverschluesse_aus_pcr-material_tn103599 (29.10.2020).
- KunststoffWeb (2020c): Trioplast: Handstretchfolie mit 75 Prozent Rezyklatanteil. KunststoffWeb https://www.kunststoffweb.de/branchen-news/trioplast_handstretchfolie_mit_75_prozent_rezyklatanteil_t245849 (29.10.2020).
- KunststoffWeb (2018): VinylLoop: PVC-Recyclingbetrieb ist eingestellt. KunststoffWeb https://www.kunststoffweb.de/branchen-news/vinylloop_pvc-recyclingbetrieb_ist_eingestellt_t240095 (20.01.2021).
- Lange, V. & Hoffmann, J. (2009): Empirische Kostenanalyse des Tauschverfahrens im Europalettenpool. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund. https://www.iml.fraunhofer.de/content/dam/iml/de/documents/OE%20150/Flyer1/Produktblatt_Palettenstudie.pdf (01.04.2021).
- Lange, V. & Siedlarek, L. (2015): Empirische Kostenstudie zum Tauschverfahren von Halbpaletten in Deutschland. Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik, Dortmund. https://www.iml.fraunhofer.de/content/dam/iml/de/documents/OE%20150/Flyer1/Halbpalettenstudie_Fraunhofer%20IML_2015.pdf (01.04.2021).
- Lanxess (2009): Technische Information - Die Zwillinge unter den Polyamiden Eigenschaftsvergleich PA 6 und PA 66. https://techcenter.lanxess.com/scp/emea/de/docguard/TI_2009-017_DE_Die_Zwillinge_unter_den_Polyamiden.pdf?docId=63401 (25.11.2020).
- Lejeail, M. & Fischer, H.R. (2020): Development of a completely recyclable glass fiber-reinforced epoxy thermoset composite. Journal of Applied Polymer Science 138(3), 49690.
- Lindner, C. (2014): Analyse der PVC Produktion, Verarbeitungs-, Abfall- und Verwertungsströme in Deutschland 2013. Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH.
- Lindner, C. (2008): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2007. - Kurzfassung -.
- Lindner, C. (2010): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2009. - Kurzfassung -.
- Lindner, C. (2012): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011. - Kurzfassung -.
- Lindner, C. (2016): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015. - Kurzfassung -.
- Lindner, C. & Schmidt, J. (2018): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017. Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff.
- Lindner, C. & Schmidt, J. (2020): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019.
- Logistikverbund Mehrweg (2017): Einweg-Mehrweg-Rechner. <https://l-mw.at/index.php/einweg-mehrweg-rechner/> (01.04.2021).
- Maharana, T., Negi, Y.S. & Mohanty, B. (2007): Review Article: Recycling of Polystyrene. Polymer-Plastics Technology and Engineering 46(7), 729–736.

- Maier, R. & Schiller, M. (2016): Handbuch Kunststoff Additive. 4. Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München.
- Maile, K. & Roos, E. (2015): Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung. 5. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Heidelberg.
- Marschner, P. (2017): Showdown: Kunststoffpalette vs. Holzpalette. <https://www.transpack-krumbach.de/blog/verpackungsmarkt/showdown-kunststoffpalette-vs.-holzpalette> (30.10.2020).
- Martens, H. (2011): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Martens, H. & Goldmann, D. (2016): Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis. Springer-Verlag.
- Mativenga, P.T., Shuaib, N.A., Howarth, J., Pestalozzi, F. & Woidasky, J. (2016): High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite. CIRP Annals 65(1), 45–48.
- Mauser Packaging Solutions (2019): Mauser Infinity Series - Giving plastic packaging materials a new life. <https://www.mauserpackaging.com/en/Products-and-Services/Products/Specialty-Containers-and-Products/Recycled-Materials> (29.10.2020).
- Merz, M. (2019): EU-Kommission verabschiedet harmonisierte Einstufung von Titandioxid. BDI - Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. <https://bdi.eu/artikel/news/vorschlag-rac-zur-harmonisierten-einstufung-von-titandioxid/> (20.01.2021).
- Moesslein (2020): Gespräch am 13.10.2020 mit Moesslein von Polysecure.
- Moser, H., Fabian, M., Jung, M., Heutling, S., Körber, G., Oehme, I., Wurbs, J., Krause, S., Kovacs, D., Krüger, F. & Weiss, V. (2016): Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/170601_uba_pos_kunststoffrecycling_dt_bf.pdf (01.04.2021).
- Mottram, J.T. & Henderson, J. (2018): Fibre-reinforced polymer bridges – guidance for designers. CIRIA, London.
- Naqvi, S.R., Prabhakara, H.M., Bramer, E.A., Dierkes, W., Akkerman, R. & Brem, G. (2018): A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy. Resources, Conservation and Recycling 136, 118–129.
- Nehlsen AG (o. J.): Baustoffrecycling und Gewerbewertstoffsartierung. <https://www.nehlsen.com/recycling-entsorgung/anlagen/recyclinganlagen-baustoffrecycling> (29.09.2020a).
- Nehlsen AG (o. J.): Gewerbewertstoffsartieranlage: Funktionsweise der Anlage. <https://www.nehlsen.com/recycling-entsorgung/anlagen/gewerbewertstoffsartieranlage/funktionsweise-der-anlage> (29.09.2020b).
- neue verpackung (2018): Tana-Chemie setzt auf Flaschen aus HDPE-Rezyklat - neue verpackung. <https://www.neue-verpackung.de/57440/tana-chemie-setzt-auf-flaschen-aus-hdpe-rezyklat/> (29.10.2020).
- Neumann, V. (2019): Neue EU-POP-Verordnung mit Grenzwert für Decabromdiphenylether (DecaBDE). Bergische IHK <https://www.bergische.ihk.de/innovation-und-umwelt/umweltberatung/abfall/neue-eu-pop-verordnung-mit-grenzwert-fuer-decabde-4531006> (20.01.2021).
- Niaounakis, M. (2020): Recycling of Flexible Plastic Packaging. <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128163351> (8.10.2020).
- O A (2004): DSD Sortierhandbuch. https://cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/_15_DSD-Sortierhandbuch_01.pdf (01.04.2021).

öAKR (2018): Mitgliederhöchststand beim öAKR.

http://oeakr.purespace.eu/fileadmin/user_upload/presse_dateien/OEAKR_Presseaussendung_2018-06-05.pdf (29.04.2020).

öAKR (2020): OEAKR - Website. <http://www.oeakr.at/home/> (10.05.2020).

OECD (2014): Creating Incentives for Greener Products.

Oexle & Lammers (2019): Zur Reichweite von Rücknahmesystemen im Rahmen freiwilliger Produktverantwortung. Zeitschrift für das Recht der Abfallwirtschaft 18(4), 223–226.

Osmani, M. & Pappu, A. (2011): Sustainable Composites: Glass Reinforced Plastic Waste Filled Concrete. In: Wiley Encyclopedia of Composites. American Cancer Society, 1–11.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118097298.weoc008> (11.01.2021).

packaging journal (2019): Luftpolsterfolie besteht mindestens zur Hälfte aus Rezyklat. packaging journal <https://packaging-journal.de/storpack-luftpolsterfolie-besteht-zur-haelfte-aus-rezyklat/> (29.10.2020).

PackTheFuture (2016): Gewinner 2015. <http://www.packthefuture.com/de/galerie-2/1396-2/gewinner-2015/> (9.10.2020).

PackTheFuture (2020): Pack The Future Sustainable Plastic Packaging Award 2020.

<http://www.packthefuture.com/de/> (8.10.2020).

Pallman (2007): Kunststoffe Agglomerieren.

https://www.pallmann.eu/fileadmin/user_upload/K_650_DE_Agglomerieren.pdf (01.04.2021).

PCI (2020): Nachhaltigkeitsbericht 2020. <https://www.pci-augsburg.eu/downloads/broschueren/nachhaltigkeit/> (01.04.2021).

Peters (2019): Erfolgreich im Agrarvertrieb - Der Agrarpodcast - Interview Borris Emmel.

<https://radiopublic.com/erfolgreich-im-agrarvertrieb-der-WDMPrv/s1!ae60f> (29.04.2020).

Pfaender, H.G. (1989): Schott Glaslexikon. 4.Auflage, mvv-Verlag München, Landsberg am Lech.

Pfohl, H.-C. (2018): Logistiksysteme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

<http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-56228-4> (16.07.2020).

Plastech (2018): VinyLoop closed PVC recycling project in Italy. <https://www.plastech.biz/en/news/VinyLoop-closed-PVC-recycling-project-in-Italy-12649> (1.12.2020).

Plastic Pallets (2014): Use of plastic pallets in construction industry. <https://plasticpalletsuk.co.uk/blog/plastic-pallets-construction-industry/> (29.10.2020).

Plasticker (2008): Erema: Neue Strapping-Technologie liefert hochfestes PET-Umreifungsband aus PET-Postconsumer-Flakes.

https://plasticker.de/Kunststoff_News_6754_Erema_Neue_Strapping_Technologie_liefert_hochfestes_PET_Umreifungsband_aus_PET_Postconsumer_Flakes?nmax=50&kat=&nmin=21850 (29.10.2020).

Plasticker (2010): Kabelrecycling seit langem bewährt.

https://plasticker.de/Kunststoff_News_10480_AgPU_Kabelrecycling_seit_langem_bewhrt (2.12.2020).

Plasticker (2019): Starlinger: Nachhaltigkeitskonzept für Big-Bags aus Polypropylen-Gewebe im Fokus - Hausmesse in Weissenbach.

https://plasticker.de/Kunststoff_News_35631_Starlinger_Nachhaltigkeitskonzept_fuer_Big_Bags_aus_Polypropylen_Gewebe_im_Fokus_Hausmesse_in_Weissenbach (29.10.2020).

Plasticker (2020): Uzin Utz: Kanister aus 100 Prozent Recyclingmaterial.

https://plasticker.de/Kunststoff_News_37145_Uzin_Utz_Kanister_aus_100_Prozent_Recyclingmaterial (29.10.2020).

Plastics Recyclers Europe (2019): Flexible Polyethylene Recycling in Europe - Accelerating the Transition towards Circular Economy. Brussels. https://743c8380-22c6-4457-9895-11872f2a708a.filesusr.com/ugd/dda42a_5e1c67451b2f49adaa79a00afa045f06.pdf (01.04.2021).

Plastverarbeiter (2020): EPS – ein nachhaltiger Werkstoff? Plastverarbeiter.de <https://www.plastverarbeiter.de/99890/eps-ein-nachhaltiger-werkstoff/> (20.07.2020).

Pöppelmann (o. J.): Geschlossener Materialkreislauf - 100 % recyclingfähiger Pflanztopf, Kunststoffanteil zu 100 % Recyclingkunststoff. <https://www.poeppelmann.com/de/teku/vorteile/ressourcenschonender/> (29.10.2020).

recovery (2018): HERBOLD MECKESHEIM GmbH: Post-consumer-PE-Folien-Recycling in Südafrika. https://www.recovery-worldwide.com/de/artikel/herbold-meckesheim-gmbh-post-consumer-pe-folien-recycling-in-suedafrika_3159050.html (21.10.2020).

Recovery (2020): Kabelrecycling auf dem neuesten Stand. https://www.recovery-worldwide.com/de/artikel/kabelrecycling-auf-dem-neuesten-stand_3506317.html (1.12.2020).

Recycling Magazin (2019): EU-Projekt zum Recycling gebrauchter PVC-Bodenbeläge. RECYCLING magazin <https://www.recyclingmagazin.de/2019/06/18/eu-projekt-zum-recycling-gebrauchter-pvc-bodenbelaege/> (10.07.2020).

RECYCLING magazin (2011): Wandfarbe verpackt in Eimer aus recyceltem Kunststoff. RECYCLING magazin <https://www.recyclingmagazin.de/2011/09/21/wandfarbe-verpackt-in-eimer-aus-recyceltem-kunststoff/> (29.10.2020).

Recyclingportal.eu (2017): 13.000 Quadratmeter alter PVC-Bodenbeläge wiederverwertet. <https://recyclingportal.eu/Archive/31057> (10.05.2020).

REHAU AG (2019): Denken Sie in neuen Dimensionen - RAU-FIPRO X Brochure. <https://www.rehau.com/downloads/164394/broschuere-grenzenlose-perspektiven-rau-fipro-x.pdf> (11.05.2020).

Ressourcenkommission (2019): Substitutionsquote - Ein realistischer Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft! Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Reststofftechnik GmbH (2020): Reststofftechnik | Techniken & Recycling. <https://www.reststofftechnik.at/about> (10.05.2020).

REWE Group (2018): Nachhaltigkeitsbericht nach GRI-Standards. https://rewe-group-nachhaltigkeitsbericht.de/2018/sites/default/files/pdfs/rewe_group-nachhaltigkeitsbericht_nach_gri-standards_2018.pdf (01.04.2021).

Rewindo (2019): kunststofffenster-recycling in zahlen 2018. kunststofffenster-recycling in zahlen 2018. (29.04.2020).

Rewindo (2020a): kunststofffenster-recycling in zahlen 2019. <https://rewindo.de/download/1624/> (15.01.2021).

Rewindo (2020b): Recycler & Annahmestellen. Rewindo <https://rewindo.de/recycler-und-annahmestellen/> (1.12.2020).

Rewindo (2020c): Rewindo - Website. Rewindo <https://rewindo.de/> (10.05.2020).

Ribeiro, M.C.S., Fiúza, A., Dinis, M.L., Castro, A.C.M., Silva, F.G., Meixedo, J.P. & Alvim, M.R. (2011): Experimental study on polyester based concretes filled with glass fibre reinforced plastic recyclates – a contribution to composite materials sustainability.

RIGK (2019): Pressemitteilung - Agrarfoliensammlung ERDE verdoppelt Recyclingerfolg – auch in Zukunft ökologisch und wirtschaftlich attraktiv. [grarfoliensammlung ERDE verdoppelt Recyclingerfolg – auch in Zukunft ökologisch und wirtschaftlich attraktiv](#) (11.05.2020).

RINN (2018): Nachhaltigkeitsbericht 2018. <https://nachhaltigkeitsbericht-2018.rinn.net/umwelt/verpackung.html> (27.10.2020).

Ritthoff, M. (1997): Umweltbelastungspotenzial von Mineralfaserdämmstoffen. Bergische Universität-GH Wuppertal.

Rohde, N. (2014): Brennpunkt: Reach contra Recycling (ein Beispiel aus der Kunststoffindustrie). https://www.baua.de/DE/Angebote/Veranstaltungen/Dokumentationen/Gefahrstoffe/pdf/Vortrag-REACH-2014-08.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (20.01.2021).

RoofCollect (2020): RoofCollect Website. <https://www.roofcollect.com/> (10.05.2020).

Rybicka, J., Tiwari, A. & Leeke, G.A. (2016): Technology readiness level assessment of composites recycling technologies. *Journal of Cleaner Production* 112, 1001–1012.

Rycol Dämmstoffe (2020): Rycol Dämmstoffe - Nachhaltigkeit. <https://www.rycol.de/nachhaltigkeit.html> (1.12.2020).

Schiller, G., Ortlepp, R., Krauß, N., Steger, S., Schütz, H., Fernández, J.A., Reichenbach, J., Wagner, J. & Baumann, J. (2015): Kartierung des Anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Schlummer, M., Mäurer, A., Wagner, S., Berrang, A., Fell, T. & Knappich, F. (2017): Recycling of flame retarded waste polystyrene foams (EPS and XPS) to PS granules free of hexabromocyclododecane (HBCDD). *Advances in Recycling and Waste Management* 2.

Schlummer, M., Vogelsang, J., Fiedler, D., Gruber, L. & Wolz, G. (2015): Rapid identification of polystyrene foam wastes containing hexabromocyclododecane or its alternative polymeric brominated flame retardant by X-ray fluorescence spectroscopy. *Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 33(7), 662–670.

Schmidt, S., Bick, C. & Rubik, F. (2020): Ansätze einer nachhaltigkeitsorientierten Verpackungsoptimierung: Implikationen für Geschäftsmodelle im Einzelhandel. Arbeitsbericht des Forschungsprojekts Innoredux. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin. <https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2020-07/Schmidt%20Bick%20Rubik%20%282020%29%20Ans%C3%A4tze%20einer%20nachhaltigkeitsorientierten%20Verpackungsoptimierung.pdf> (01.04.2021).

Schüler, K. (2020): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2018. Umweltbundesamt, 181.

Schüttgut-Magazin (2015): Wickeln, Schrumpfen oder doch besser Stretchen? Verpackungstechnik im Vergleich. <http://www.schuettgutmagazin.de/schuettgut-magazin-detail/wickeln-schrumpfen-oder-doch-besser-stretchen-verpackungstechnik-im-vergleich.html> (9.10.2020).

Seki, S. & Yoshioka, T. (2017): Recycling of PVC pipes and fittings in Japan: proactive approach of industry to and its impacts on legal/technical frameworks. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 19(1), 21–31.

Simplexity (2019): Holz- oder Kunststoffpalette: Wo liegen die Vor- und Nachteile? <https://simplexity.news/holz-oder-kunststoffpalette-wo-liegen-die-vor-und-nachteile/> (30.10.2020).

Sokoli, H.U., Simonsen, M.E. & Søgaaard, E.G. (2017): Investigation of degradation products produced by recycling the solvent during chemical degradation of fiber-reinforced composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 36(17), 1286–1296.

- Sotayo, A., Green, S. & Turvey, G. (2015): Carpet recycling: A review of recycled carpets for structural composites. *Environmental Technology & Innovation* 3, 97–107.
- Sprengard, C., Tremml, S. & Holm, A. (2014): Technologien und Techniken zu Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe. *Metastudie Wärmedämmstoffe - Produkte - Anwendungen - Innovationen*. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart.
- SSI Schäfer (o. J.): Euro Box Serie LTF 6320, PP, L 600 x B 400 x H 320 mm, 62,7 l, bis 35 kg, 10 Stück + gratis Kunststoff-Rollrahmen günstig kaufen | Schäfer Shop. <https://www.schaefer-shop.de/p/kasten-euro-mass-ltf-6320-inhalt-62-7-l-ohne-deckel-10-stueck-gratis-rollrahmen?selectedItem=150977> (30.10.2020).
- Destatis (2019): Umwelt - Abfallentsorgung 2017.
- Destatis (2020): Fachserie 19 Reihe 1. Umweltschutz. Abfallentsorgung, Juni 2019. https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-19.html sowie https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202 (2.02.2020).
- Destatis & Genesis-Online (2020a): Aus- und Einfuhr (Außenhandel): Deutschland, Jahre, Warensystematik, Abruf-Code: 51000-0005. https://www-genesis.destatis.de/genesis//online/data?operation=table&code=51000_0005&levelindex=1&levelid=1581521872100 (15.01.2020).
- Destatis & Genesis-Online (2020b): Produktionswert, -menge, -gewicht und Unternehmen der Vierteljährlichen Produktionserhebung: Deutschland, Jahre, Güterverzeichnis (9-Steller), Abruf-Code: 42131-0003. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data?operation=find&suchanweisung_language=de&query=42131 (15.01.2020).
- Strubl (o. J.): Beutel aus Recyclingmaterial - STRUBL GmbH & Co. KG Kunststoffverpackungen. <https://www.strubl.de/Beutel-Regenerat-Recyclingmaterial-Post-Consumer-PCR-Kunststoffverpackung.html> (29.10.2020).
- Systalen (2018): Deutscher Verpackungspreis 2018 für COMPO-Verpackung aus Recyclingkunststoff. <https://www.systalen.de/de/aktuelles/artikel/details/deutscher-verpackungspreis-2018-fuer-compo-verpackung-aus-recyclingkunststoff.html> (28.10.2020).
- Tarkett (2019): 2018 Corporate Social and Environmental Responsibility Report. https://media.tarkett-image.com/docs/WP_DE_2018_Corporate_Social_and_Environmental_CSR_Report.pdf (11.05.2020).
- The European Council of Vinyl Manufacturers, The European Council for Plasticisers and Intermediates, The European Stabilisers Producers Associations, & European Plastics Converters (2001): Vinyl 2010 – Freiwillige Selbstverpflichtung der PVC-Industrie. https://vinylplus.eu/uploads/Modules/Documents/Executive_Summary/Voluntary%20commitment%20of%20the%20PVC%20industry/vc2001_de.pdf (01.04.2021).
- Thierry, M., Salomon, M., van Nunen, J. & van Wassenhove, L. (1995): Strategic Issues in Product Recovery Management. *California Management Review* 37(2), 114–135.
- Thomason, J.L., Nagel, U., Yang, L. & Sáez, E. (2016): Regenerating the strength of thermally recycled glass fibres using hot sodium hydroxide. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 87, 220–227.
- Trioplast (2019): Agricultural films.
- Trioplast (2021): Trioloop - Produkte. <https://www.trioplast.com/de/ober-trioplast/nachhaltigkeit-innovation/trioloop/> (19.01.2021).
- Turner, R.P., Kelly, C.A., Fox, R. & Hopkins, B. (2018): Re-Formative Polymer Composites from Plastic Waste: Novel Infrastructural Product Application. *Recycling* 3(4), 54.

Umweltbundesamt (2014): Best Practice Municipal Waste Management.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/stoffstrom_altreifen_tyr.pdf (01.04.2021).

Umweltbundesamt (2016): Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes.

Uzin (o. J.): Mit Kanistern aus 100 % Recyclingmaterial umweltbewusst in die Zukunft.

<https://www.uzin.de/detail/news/1587592800-mit-kanistern-aus-100-recyclingmaterial-umweltbewusst-in-die-zukunft/> (9.06.2020).

Venti Oelde (o. J.): Windsichten mit statischen Separatoren. <https://www.venti-oelde.de/infobox/presse/windsichten-mit-statischen-separatoren> (2.12.2020).

Verein Deutscher Zementwerke (2003): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2002. Düsseldorf.

<https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/umweltdaten-der-deutschen-zementindustrie-2002> (01.04.2021) .

Verein Deutscher Zementwerke (2020): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2019. Düsseldorf.

https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/umweltschutz/Umweltdaten/VDZ_Umweltdaten_Environmental_Data_2019.pdf (01.04.2021).

Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission.

Verordnung (EU) 2019/1021 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 über persistente organische Schadstoffe (Neufassung). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1021&from=DE> (20.01.2021)b).

Verordnung (EU) Nr. 494/2011 der Kommission vom 20. Mai 2011 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) hinsichtlich Anhang XVII (Cadmium). <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:134:0002:0005:de:PDF> (20.01.2021)c).

VinylPlus (2019): Progress Report 2019 - Reporting on 2018 activities. <https://www.eswa.be/pdf/vinylplus-progress-report-2019.pdf> (11.05.2020).

VinylPlus (2015): PVC-Recycling-Technologien. Brüssel. https://vinylplus.eu/uploads/2015-12-08_Recycling-Technologies-German.pdf (20.01.2021).

Wallau (2000): Systematisierung von Finanzierungsmodellen für eine kostenlaose Rücknahme von Altprodukten. <https://www.muellundabfall.de/MUA.02.2000.089> (01.04.2021).

Waste and Resources Action Programme (o. J.): Reusable packaging in construction - The benefits of reusable packaging options for construction product suppliers.

<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/RTP%20briefing%20note%20for%20suppliers%20-%20Final.pdf> (29.10.2020).

Wecobis Ökologisches Baustoffinformationssystem (2018): Bodenbeläge. Produktgruppeninformation.

<https://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/bodenbelaege.html> (22.01.2020).

Weiland & Urban (2014): Effizienzverbesserung der Kreislaufwirtschaft durch Einsatz von Pfandsystemen.

<https://www.muellundabfall.de/MA.02.2014.056> (01.04.2021).

Wendehorst, R. (1992): Baustoffkunde. 23. Auflage, Curt R. Vincentz Verlag, Hannover.

Wenzel (2015): Zur freiwilligen Rücknahme im Rahmen der abfallrechtlichen Produktverantwortung. Zeitschrift für das Recht der Abfallwirtschaft 14(4), 187–192.

Williams, P.T., Cunliffe, A. & Jones, N. (2005): Recovery of value-added products from the pyrolytic recycling of glass-fibre-reinforced composite plastic waste. Journal of the Energy Institute 78(2), 51–61.

Winkler, C. (2020): SKZ Experteninterview.

Witek (2015): Return Management for Remanufacturing. DOI 10.1007/978-3-319-13177-1_6 .

Witten, E. & Mathes, V. (2019): Der Markt für Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) 2019. Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen. Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, Frankfurt am Main.

Wood, G. & Sturges, M. (2010): Single Trip or Reusable Packaging - Considering the Right Choice for the Environment. Waste and Resources Action Programme.

<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/FINAL%20Reusable%20Packaging%20Factors%20Report.pdf> (09.10.2020) .

Wurbs, J., Beer, I., Bolland, T., Debiak, M., Dettling, F., Koch-Jugl, J., Tietjen, L., Walther, M., Wuttke, J., Stolzenberg, H.-C., Rauert, C. & Apel, P. (2017): Hexabromcyclododecan (HBCD) – Antworten auf häufig gestellte Fragen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/faq_hbcd_de_17.pdf (20.01.2021).

Yang, P., Zhou, Q., Li, X.-Y., Yang, K.-K. & Wang, Y.-Z. (2014): Chemical recycling of fiber-reinforced epoxy resin using a polyethylene glycol/NaOH system. Journal of Reinforced Plastics and Composites 33(22), 2106–2114.

Yarahmadi, N., Jakubowicz, I. & Martinsson, L. (2003): PVC floorings as post-consumer products for mechanical recycling and energy recovery. Polymer Degradation and Stability 79(3), 439–448.

Zentrale Stelle Verpackungsregister (2020a): Katalog systembeteiligungspflichtiger Verpackungen. Zentrale Stelle Verpackungsregister.

Zentrale Stelle Verpackungsregister (2019): Methodik zur Erarbeitung des Katalogs systembeteiligungspflichtiger Verpackungen.

Zentrale Stelle Verpackungsregister (2020b): Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG - im Einvernehmen mit dem Umweltbundesamt. /stiftung-behoerde/mindeststandard-21-verpackg?utm_campaign=OpenGraph (16.07.2020).

A Anhang – Produktliste

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	Kunststoffsorte	Bautechnische Normen
Rohre	Rohre und Schächte	Rohrleitungssysteme (nicht biegsam)	Rohrleitungssysteme (nicht biegsam) aus Hart-Polyvinylchlorid	PVC-U	DIN EN 1329; DIN EN 1401; DIN EN 13598; DIN EN 1453; DIN EN 13476
			Rohrleitungssysteme (nicht biegsam) aus Polypropylen	PP	DIN EN 1451; DIN EN 13598; DIN EN 13476
			Rohrleitungssysteme (nicht biegsam) aus Acrylnitril-Butadienstyrol	ABS	DIN EN 1455
			Rohrleitungssysteme (nicht biegsam) aus Styrol-Copolymer-Blends	SAN, PVC	DIN EN 1565
			Rohrleitungssysteme (nicht biegsam) aus chloriertem Polyvinylchlorid	PVC-C	DIN EN 1566
			Rohrleitungssysteme (nicht biegsam) aus Polypropylen mit mineralischen Additiven	PP-MD	DIN EN 14758
			Rohrleitungssysteme (nicht biegsam) aus Polyethylen	PE	DIN EN 13478; DIN EN 12666; DIN EN 13598; DIN EN 13476
			Rohrleitungssysteme (nicht biegsam) aus HD-Polyethylen	PE-HD	DIN EN 12666; DIN EN 1519
			Rohrleitungssysteme (nicht biegsam) aus glasfaserverstärktem Polyesterharz	UP-GFK	DIN EN 14364; DIN EN 15383
			Rohrleitungssysteme (nicht biegsam) aus Polyesterharz	UP	DIN EN 14636; DIN EN 15383
		Rohrleitungssysteme (biegsam)	Rohrleitungssysteme (biegsam) aus Polyvinylidenfluorid	PVDF	k.A.
			Rohrleitungssysteme (biegsam) aus Polyethylen	PE	
			Rohrleitungssysteme (biegsam) aus HD-Polyethylen	PE-HD	
			Rohrleitungssysteme (biegsam) aus Weich-Polyvinylchlorid	PVC-P	
			Rohrleitungssysteme (biegsam) aus Polypropylen	PP	
			Rohrleitungssysteme (biegsam) aus Polyurethan	PUR	

			Rohrleitungssysteme (biegsam) aus Polybuten	PB	
			Rohrleitungssysteme (biegsam) aus Polyamid	PA	
			Rohrleitungssysteme (biegsam) aus vernetztem Polyethylen	PE-Xa	
		Schächte	Einstieg-/Kontrollschächte aus glasfaserverstärktem Polyesterharz	UP-GFK	DIN EN 15383
			Einstieg-/Kontrollschächte aus Polyesterharz	UP	DIN EN 14636
			Einstieg-/Kontrollschächte aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid	PVC-U	DIN EN 13598
			Einstieg-/Kontrollschächte aus Polypropylen	PP	
			Einstieg-/Kontrollschächte aus Polyethylen	PE	
			Kabelschächte aus Polycarbonat	PC	k.A.

Dämmung/Isolierung	Dämmstoffe	Wärmedämmung	Wärmedämmstoffe aus expandiertem Polystyrol	EPS	DIN EN 13163; DIN EN 14309; DIN EN 14933
			Wärmedämmstoffe aus extrudiertem Polystyrol	XPS	DIN EN 13164; DIN EN 14934; DIN EN 14307
			Wärmedämmstoffe aus Polyurethan	PUR	DIN EN 13165; DIN EN 14315; DIN EN 14318; DIN EN 14319; DIN EN 14320; DIN EN 14308
			Wärmedämmstoffe aus Phenolharz-Hartschaum	PF	DIN EN 13166; DIN EN 14313
			Wärmedämmstoffe aus flexiblem Elastomerschaum	FEF	DIN EN 14304
			Wärmedämmstoffe aus Polyethylen-Schaum	PEF	DIN EN 14313
			Sandwich-Elemente zur Wärmedämmung	EPS	DIN EN 14509
			Sandwich-Elemente zur Wärmedämmung	XPS	DIN EN 14509

			Sandwich-Elemente zur Wärmedämmung	PUR	DIN EN 14509
			Sandwich-Elemente zur Wärmedämmung	PF	DIN EN 14509
			Schaumkunststoffe (Spritz-/Ortschäume) aus Polyurethan	PUR	DIN 18159
			Schaumkunststoffe (Spritz-/Ortschäume) auf Harnstoff-Formaldehyd-Basis	UF	DIN 18159
		Schalldämmung	Trittschalldämmung aus Polyethylen-Schaumfolie	PE	k.A.
			Trittschalldämmung aus expandiertem Polystyrol	EPS	
			Trittschalldämmung aus extrudiertem Polystyrol	XPS	

Profile	Fenster und Türen	Fenster	Fensterprofile aus Polyurethan	PUR	DIN EN 14351; DIN EN 16034; DIN 18056
			Fensterprofile aus Polyvinylchlorid	PVC	
			Fensterprofile aus Polyamid	PA	
			Fensterprofile aus glasfaserverstärktem Kunststoff	GFK	
		Türen	Türen aus Polyvinylchlorid	PVC	DIN EN 16034; DIN EN 14351
			Türen aus glasfaserverstärktem Kunststoff	GFK	
	Rollläden		Rollläden aus Polyvinylchlorid	PVC	RollladKästRL 2016-07
	Sonstige Profile	Bauprofile (Trockenbauprofile, Handläufe, Sockelleisten, etc.)	Bauprofile aus Hart-Polyvinylchlorid	PVC-U	k.A.
			Bauprofile aus Weich-Polyvinylchlorid	PVC-P	
			Bauprofile aus glasfaserverstärktem Kunststoff	GFK	
			Bauprofile aus Polypropylen und Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	PP, EPDM	
			Bauprofile aus Polypropylen	PP	
			Bauprofile aus Polyethylen	PE	

Sonstiges	Abdichtungsmaterial	Bitumenbahnen/-schindeln	Bitumenbahn mit Trägereinlage aus Polyestervlies	Bitumen, Polyester	DIN SPEC 20000-201 bis -203; DIN EN 13707; DIN 52129; DIN EN 534; DIN EN 544; DIN EN 13970; DIN EN 14695; DIN EN 14967
			Bitumenbahn mit Trägereinlage aus Glasgewebe	Bitumen	
			Bitumenbahn mit Trägereinlage aus Glasvlies	Bitumen	
			Bitumenbahn mit Kombinationsträgereinlage mit überwiegendem Glasanteil	Bitumen, Polyester	
			Bitumenbahn mit Kombinationsträgereinlage mit überwiegendem Polyesteranteil	Bitumen, Polyester	
			Bitumenbahn mit Trägereinlage aus einem Metall-Kunststoff-Verbund	Bitumen, Polyester	
		Polymerbitumenbahnen/-schindeln	Elastomerbitumenbahn mit Trägereinlage aus Polyestervlies	Elastomerbitumen, Polyester	
			Elastomerbitumenbahn mit Trägereinlage aus Glasgewebe	Elastomerbitumen	
			Elastomerbitumenbahn mit Trägereinlage aus Glasvlies	Elastomerbitumen	
			Elastomerbitumenbahn mit Kombinationsträgereinlage mit überwiegendem Glasanteil	Elastomerbitumen, Polyester	
			Elastomerbitumenbahn mit Kombinationsträgereinlage mit überwiegendem Polyesteranteil	Elastomerbitumen, Polyester	
			Elastomerbitumenbahn mit Trägereinlage aus einem Metall-Kunststoff-Verbund	Elastomerbitumen, Polyester	

Sonstiges	Abdichtungsmaterial	Polymerbitumenbahnen/-schindeln	Elastomerbitumenbahn mit Trägereinlage aus Polyestervlies	Elastomerbitumen, Polyester	DIN SPEC 20000-201 bis -203; DIN EN 13707; DIN 52129; DIN EN 534; DIN EN 544; DIN EN 13970; DIN EN 14695; DIN EN 14967
			Plastomerbitumenbahn mit Trägereinlage aus Glasgewebe	Plastomerbitumen	
			Plastomerbitumenbahn mit Trägereinlage aus Glasvlies	Plastomerbitumen	
			Plastomerbitumenbahn mit Kombinationsträgereinlage mit überwiegendem Glasanteil	Plastomerbitumen, Polyester	
			Plastomerbitumenbahn mit Kombinationsträgereinlage mit überwiegendem Polyesteranteil	Plastomerbitumen, Polyester	
			Plastomerbitumenbahn mit Trägereinlage aus einem Metall-Kunststoff-Verbund	Plastomerbitumen, Polyester	
			Kombination Elastomer-/Plastomerbitumenbahn mit Trägereinlage aus Polyestervlies	Elastomerbitumen, Plastomerbitumen, Polyester	
			Kombination Elastomer-/Plastomerbitumenbahn mit Trägereinlage aus Glasgewebe	Elastomerbitumen, Plastomerbitumen	
			Kombination Elastomer-/Plastomerbitumenbahn mit Trägereinlage aus Glasvlies	Elastomerbitumen, Plastomerbitumen	
			Kombination Elastomer-/Plastomerbitumenbahn mit Kombinationsträgereinlage mit überwiegendem Glasanteil	Elastomerbitumen, Plastomerbitumen, Polyester	
			Kombination Elastomer-/Plastomerbitumenbahn mit Kombinationsträgereinlage mit überwiegendem Polyesteranteil	Elastomerbitumen, Plastomerbitumen, Polyester	
			Kombination Elastomer-/Plastomerbitumenbahn mit Trägereinlage aus einem Metall-Kunststoff-Verbund	Elastomerbitumen, Plastomerbitumen, Polyester	

Sonstiges	Abdichtungsmaterial	Kunststoff-/Elastomerbahnen	Kunststoffbahn aus Ethylen-Copolymerisat-Bitumen	ECB	DIN SPEC 20000-201 bis -202; DIN EN 13967; DIN EN 13859; DIN EN 13956; DIN EN 13984; DIN EN 14909
			Kunststoffbahn aus Ethylen-Vinylacetat-Copolymer	EVAC	
			Kunststoffbahn aus Polyethylen	PE	
			Kunststoffbahn aus Polypropylen	PP	
			Kunststoffbahn aus Polyisobuten	PIB	
			Kunststoffbahn aus Polyvinylchlorid	PVC	
			Kunststoffbahn aus thermoplastischem Elastomer	TPE	
			Kunststoffbahn aus Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer	EPDM	
			Kunststoffbahn (mit Glasvlieseinlage, Verstärkung oder Kaschierung) aus Ethylencopolymerisat-Bitumen	ECB	
			Kunststoffbahn (mit Glasvlieseinlage, Verstärkung oder Kaschierung) aus Ethylen-Vinyl-Terpolymer/-Copolymer	EVAC	
			Kunststoffbahn (mit Glasvlieseinlage, Verstärkung oder Kaschierung) aus Polyethylen	PE	
			Kunststoffbahn (mit Glasvlieseinlage, Verstärkung oder Kaschierung) aus Polypropylen	PP	
			Kunststoffbahn (mit Glasvlieseinlage, Verstärkung oder Kaschierung) aus Polyisobuten	PIB	
			Kunststoffbahn (mit Glasvlieseinlage, Verstärkung oder Kaschierung) aus Polyvinylchlorid	PVC	
			Kunststoffbahn (mit Glasvlieseinlage, Verstärkung oder Kaschierung) aus thermoplastischem Elastomer	TPE	
			Kunststoffbahn (mit Glasvlieseinlage, Verstärkung oder Kaschierung) aus Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer	EPDM	

Sonstiges	Abdichtungsmaterial	Geosynthetische Dichtungsbahnen	Geosynthetische Kunststoffbahn aus HD-Polyethylen	PE-HD	DIN EN 15382; DIN EN 13361; DIN EN 13362; DIN EN 13491 bis 13493; DIN EN 13249; DIN EN 13250 bis 13257; DIN EN 13265
			Geosynthetische Kunststoffbahn aus LLD-Polyethylen	PE-LLD	
			Geosynthetische Kunststoffbahn aus VLD-Polyethylen	PE-VLD	
			Geosynthetische Kunststoffbahn aus weichmacherhaltigem PVC	PVC-P	
			Geosynthetische Tondichtungsbahn aus Polyethylen mit Bentonitkomponente	PE	
			Geosynthetische Tondichtungsbahn aus Polypropylen mit Bentonitkomponente	PP	
		Flüssigkunststoff-Abdichtungen	Flüssigkunststoff-Abdichtungen aus Polymethylmethacrylat	PMMA	bedarf lediglich allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfungszeugnis nach §19 Abs. 1 Satz 2 MBO
			Flüssigkunststoff-Abdichtungen aus ungesättigten Polyesterharzen	UP	
			Flüssigkunststoff-Abdichtungen aus Polyurethan	PUR	
		Elastomer-Dichtungen	Elastomer-Rohrleitungsdichtungen aus Acrylnitril-Butadien-Kautschuk	NBR	DIN EN 681; DIN EN 682
			Elastomer-Rohrleitungsdichtungen aus Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	EPDM	
			Elastomer-Rohrleitungsdichtungen aus Chloropren-Kautschuk	CR	
			Elastomer-Rohrleitungsdichtungen aus Chlorsulfoniertes Polyethylen	CSM	
			Elastomer-Rohrleitungsdichtungen aus Fluorkautschuk	FKM	
			Elastomer-Rohrleitungsdichtungen aus Silikon-Kautschuk	VQM	

Sonstiges	Bodenbeläge	Sportböden	Sportböden (Indoor) aus Polyurethan	PUR	DIN EN 14904
			Sportböden (Indoor) aus Polyvinylchlorid	PVC	
			Sportböden (Outdoor) aus Polyurethan und Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	PUR, EPDM	
			Sportböden (Outdoor) aus Polypropylen (Einstreuungen aus EPDM-/SBR-Granulat möglich)	PP, EPDM	
			Sportböden (Outdoor) aus Polyethylen (Einstreuungen aus EPDM-/SBR-Granulat möglich)	PE, EPDM	
			Sportböden (Outdoor) aus Polyamid (Einstreuungen aus EPDM-/SBR-Granulat möglich)	PA, EPDM	
		Elastomer-Bodenbeläge	Bodenbelag aus Styrol-Butadien-Kautschuk und Acrylnitril-Butadien-Kautschuk	SBR, NBR	DIN EN 14041
		Industrie-Bodenbeläge	Bodenbelag aus Epoxidharz	EP	
		PVC-Bodenbeläge	Heterogener Bodenbelag aus Polyvinylchlorid	PVC	DIN EN ISO 10581; DIN EN 650; DIN EN 651; DIN EN 652; DIN EN ISO 26986; DIN EN ISO 10595
			Homogener Bodenbelag aus Polyvinylchlorid	PVC	
		Textil-Bodenbeläge	Textiler Bodenbelag aus Polyamid	PA	DIN EN 14041
			Textiler Bodenbelag aus Polypropylen	PP	
			Textiler Bodenbelag aus Polyethylenterephthalat	PET	
			Textiler Bodenbelag aus einem Verbund aus Polyamid, Polypropylen und/oder Polyethylenterephthalat	PA, PP, PET	

Sonstiges	Elektroinstallation/-material	Kabel, Leitungen	Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus Polyvinylchlorid	PVC	DIN EN 50575
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus LD-Polyethylen	PE-LD	
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus HD-Polyethylen	PE-HD	
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus Polyurethan (PUR)	PUR	
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus Polyamid	PA	
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus Polytetrafluorethylen	PTFE	
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus Fluorethylenpropylen	FEP	
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus Ethylentetrafluorethylen	ETFE	
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus Perfluoralalkoxy	PFA	
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus Chloropren-Kautschuk	CR	
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus Silikonkautschuk	SI	
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus Ethylenvinylacetat	EVA	
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	EPDM	
			Kabel-Isolierung/-Ummantelung aus thermoplastischem Elastomer	TPE	
		Steckdosen, Schalter	Steckdosen, Schalter aus Polycarbonat	PC	bedarf keinem Verwendbarkeitsnachweis gemäß § 17 Abs. 3 MBO
			Steckdosen, Schalter aus Polyesterharz	UP	

		Ortsfeste Anlagen	Brandmeldeanlagen aus Polycarbonat	PC	DIN EN 54
			Rauchwarnmelder aus Polycarbonat	PC	DIN EN 14604; DIN EN 54-7
			Anlagen zur Verkehrssteuerung aus Polycarbonat	PC	DIN EN 12352

Sonstiges	Ortsfeste Behälter/Tanks	Behälter	Trinkwasserspeicher aus Polyethylen	PE	k.A.
			Trinkwasserspeicher aus Polypropylen	PP	
			Sonstige Vorrats-/Lagerbehälter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen	GFK	
		Tanks	Ortsfeste Tanks aus Polyethylen	PE	DIN EN 13341
			Ortsfeste Tanks aus Polyamid	PA	
			Ortsfeste Tanks aus glasfaserverstärkten Kunststoffen	GFK	
	Folien, Vliese und Gewebe (für andere Zwecke als zur Bauwerksabdichtung)	Folien	Folien aus Polyethylen	PE	k.A.
			Folien aus LD-Polyethylen	PE-LD	
			Folien aus HD-Polyethylen	PE-HD	
			Folien aus Ethylen-Vinylacetat-Copolymere	EVA	
			Folien aus Polyethylen und Ethylen-Vinylacetat-Copolymere	PE, EVA	
			Folien aus Polyvinylacetat	PVC	
			Folien aus Polyamid	PA	
		Vliese	Vliese aus Polypropylen	PP	
			Vliese aus Polyester	PES	
			Vliese aus Polyester mit Polyurethan-Beschichtung	PES, PU	
		Netze	Netze aus Polyethylen	PE	
			Netze aus HD-Polyethylen	PE-HD	
			Netze aus Polyamid	PA	
			Netze aus Polypropylen	PP	
	Sanitärausstattung	Spülkästen	Spülkästen aus Polyvinylchlorid	PVC	DIN EN 14055
			Spülkästen aus Polystyrol	PS	
			Spülkästen aus Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere	ABS	

		Bade-/Duschwannen	Badewannen aus Polymethylmethacrylat	PMMA	DIN EN 14516; DIN EN 12764
			Duschwannen aus Polymethylmethacrylat	PMMA	DIN EN 14527; DIN EN 12764
		Sonstiges (Sanitärausstattung)	Geruchsverschlüsse aus Polyethylen	PE	DIN 19541; DIN EN 997
			Geruchsverschlüsse aus Polypropylen	PP	
			Abläufe aus Polypropylen	PP	DIN EN 1253
			Abläufe aus Polyethylen	PE	
			Abläufe aus Hart-Polyvinylchlorid	PVC-U	
			WC-Anschlussstücke aus HD-Polyethylen	PE-HD	DIN 1389
			WC-Anschlussstücke aus Polypropylen	PP	
			Toilettendeckel aus Polyesterharz	UF	k.A.
			Toilettendeckel aus Polypropylen	PP	

Sonstiges	Platten und Tafeln	Platten (ausgenommen Dämmplatten)	Kunststoffplatten aus Polyvinylchlorid	PVC	DIN EN 1013; DIN EN 13830; DIN EN 14428
			Kunststoffplatten aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid	PVC-U	
			Kunststoffplatten aus Polycarbonat	PC	
			Kunststoffplatten aus Polymethylmethacrylat	PMMA	
			Kunststoffplatten aus glasfaserverstärkten Kunststoffen	GFK	
	Andere Produkte des Garten- und Landschaftsbaus	Zaun-anlagen	Gartenzäune aus Polyvinylchlorid	PVC	k.A.
		Gestaltungs-objekte	Bänke, Tische aus Polyolefinmischeungen	PP, PE	k.A.
			Bänke, Tische aus Polyolefinmischeungen	PP, PE	
	Andere Produkte des Straßenbaus	Blend-/Lärmschutzsysteme	Blendschutzsysteme für Straßen aus HD-Polyethylen	PE-HD	DIN EN 12676
			Lärmschutzanlagen an Straßen aus Polypropylen und Polyethylen	PP, PE	DIN EN 14388
		Leitsysteme	Leitkegel aus Weich-Polyvinylchlorid	PVC-P	k.A.
			Leitkegel aus Polyethylen	PE	
			Leitpfosten aus HD-Polyethylen	PE-HD	
			Leitkegel aus Polypropylen	PP	
		Lichtmaste	Lichtmaste aus faserverstärktem Polymerverbundstoff	GFK	DIN EN 40-7

		Asphaltarmierung	Asphaltarmierungsgitter aus Polypropylen	PP	k.A.
Sonstiges	Sonstige Bauprodukte	Dübel, Verschraubungen	Kunststoffdübel aus Polyamid	PA	ETAG 020
			Kunststoffdübel aus Polypropylen	PP	
			Kunststoffdübel aus Polyethylen	PE	
			Verschraubungen aus Polyvinylchlorid	PVC	Liste hEN, Referenznummer 180022-00-0704
			Verschraubungen aus Polyamid	PA	
			Verschraubungen aus Polypropylen	PP	
		Fugenbänder	Fugenbänder aus Styrol-Butadien-Kautschuk	SBR	DIN 7865
			Fugenbänder aus Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	EPDM	
			Fugenbänder aus Chloropren-Kautschuk	CR	
			Fugenbänder aus Polyvinylchlorid und Acrylnitril-Butadien-Kautschuk	PVC, NBR	DIN 18541
			Fugenbänder aus weichmacherhaltigem Polyvinylchlorid	PVC-P	
			Fugenbänder aus Polyethylen	PE	
		Gitter- roste	Kunststoff-Gitterroste aus glasfaserverstärktem Polyesterharz	UP-GFK	DIN 24537-3
		Drainagen	Drainagematten/-gitter aus Polyvinylchlorid	PVC	k.A.
			Drainagematten/-gitter aus Polypropylen	PP	
			Drainagematten/-gitter aus HD-Polyethylen	PE-HD	
			Drainagematten/-gitter aus HD-Polyethylen und Polypropylen	PE-HD, PP	
		Entwässer	Entwässerungsrinnen aus Polyvinylchlorid	PVC	k.A.

Sonstiges			Entwässerungsrinnen aus Polypropylen	PP	
			Entwässerungsrinnen aus HD-Polyethylen	PE-HD	
			Entwässerungsrinnen aus glasfaserverstärktem Kunststoff	GFK	
		Lager, Zylinder, Spulen	Lager aus Polytetrafluorethylen	PTFE	Liste hEN, Referenznummer 050013-00-0301
		Beschlüge	Beschläge aus Polyamid	PA	DIN EN 14846; DIN EN 179; DIN EN 1125; DIN EN 1154; DIN EN 1155; DIN EN 1158
			Beschläge aus faserverstärkten Kunststoffen	GFK	
	Sonstige Bauprodukte	Lichtkuppeln	Lichtkuppeln aus glasfaserverstärktem Polyesterharz	UP-GFK	DIN EN 1873
			Lichtkuppeln aus Polyvinylchlorid	PVC	
			Lichtkuppeln aus Polymethylmethacrylat	PMMA	
			Lichtkuppeln aus Polycarbonat	PC	
			Lichtkuppeln aus Styrol-Acrylnitril-Copolymer	SAN	
			Lichtkuppeln aus Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere	ABS	
			Lichtkuppeln aus glykolmodifiziertem Polyethylenterephthalat	PETG	
		Dachlichtbänder	Dachlichtband aus glasfaserverstärktem Polyesterharz	UP-GFK	DIN EN 14963
			Dachlichtband aus Polyvinylchlorid	PVC	
			Dachlichtband aus Polycarbonat	PC	
			Dachlichtband aus Polymethylmethacrylat	PMMA	
			Dachlichtband aus glykolmodifiziertem Polyethylenterephthalat	PETG	
			Dachlichtband aus Styrol-Acrylnitril-Copolymer	SAN	

			Dachlichtband aus Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere	ABS	
		Aufsatzkränze	Aufsatzkranz (z. B. für Lichtkuppel, Lichtband) aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GFK)	UP-GFK	DIN EN 1873; DIN EN 14963
			Aufsatzkranz (z. B. für Lichtkuppel, Lichtband) aus Polyvinylchlorid	PVC	

Thermoplaste
Duroplaste
Elastomere
Bitumen
Verbund

B Liste der relevanten Regularien

Im Folgenden sind die in diesem Bericht zitierten Gesetze und Verordnungen aufgelistet

- ▶ Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission
- ▶ Verordnung (EG) Nr. 282/2008 der Kommission vom 27. März 2008 über Materialien und Gegenstände aus recyceltem Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 2023/2006
- ▶ Verordnung (EU) Nr.10/2011 der Kommission vom 14.Januar 2011 über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen
- ▶ Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates
- ▶ Verordnung (EU) Nr. 494/2011 der Kommission vom 20. Mai 2011 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) hinsichtlich Anhang XVII (Cadmium)
- ▶ Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten
- ▶ Verordnung (EU) 2019/1021 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 über persistente organische Schadstoffe (Neufassung)
- ▶ Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektroaltgeräten
- ▶ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen
- ▶ Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen
- ▶ Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis
- ▶ Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen

- ▶ Landesbauordnungen: Landesbauordnung für Baden-Württemberg , Bayerische Bauordnung, Bauordnung für Berlin, Brandenburgische Bauordnung, Bremische Landesbauordnung, Hamburgische Bauordnung, Hessische Bauordnung, Landesbauordnung Mecklenburg-Vorpommern, Niedersächsische Bauordnung, Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen – Landesbauordnung, Landesbauordnung Rheinland-Pfalz, Landesbauordnung, Sächsische Bauordnung, Bauordnung des Landes Sachsen-Anhalt, Landesbauordnung für das Land Schleswig-Holstein, Thüringer Bauordnung
- ▶ TRGS 905, Technische Regeln für Gefahrstoffe - Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe
- ▶ Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen