

Forschungskennzahl UM19 34 5080

Sachstand über die Schadstoffe in Kunststoffen und ihre Auswirkungen auf die Entsorgung

Schlussbericht

von

Dr. Alexandra Polcher, Ramboll Deutschland GmbH

Alexander Potrykus, Ramboll Deutschland GmbH

Dr. Miriam Schöpel, Ramboll Deutschland GmbH

Jakob Weißenbacher, Ramboll Deutschland GmbH

Ferdinand Zotz, Ramboll Deutschland GmbH

Im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Impressum

Herausgeber

BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Robert-Schuman-Platz 3
53175 Bonn
E-Mail: buengerinfo@bmu.bund.de
Internet: www.bmu.de

Durchführung der Studie:

Ramboll Deutschland GmbH
Werinherstr. 79
81541 München

Abschlussdatum:

April 2020

Redaktion:

BMU
Referat WR II 8
Schadstoffe, mineralische Abfälle, Deponierung
Dr. Michael Siemann

Publikationen:

<https://www.bmu.de/service/publikationen>

ISSN 1862-4804

Bonn, April 2020

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

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Glossar.....	14
Zusammenfassung.....	16
1 Projekthintergrund.....	22
2 Zielsetzung des Vorhabens.....	25
3 Herangehensweise.....	26
3.1 Identifizierung von Schadstoffen in Kunststoffen.....	26
3.2 Auswahl relevanter Kunststoffpolymere.....	26
3.3 Identifizierung relevanter Erzeugnisse und darin enthaltener Schadstoffe.....	27
3.4 Abfallströme und deren Entsorgungswege.....	27
3.5 Abschätzung der Risiken für Mensch und Umwelt.....	27
3.6 Identifizierung geeigneter Entsorgungswege.....	28
4 Identifizierung und Priorisierung von Kunststoffadditiven.....	29
4.1 Quellen.....	29
4.1.1 Datenbanken.....	29
4.1.1.1 Die „Mapping exercise – Plastic additives initiative“ der ECHA.....	29
4.1.1.2 Informationsplattform der europäischen Kunststoffindustrie.....	30
4.1.2 Literatur von nationalen Umweltbehörden.....	30
4.1.3 Wissenschaftliche Literatur und Bücher.....	32
4.2 Auswertung der Daten.....	33
4.2.1 Extraktion der Daten aus den verschiedenen Quellen.....	33
4.2.2 Auswertung der Daten und weitere Recherche im Hinblick auf die Priorisierung.....	35
4.2.2.1 Einstufung nach der CLP-Verordnung.....	35
4.2.2.2 Nennung im REACH Anhang XVII.....	36
4.2.2.3 Nennung als besonders besorgniserregende Substanz (SVHC).....	38
4.2.2.4 Nennung auf der CoRAP-Liste.....	45
4.2.2.5 Nennung als POP.....	48
4.2.2.6 Nennung auf der SIN-Liste.....	50
4.2.2.7 Nennung auf der PMT-Liste des UBA.....	53
4.2.3 Gesamtbetrachtung prioritäre Stoffe & Priorisierung anhand CMR und Listung.....	55

4.3	Als relevant identifizierte Stoffe bezüglich Mengen und Relevanz der Polymere in wichtigen Recyclingprozessen	79
4.3.1	PVC.....	79
4.3.2	PE	87
4.3.3	PP	91
4.3.4	PS.....	94
4.3.5	EPS/XPS	96
4.3.6	ABS.....	97
4.3.7	Zusammenfassende Betrachtung	101
5	Betroffene Abfallströme und Abschätzung der Risiken für Mensch und Umwelt.....	103
5.1	Auswahl relevanter Kunststoffpolymere	103
5.2	Baubereich	104
5.2.1	Kunststoffeinsatz im Überblick	104
5.2.2	Relevante Erzeugnisse und darin enthaltene Schadstoffe	105
5.2.2.1	PVC.....	105
5.2.2.2	PE-HD/MD.....	107
5.2.2.3	EPS	108
5.2.3	Abfallströme und Entsorgungswege.....	109
5.2.3.1	PVC.....	109
5.2.3.2	PE-HD/MD.....	114
5.2.3.3	EPS	117
5.3	Automobilbereich	121
5.3.1	Kunststoffeinsatz im Überblick	121
5.3.2	Relevante Erzeugnisse und darin enthaltene Schadstoffe	122
5.3.2.1	PP	122
5.3.2.2	PE-HD/MD.....	123
5.3.2.3	ABS.....	123
5.3.3	Abfallströme und Entsorgungswege.....	124
5.4	Elektro-/Elektronikbereich.....	129
5.4.1	Kunststoffeinsatz im Überblick	129
5.4.2	Relevante Erzeugnisse und darin enthaltene Schadstoffe	130
5.4.2.1	PP	130
5.4.2.2	PS	131
5.4.2.3	ABS.....	131

5.4.3	Abfallströme und Entsorgungswege.....	132
5.5	Abschätzungen der Risiken für Mensch und Umwelt.....	137
5.5.1	DEHP und andere niedermolekulare Phthalate in PVC	137
5.5.2	Cd/Pb in PVC-Fenstern.....	138
5.5.3	BPA in PVC.....	138
5.5.4	HBCDD in EPS	139
5.5.5	Flammschutzmittel in PE/PP/PS-Kunststoffen.....	141
6	Identifizierung geeigneter Entsorgungswege.....	143
7	Quellenverzeichnis	148

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Recycling-Code und Strukturformel von PVC.....	80
Abbildung 2:	Recycling-Code und Strukturformel von Polyethylen	88
Abbildung 3:	Recycling-Code und Strukturformel von Polypropylen	91
Abbildung 4:	Recycling-Code und Strukturformel von Polystyrol	94
Abbildung 5:	Recycling-Code und Strukturformel von Polystyrol	96
Abbildung 6:	Recycling-Code für Acrylnitril-Butadien-Styrol (O für others = andere)	97
Abbildung 7:	Visualisierung der zusammenfassenden Betrachtung verschiedener Kunststoffarten und den jeweiligen Additivarten bzw. Stoffen.....	101
Abbildung 8:	Überblick über in verschiedenen Branchen verarbeitete Kunststoffpolymere und Darstellung des Projektfokus.....	103
Abbildung 9:	Überblick über Verteilung der im Baubereich in Deutschland im Jahr 2017 verarbeiteten Kunststoffarten (in %).....	104
Abbildung 10:	Überblick über Entsorgungswege von Post-Consumer Kunststoffabfällen aus dem Baubereich in Deutschland im Jahr 2017.....	109
Abbildung 11:	Überblick über Entsorgungswege von PVC Post-Consumer Abfällen in Deutschland im Jahr 2017	110
Abbildung 12:	Überblick über Entsorgungswege von PVC Altfenstern und verwandten Produkten in Deutschland im Jahr 2018	110
Abbildung 13:	Überblick über Verteilung der im Automobilbereich in Deutschland im Jahr 2017 verarbeiteten Kunststoffarten (in %)	121
Abbildung 14:	Überblick über Verteilung der im Elektro-/Elektronikbereich in Deutschland im Jahr 2017 verarbeiteten Kunststoffarten (in %)	129
Abbildung 15:	Zur Erstbehandlung angenommene Elektro- und Elektronikaltgeräte in Deutschland im Jahr 2017	134
Abbildung 16:	Überblick über Entsorgungswege von Post-Consumer Kunststoffabfällen aus dem Elektro-/Elektronikbereich in Deutschland im Jahr 2017	134
Abbildung 17:	Optionen für die schadloose und ordnungsgemäße Entsorgung schadstoffhaltiger technischer Kunststoffe aus den Bereichen Bau, Automobil und Elektro-/Elektronik	144

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Detaildarstellung der extrahierten Daten zu dem Stoff, relevanter Kunststoffart und Artikeln, Funktion und Konzentration.	33
------------	--	----

Tabelle 2:	Aufstellung der Einträge, die mit dem jeweiligen H-Satz klassifiziert sind	36
Tabelle 3:	Kunststoffadditive die in Anhang XVII der REACH-VO gelistet sind (Stoffname, CAS, EC)	37
Tabelle 4:	Kunststoffadditive, die als SVHC gelistet sind (Stoffname, CAS, EC).....	39
Tabelle 5:	Kunststoffadditive die auf der CoRAP-Liste gelistet sind (Stoffname, Akronym, CAS)	45
Tabelle 6:	Kunststoffadditive, die auf der POP-Liste gelistet sind (Stoffname, CAS, EC).....	48
Tabelle 7:	Kunststoffadditive die auf der SIN-Liste gelistet sind (Stoffname, CAS, EC).....	50
Tabelle 8:	Kunststoffadditive die auf der UBA-PMT-Liste gelistet sind (Stoffname, CAS, EC).....	53
Tabelle 9:	Darstellung Punktesystem.....	56
Tabelle 10:	Kunststoffadditive, sortiert nach dem projektinternen Punktesystem. (AO= Antioxidantien, AS= Antistatikum, BS = Biostabilisator, FM= Flammschutzmittel, HS = Hitzestabilisator, I= Intermediat, LS = Lichtsstabilisator, OS = weiterer Stabilisator, O=Other, nicht weiter spezifiziert, P = Pigment, WM= Weichmacher), *Nicht gelistet, aber Mehrheit der CLP-Registranten meldet relevante Effekte.	57
Tabelle 11:	Chemische Obergruppen der projektrelevanten Stoffe.....	79
Tabelle 12:	Chemische Obergruppen der projektrelevanten Stoffe im Polymer Polyvinylchlorid	81
Tabelle 13:	Prioritäre Stoffe, die als PVC-Additiv genannt werden	82
Tabelle 14:	Chemische Obergruppen der projektrelevanten Stoffe im Polymer Polyethylen.....	88
Tabelle 15:	Prioritäre Stoffe, die als PE-Additiv genannt werden.....	88
Tabelle 16:	Chemische Obergruppen der projektrelevanten Stoffe im Polymer Polypropylen	91
Tabelle 17:	Prioritäre Stoffe, die als PP-Additiv genannt werden.....	91
Tabelle 18:	Chemische Obergruppen der projektrelevanten Stoffe im Polymer Polystyrol.....	94
Tabelle 19:	Prioritäre Stoffe, die als PS-Additiv genannt werden.....	94
Tabelle 20:	Prioritäre Stoffe, die als EPS/XPS-Additiv genannt werden.	96
Tabelle 21:	Chemische Obergruppen der projektrelevanten Stoffe der Polymer Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer.....	98
Tabelle 22:	Prioritäre Stoffe, die als ABS-Additiv genannt werden.	98
Tabelle 23:	Zusammenfassung zu Schadstoffen und Entsorgungswegen der als relevant identifizierten Erzeugnisse im Baubereich.....	118

Tabelle 24:	Zusammenfassung zu Schadstoffen und Entsorgungswegen der als relevant identifizierten Erzeugnisse im Automobilbereich127
Tabelle 25:	Zusammenfassung zu Schadstoffen und Entsorgungswegen der als relevant identifizierten Erzeugnisse im Elektrobereich136

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AgPR	Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling
Art.	Artikel
As	Arsen
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylat-Copolymer
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BDE	Bromierte Diphenylether
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAS	Internationaler Bezeichnungsstandard für chemische Stoffe (Engl. Chemical Abstracts Service)
Cd	Cadmium
Chiemsee	Internationales Chemikaliensekretariat
CLP-Verordnung (auch CLP-VO)	Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (Engl. Classification, Labelling and Packaging)
CMR	Kanzerogen, Mutagen und Reproduktionstoxisch (Engl. cancerogenic, mutagenic and toxic to Reproduction)
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CoRAP	Fortlaufender Aktionsplan der Gemeinschaft (Engl. Community Rolling Action Plan)
Cr	Chrom
DBP	Dibutylphthalat
Deca-BDE	Decabromdiphenylether
DEHP	Bis(2-ethylhexyl)phthalat
d.h.	Das heißt
DIHP	Diisooheptylphthalat
Dt.	Deutsch
E	Verschäumt (Engl. expanded), verschäumbar (Engl. expandable), epoxidiert
EAG	Elektroaltgeräte
EBS	Ersatzbrennstoff
EC	Substanznummer, durch die EU -Kommission vergeben (Engl. European Community number - (EC) number)
ECHA	Europäische Chemikalienagentur (Engl. European Chemicals Agency)
ECPI	Europäische Rat für Weichmacher und Zwischenprodukte
EDC	endokrine Disruptoren (engl. Endocrine Disrupting Chemicals)
ElektroG	Elektro- und Elektronikgerätegesetz
Engl.	Englisch
EPS	Expandiertes Polystyrol

et al.	Und andere (Lat. et alii)
etc.	Und so weiter (Lat. et cetera)
EU	Europäische Union
EVOH	Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer
FM	Flammschutzmittel
Gew.-%	Gewichtsprozent
GHS	Global Harmonisiertes System
HBCDD	Hexabromcyclododecan
HD	Hohe Dichte (Engl. high density)
H-Satz	Gefahrenhinweis
i.d.R.	In der Regel
ID	Identifikationsnummer
inkl.	Inklusive
KMR	Krebserzeugende, Mutagene und Reproduktionstoxisch. Siehe auch CMR
KRV	Kunststoffrohrverband
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LD	Geringe Dichte (Engl. low density)
LRTP	Long range transport potential (Dt. Potential zu weiträumigen Transport)
MCCP	Mittelkettige Chlorparaffine (Engl. medium chain chlorinated paraffin)
MD	Mineral in Pulverform (Engl. mineral powder)
Mio.	Millionen
MVA	Müllverbrennungsanlage
NE-Metallfraktion	Nicht-Eisen Metallfraktion
o.Ä.	Oder Ähnlichem
örE	Öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger
P	Pigmente
PA	Polyacrylamid
PAH	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
PBT	Persistent, Bioakkumulierend & Toxisch
PC	Polycarbonate
PE	Polyethylen
PE-HD	High-Density-Polyethylen (Dt. hohe Dichte)
PE-MD	Medium-Density Polyethylen (Dt. mittlere Dichte)
PE-LD	Low-Density-Polyethylen (Dt. geringe Dichte)
PET	Polyethylenterephthalat
PFOA	Perfluoroctansäure
PMT	Persistent, mobil im Wasserkreislauf und Toxisch
POP	Persistente organische Schadstoffe (Engl. persistent organic pollutant)

POP-Verordnung	Verordnung (EU) Nr. 1021/2019 über persistente organische Schadstoffe (POP-Verordnung). Siehe auch POP.
POP-BDE	Tetra-, penta-, hexa- and hepta- und deca- bromodiphenylether
PP	Polypropylen
ppm	Parts per million (Dt.: Anteile pro Million)
PS	Polystyrol
PUR	Polyurethane
PVC	Polyvinylchlorid
REACH-Verordnung	Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH-Verordnung). REACH steht für Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (Engl. Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)
RoHS	Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (Engl. Restriction of Hazardous Substances)
SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymer
Sb	Antimon
SCCP	Kurzkettige Chlorparaffine (Engl. Short-chain chlorinated paraffins)
SDS	Sicherheitsdatenblätter (Engl. safety data sheets)
SIN-Liste	SIN (Engl. Substitute It Now!) Liste. Liste mit Substanzen, deren Verwendung zukünftig eingeschränkt werden könnte
SLF	Schredderleichtfraktion
Sn	Zinn
sog.	Sogenannte/r
SVHC	Besonders besorgniserregende Stoffe der REACH-Verordnung (Engl. substance of very high concern)
SSF	Schredderschwerfraktion
t	Tonnen
TBBPA	Tetrabrombisphenol A
TCEP	Tris(2-chlorethyl)phosphat
Ti	Titan
u.a.	Unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
usw.	Und so weiter
UV	Ultraviolette Strahlung
VO	Verordnung
vPvB	Sehr persistent und sehr bioakkumulierend
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
XPS	Extrudiertes Polystyrol
y	Year (Dt. Jahr)

z.B.	Zum Beispiel
-------------	--------------

Zn	Zink
-----------	------

Glossar

Die in der folgenden Tabelle aufgeführten Begriffe sind hauptsächlich Kapitel 2 der REACH - Verordnung entnommen. Zudem sind auch projektinterne Begriffe erläutert.

Besonders besorgniserregende Substanzen (Engl. substance of very high concern SVHC)	Nach der Europäischen Chemikalienverordnung REACH, Artikel 57 Stoffe, die entweder karzinogen, mutagen oder reproduktionstoxisch der Kategorie 1 oder 2 (CMR-Stoff), persistent, bioakkumulierbar und toxisch (PBT-Stoff), sehr persistent und sehr bioakkumulierbar (vPvB-Stoffe) oder aus vergleichbaren Gründen ebenso besorgniserregend sind, hierunter fallen z.B. endokrine Disruptoren und neurotoxische Stoffe.
Erzeugnis	Gegenstand, der bei der Herstellung eine spezifische Form, Oberfläche oder Gestalt erhält, die in größerem Maße als die chemische Zusammensetzung seine Funktion bestimmt.
Halbmetalle	Halbmetalle stehen im Periodensystem zwischen den Metallen und den Nichtmetallen. Sie sind aufgrund verschiedener Eigenschaften weder ein Metall noch ein Nichtmetall (elektrische Leitfähigkeit & Aussehen).
H-Satz	Gefahrenhinweis. Textaussage zu einer bestimmten Gefahrenklasse und Gefahrenkategorie, die die Art und gegebenenfalls den Schweregrad der von einem gefährlichen Stoff oder Gemisch ausgehenden Gefahr beschreibt.
Metalle	Periodensystem der Elemente, die sich links und unterhalb einer Trennungslinie von Bor bis Astat befinden.
Monomer	Stoff, der unter den Bedingungen, der für den jeweiligen Prozess verwendeten relevanten polymerbildenden Reaktion imstande ist, kovalente Bindungen mit einer Sequenz weiterer ähnlicher oder unähnlicher Moleküle einzugehen.
Polymer	<p>Polymer: Stoff, der aus Molekülen besteht, die durch eine Kette einer oder mehrerer Arten von Monomereinheiten gekennzeichnet sind. Diese Moleküle müssen innerhalb eines bestimmten Molekulargewichtsbereichs liegen, wobei die Unterschiede beim Molekulargewicht im Wesentlichen auf die Unterschiede in der Zahl der Monomereinheiten zurückzuführen sind. Ein Polymer enthält Folgendes:</p> <p>a) eine einfache Gewichtsmehrheit von Molekülen mit mindestens drei Monomereinheiten, die zumindest mit einer weiteren Monomereinheit bzw. einem sonstigen Reaktanten eine kovalente Bindung eingegangen sind;</p> <p>b) weniger als eine einfache Gewichtsmehrheit von Molekülen mit demselben Molekulargewicht.</p> <p>Im Rahmen dieser Definition ist unter einer "Monomereinheit" die gebundene Form eines Monomerstoffes in einem Polymer zu verstehen.</p>
POP	Aus dem Englischen „Persistent Organic Pollutant“, also persistenter organischer Schadstoff nach der Definition durch die Stockholm Konvention. Europäische Regulierung: (EU) 2019/1021.
Produkt	Chemikalienrechtlich kein definierter Begriff, fasst als Oberbegriff Erzeugnisse und Gemische (und ggf. auch Einzelstoffe) zusammen.
Schadstoff	In diesem Projekt wird der Begriff „Schadstoff“ für Stoffe verwendet, die kurz- oder langfristig eine schädliche Wirkung auf die menschliche Gesundheit

	und/oder die Umwelt haben können, in der Regel in der Folge des Eintrags in die Umwelt und/oder die Aufnahme durch Organismen.
Stoff	Chemisches Element und seine Verbindungen in natürlicher Form oder gewonnen durch ein Herstellungsverfahren, einschließlich der zur Wahrung seiner Stabilität notwendigen Zusatzstoffe und der durch das angewandte Verfahren bedingten Verunreinigungen, aber mit Ausnahme von Lösungsmitteln, die von dem Stoff ohne Beeinträchtigung seiner Stabilität und ohne Änderung seiner Zusammensetzung abgetrennt werden können.
Gemisch	Gemenge, Gemische oder Lösungen, die aus zwei oder mehr Stoffen bestehen.

Zusammenfassung

Hintergrund und Zielsetzung des Vorhabens

In den vergangenen Jahrzehnten haben Kunststoffe als Werkstoff immer mehr an Bedeutung gewonnen. Die vielseitige Einsetzbarkeit haben diese dabei einer Vielzahl von Additiven zu verdanken. So werden beispielsweise Flammenschutzmittel, Pigmente, UV-Stabilisatoren oder Weichmacher eingesetzt, um von Industrie und Verbrauchern gewünschte Eigenschaften zu erzielen. Die Hauptanwendungen von Kunststoffen liegen in den Bereichen Verpackung, Bau, Fahrzeuge und Elektro/Elektronik. Der Gesamtverbrauch von Kunststoffprodukten steigt sowohl in Deutschland als auch weltweit stetig an. Es wird erwartet, dass sich die globale Kunststoffproduktion in den kommenden 20 Jahren verdoppeln wird.

Entsprechend der hohen Produktionsmengen und des immensen Verbrauchs steigt auch die Menge an Kunststoffabfällen und die Frage nach geeigneten Entsorgungswegen, auch vor dem Hintergrund zunehmender Beschränkungen bei der Verbringung von Kunststoffabfällen ins Ausland.

In Deutschland werden Kunststoffabfälle derzeit überwiegend energetisch verwertet. Die verstärkte Herstellung und Verwendung von Kunststoffrezyklaten und ein höherer Recyclinganteil in Kunststoffprodukten könnten die Abhängigkeit von der Gewinnung fossiler Rohstoffe zur Kunststoffgewinnung sowie CO₂-Emissionen verringern. Dieser Entwicklung hin zum verstärkten Recycling von Kunststoffabfällen stehen jedoch zwei wesentliche Hindernisse entgegen. Zum einen der Mangel an Informationen über potenziell für Mensch und Umwelt schädliche Additive in Kunststoffen, sowie zum anderen unbeabsichtigte Kontaminationen in Kunststoffabfällen, die aus diversen Quellen stammen können.

Sowohl Ressourcenschonung als auch der Schutz von Mensch und Umwelt sind durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz als gleichrangig zu sehen. Ziel ist es, die Kreislaufwirtschaft zu fördern, um die natürlichen Ressourcen zu schonen und Mensch und Umwelt vor negativen Auswirkungen durch die Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen zu schützen. Dieses Ziel soll insbesondere dadurch erreicht werden, dass Erzeuger und Besitzer zur schadlosen und ordnungsgemäßen Verwertung ihrer Abfälle verpflichtet sind und dass keine Schadstoffe im Wertstoffkreislauf angereichert werden. Geeignete Entsorgungswege sollen soweit möglich beiden Zielen gerecht werden, der Ressourcenschonung durch gesteigertes Recycling gleichermaßen wie der schadlosen und ordnungsgemäßen Entsorgung von Kunststoffabfällen.

Vor dem Hintergrund einer ökologisch und ökonomisch sinnvollen Intensivierung des Recyclings von Kunststoffen werden in dem Vorhaben Informationen zu Art und Menge von schädlichen Kunststoffadditiven zusammengetragen und die Auswirkungen auf die Entsorgung untersucht. Die Ergebnisse des Vorhabens sollen auch für mögliche Vorgaben und andere Maßnahmen zur Ausschleusung von Schadstoffen aus dem Wertstoffkreislauf nach den einschlägigen abfallrechtlichen Vorschriften genutzt werden.

Herangehensweise

Zunächst wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zur Identifizierung sowohl von bereits bekannten Schadstoffen in Kunststoffen als auch Kunststoffadditiven, welche nicht bzw. noch nicht als Schadstoff charakterisiert sind, durchgeführt, und die Ergebnisse für die Zwecke des Vorhabens entsprechend priorisiert. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden für ausgewählte Kunststoffpolymere aus den Bereichen Bau, Elektro/Elektronik sowie Automobil relevante Erzeugnisse ermittelt und darin enthaltene Schadstoffe und deren Charakteristik dargestellt. Auf diesen Schritt folgte eine nähere Untersuchung der Entsorgungswege der ausgewählten Erzeugnisse anhand abfallwirtschaftlicher Daten und Statistiken und der durch diese

Entsorgungswege entstehenden Risiken für Mensch und Umwelt. Unter Berücksichtigung aller Teilergebnisse wurden schließlich geeignete Entsorgungswege identifiziert.

Identifizierung und Priorisierung von Kunststoffadditiven

Ein Hauptziel des Vorhabens war die Identifizierung und Priorisierung von Additiven, die in Kunststoffen verwendet werden oder wurden, und die als Schadstoffe angesehen werden können. In einer umfassenden Recherche wurde eine Vielzahl (ca. 800) an relevanten Stoffen identifiziert. Eine Priorisierung erfolgte primär anhand der Aspekte: (i) Einstufung als „karzinogen“, „mutagen“ und „reproduktionstoxisch“ nach Anhang I der CLP-Verordnung und (ii) Nennung in als relevant identifizierten Stofflisten sowie weiteren Parametern, wie der Relevanz der additiventhaltenden Kunststoffe.. Das Ziel der Priorisierung war es, Schadstoffe in Kunststoffen zu identifizieren, die eine hohe Relevanz in der Kreislaufwirtschaft haben und möglicherweise mit einem hohen Risiko für Mensch oder Umwelt in Verbindung stehen.

Als Ergebnis liegt eine priorisierte und umfassende Liste von Additiven vor, die in Kunststoffen eingesetzt werden oder wurden, und die mögliche Merkmale eines Schadstoffes besetzten. Weiterhin wurde das Vorkommen der Schadstoffe in einer Reihe besonders für das Recycling relevanten Polymertypen (PVC, PE, PS, EPS/XPS, ABS) untersucht und dargestellt.

PVC wird mit einer Vielzahl von Schadstoffen in Verbindung gebracht. Schwerpunkte liegen hierbei bei den Metallen, die in diversen Anwendungen eingesetzt werden, z.B. als Pigmente, Weichmacher und Flammschutzmittel. Auch werden bzw. wurden viele organische Schadstoffe in PVC eingesetzt, hierbei sind verschiedene Phthalate und Phenole zu nennen, die als Weichmacher gebraucht werden oder wurden. Auch viele weitere organische Schadstoffe werden oder wurden in diversen Anwendungen in PVC verwendet. Projektrelevante halogenierte Schadstoffe wurden, im Vergleich zu den anderen Polymerarten für PVC, mengenmäßig weniger identifiziert.

Polyethylen und Polypropylen zeigen (bzw. zeigten) eine sehr ähnliche Schadstoffbelastung, die durch die Metallen Chrom (in Pigmenten) und Arsen(als Biostabilisator) gekennzeichnet ist. Dies wird ergänzt durch eine Vielzahl an halogenierten organischen Schadstoffen, die vor allem als Flammschutzmittel eingesetzt werden und wurden.

Polystyrol und seine expandierte Form als EPS sind in ähnlicher Weise mit Schadstoffen belastet, hier ist vor allem HBCDD(als Flammschutzmittel) zu nennen.

Betroffene Abfallströme und Abschätzung der Risiken für Mensch und Umwelt

Betroffene Abfallströme

Aus den im Projektfokus stehenden Bereichen Bau, Automobil sowie Elektro/Elektronik wurden insgesamt neun Kunststoffpolymere zur näheren Betrachtung ausgewählt:

- ▶ Baubereich: PVC, PE-HD/MD, EPS (PS-E)
- ▶ Automobilbereich: PP, PE-HD/MD, ABS
- ▶ Elektro/Elektronikbereich: PP, PS, ABS

Für diese Bereiche und Polymertypen wurden Kunststoffeinsatz, relevante Erzeugnisse sowie aktuelle Abfallströme und Entsorgungswege auf der Grundlage verfügbarer Daten für Deutschland dargestellt. Es lässt sich zusammenfassen, dass relevante Erzeugnisse, welche die ausgewählten Kunststoffpolymere enthalten, nach Ende der Lebensdauer derzeit häufig in gemischte Abfallströme gelangen und dann in der Regel einer energetischen Verwertung

zugeführt werden. Sofern eine Getrenntsammlung oder manuelle Demontage ausgewählter Fraktionen vor dem Input in Abfallbehandlungsanlagen, wie beispielsweise Schredderanlagen, erfolgt, können Abfälle jedoch auch gut werkstofflich recycelt werden. Das rohstoffliche Recycling wurde für keinen der untersuchten Bereiche als derzeit relevant identifiziert.

Abschätzung der Risiken für Mensch und Umwelt

Zur Abschätzungen der Risiken für Mensch und Umwelt durch als prioritär identifizierte Schadstoffe wird auf Gefährdungspotentiale der Schadstoffe eingegangen und mögliche Emissionen aufgezeigt, die ein mögliches Risiko für Mensch und Umwelt darstellen können. Dabei wird ein Fokus auf die Nutzungsphase und verschiedene Entsorgungswege gelegt. Es wurden dabei folgende Fragen in Betracht gezogen:

- ▶ Führen die typischen Verwertungs- und Beseitigungsverfahren der als relevant identifizierten Abfallströme zu einer Zerstörung der Schadstoffe?
- ▶ Verursachen Verwertungs- oder Beseitigungsverfahren, bei denen die Schadstoffe nicht zerstört werden, möglicherweise eine Umwelt- oder Gesundheitsgefährdung?
- ▶ Verursacht die weitere Nutzung in aus Rezyklaten hergestellten Produkten möglicherweise eine Umwelt- oder Gesundheitsgefährdung?

DEHP und andere niedermolekulare Phthalate in PVC: Es ist bekannt, dass es während der gesamten Produktnutzungsphase zu DEHP-Emissionen aus den Artikeln in die Luft oder andere Medien kommt, da Phthalat-Weichmacher nicht chemisch in die Polymermatrix von z.B. Vinylfußböden, Dachbahnen usw. gebunden sind. Es wird daher davon ausgegangen, dass von DEHP-enthaltenden Erzeugnissen eine Gefahr für Mensch und Umwelt ausgeht. Daher ist der Gehalt an DEHP, DBP, BBP und DIBP in Erzeugnissen, die für die Innenraumumgebung bestimmt sind, und in Erzeugnissen, die einen direkten Kontakt mit der Haut oder den Schleimhäuten haben bereits reguliert und eingeschränkt. Der Hauptteil (72 %) an DEHP-enthaltenden PVC wird verbrannt. Leider sind dazugehörige Daten zu den Emissionen von DEHP bei Verbrennung kaum vorhanden. Es ist davon auszugehen, dass DEHP dabei stofflich zerstört wird. Der restliche Anteil wird teilweise werkstofflich wiederverwendet. Da hierbei auch Zermahlungsschritte eingesetzt werden, kann eine Emission beim Recyclen nicht ausgeschlossen werden.

Cadmium und Blei in PVC-Fenstern: Aufgrund toxischer Eigenschaften sind Cadmium inklusive seiner Salzverbindungen sowie Blei als SVHC identifiziert. Einige Verwendungen dieser Stoffes sind eingeschränkt, wobei es eine recyclingspezifische Ausnahme für Cadmium gibt.

PVC-Fenster werden zu ca. 70 % getrennt erfasst wobei nachfolgend eine werkstoffliche Verwertung stattfindet. Es konnten keine Daten gefunden werden, dass es dabei zu Cd-Emissionen kommt. PVC-Fensterrahmen, die mit rezyklierten PVC hergestellt werden, bestehen meist aus einer Art PVC-„Sandwich“, dabei wird für die Profilkern PVC-Rezyklat verwendet und die äußere Deckschicht besteht aus Neu-PVC. Diese Maßnahme soll eine mögliche Exposition der Umwelt und des Menschen verhindern. Trotzdem verbleiben die Schadstoffe im Kreislauf. Auch bei energetischer Verwertung werden Blei und Cadmium nicht zerstört und verbleiben in den Aschen, Schlacken und Stäuben.

BPA in PVC: BPA ist gemäß CLP Klassifizierung reproduktionstoxisch und kann somit die Fruchtbarkeit beeinträchtigen. Ferner kann es allergische Hautreaktionen hervorrufen, die Atemwege reizen und schwere Augenschäden verursachen. Aufgrund dieser Eigenschaften ist BPA ein SVHC Stoff. In den aktuellsten Dokumenten zur Stoffevaluierung, die maßgeblich von Deutschland ausgearbeitet wurden, wird zusammenfassend darauf hingewiesen, dass die Verwendung von Artikeln aus PVC und größeren Artikeln aus Polycarbonat für den Verbraucher nicht sicher erscheinen. Der Großteil des PVCs wird einer energetischen Beseitigung zugeführt. Hierbei wird BPA zerstört.

HBCDD in EPS: Hexabromocyclododecan (HBCDD) war lange das wichtigste Flammenschutzmittel, das in expandiertes Polystyrol (EPS) und extrudiertes Polystyrol (XPS)) verwendet wurde. Laut seiner CLP-Klassifizierung steht dieser Stoff im Verdacht, die Fruchtbarkeit, das ungeborene Kind und gestillte Kinder zu schädigen. Zusätzlich ist HBCDD persistent, das heißt es baut sich nur schwer in der Umwelt ab. Es reichert sich über die Nahrungskette in Lebewesen an, ist also bioakkumulierend. Eine Giftwirkung wurde für Wasserorganismen wie Krebstiere und Algen nachgewiesen. Im Jahr 2008 wurde HBCDD deshalb in die Liste von besonders besorgniserregenden Stoffen aufgenommen. Am Ende seiner Gebrauchsdauer beinhaltet ein EPS Produkt noch etwa 99,99 % des HBCDD welches bei seiner Herstellung verbraucht wurde. Mögliche Emissionen während der Produktlebensdauer sind demnach zu vernachlässigen. Emissionen aus dem Abriss von Gebäuden könnten jedoch ein zukünftiges Szenario sein, da viele Gebäude mit HBCDD-haltigem Dämmmaterial erst zukünftig abgerissen werden.

Flammenschutzmittel in PE/PP/PS-Kunststoffen: Die Risiken für Mensch und Umwelt ausgehend von Erzeugnissen aus PE/PP/PS sind vor allem durch den Zusatz von Flammenschutzmitteln gegeben. Dies sind vor allem POP-Stoffe (SCCP, POP-BDE, HBCDD) bzw. POP-Kandidaten (Dechloran Plus, DP) und Tetrabromobisphenol A. Bei der Verbrennung halogenierter Flammenschutzmittel kann es zur Bildung weiterer Schadstoffe (polihalogener Dioxine und Furane) kommen. Aufgrund der physikalisch-chemischen und ökotoxikologischen Eigenschaften sind kurzkettige chlorierte Paraffine (SCCP) als SVHC-Substanz nach REACH identifiziert. Kurzkettige CP sind zudem als mögliches Karzinogen für Menschen klassifiziert. An Standorten, an denen das Recycling von SCCP-haltigen Kunststoffen stattfindet können SCCPs freigesetzt werden, was Prozesse wie Zerkleinern und Mahlen umfassen kann.

POP-BDEs meinen im Rahmen dieses Projekts die in der EU-POP-Verordnung genannten Stoffe¹. Die Stoffe reichern sich in der Umwelt an und sind persistent & toxisch. Es wird zudem vermutet, dass sie auch endokrine Systeme stören. POP-BDEs sind Additive, die nicht chemisch an den Kunststoff gebunden sind, sondern sich physikalisch mit dem zu behandelnden Material verbinden und daher leichter in die Umwelt gelangen können.

Zukünftig relevante halogenierte Flammenschutzmittel sind das chlorierte Dechloran Plus, ein POP-Kandidat, und Tetrabromobisphenol A, welches aktuell als persistente, bioakkumulierende,

¹ Tetrabromdiphenylether, Pentabromdiphenylether, Hexabromdiphenylether, Heptabromdiphenylether, Bis(pentabromphenyl)ether (Decabromdiphenylether; DecaBDE)

toxische und endokrin wirksame Substanz beurteilt wird. Zu beiden Stoffen gibt es nur wenig Daten zu Emissionen, die zu Risiken für Mensch und Umwelt beitragen könnten.

Identifizierung geeigneter Entsorgungswege

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens demonstrieren das umfassende Spektrum an Schadstoffen, welche in bestimmten technischen Kunststoffen verwendet werden oder wurden. Somit stellen die Ergebnisse ein Instrument dar, welches der wissenschaftlichen Identifizierung schadstoffhaltiger Erzeugnisse und daraus resultierender Abfälle dienen kann.

Geeignete Entsorgungswege sollen sowohl der Ressourcenschonung durch gesteigertes Recycling gleichermaßen wie der schadlosen und ordnungsgemäßen Entsorgung von Kunststoffabfällen dienen. Für die schadlose und ordnungsgemäße Entsorgung schadstoffhaltiger Kunststoffe bestehen folgende in der aktuellen Praxis relevante Optionen:

- ▶ Option A: Identifizierung und Abtrennung der Schadstoffe oder schadstoffhaltiger Fraktionen und deren schadlose Beseitigung durch geeignete Verfahren (z.B. durch geeignete Verbrennung und Beseitigung der Verbrennungsrückstände) und Verwertung der schadstofffreien Fraktionen mit dem Ziel, das Recycling zu steigern;
- ▶ Option A1: Manuelle Demontage, Identifizierung und Abtrennung (potenziell) schadstoffhaltiger Kunststoffe auf Grundlage von Informationen zum Schadstoffgehalt bestimmter Kunststoffkomponenten;
- ▶ Option A2: Mechanische Zerkleinerung (Schreddern) und automatisierte Separation von schadstoffhaltigen Fraktionen und Polymertypen mittels geeigneter Sortiertechnik;
- ▶ Option B: Beseitigung der schadstoffhaltigen Kunststoffe durch geeignete Verfahren.

Wesentliche Ziele des aktuellen Vorhabens sind es einerseits das Recycling technischer Kunststoffe zu intensivieren und andererseits mögliche Vorgaben zur Ausschleusung von Schadstoffen aus dem Wertstoffkreislauf nach den einschlägigen abfallrechtlichen abzuleiten. Option A ist vor diesem Hintergrund die bevorzugte Option, weil diese nach der Abtrennung ausgeschleust werden können und der „schadstofffreie“ Teil der Kunststoffe grundsätzlich für das Recycling zur Verfügung steht.

Für eine Steigerung des Recyclings ist es wichtig, dass qualitativ hochwertige Rezyklate erzeugt werden. Hierzu sollten unter anderem Polymersorten wie PP, PE, PS und PVC als möglichst sortenreine Fraktionen und möglichst schadstofffrei gewonnen werden.

Die Separierung in schadstofffreie und sortenreine Fraktionen kann wissenschaftlich entweder manuell (Option A1) oder automatisiert mit moderner Sortiertechnik (Option A2) erfolgen. Jede dieser Optionen ist mit bestimmten Vor- und Nachteilen behaftet und beide werden derzeit in beschränktem Ausmaß in Deutschland angewendet.

Frühzeitige Abtrennung durch manuelle Demontage oder Getrennterfassung und Anwendung von Post-Shredder-Technologie

Um einer Kontamination mit Schadstoffen sowie einer Erschwerung von Trennprozessen vorzubeugen und somit als Ergebnis eines werkstofflichen Recyclings möglichst sortenreines und schadstofffreies Rezyklat erhalten zu können, kann es sinnvoll sein, mit Schadstoffen belastete Kunststoffpolymere möglichst früh von anderen Materialien abzutrennen. Konkret bedeutet dies die Bevorzugung einer frühzeitigen manuellen Demontage bzw. Getrennterfassung von Kunststoffen gegenüber dem Eintrag in gemischte Abfall- und

Materialströme. Als Beispiele zur Verdeutlichung können an dieser Stelle die manuelle Demontage großer Elektroaltgeräte vor dem Schreddern oder die getrennte Erfassung von (Kunststoff-)Abfällen aus dem Baubereich bei Abbruch und Sanierung genannt werden.

Für die automatisierte Abtrennung nach dem Schreddern mit moderner PST gibt es verschiedene Techniken, die entwickelt wurden, um Schredderrückstände nach unterschiedlichen Gesichtspunkten zu sortieren. Einige davon sind geeignet, um u.a. schadstoffhaltige Rückstände von anderen Materialien zu trennen. Beispielhaft lassen sich die Trennung nach Dichteigenschaften und sogenannte Sensor-Sortiersysteme anführen.

Allerdings haben sowohl die manuelle Demontage als auch die moderne Post-Shredder-Technologie ihre Grenzen. Hier seien nur einige genannt: weniger bedeutende Polymere werden in der Regel nicht abgetrennt, weil es sich nicht lohnt, die entsprechende Infrastruktur für geringe Massenströme einzurichten. Verbundmaterialien, Lamine und Kleber stören bei der Separation. Additive und Füllstoffe, die die Eigenschaften der Kunststoffe verändern, führen zu Fehlsortierungen.

Weitere Verfahren

Grundsätzlich sind auch noch andere als die zuvor beschriebenen Optionen zur Abtrennung und oder Zerstörung von Schadstoffen und zur Steigerung des Recyclings möglich. Diese sollten im Sinne einer Technologieoffenheit nicht außer Acht gelassen werden. Dazu gehören z.B. Verfahren des „rohstofflichen“ bzw. „chemischen“ Recyclings (Thermische Spaltung) oder die Aufspaltung der Kunststoffe mittels Lösemittel (Solvolyse). Potentiale in diesen Bereichen sind derzeit jedoch schwer einzuschätzen.

1 Projekthintergrund

Die vielseitige Einsetzbarkeit und die wachsende Bedeutsamkeit von Kunststoffen als Werkstoff haben diese in den vergangenen Jahrzehnten einer Vielzahl von Additiven zu verdanken. So werden beispielsweise Flammschutzmittel, Pigmente, UV-Stabilisatoren oder Weichmacher eingesetzt, um Eigenschaften zu erzielen, die von Industrie und Verbrauchern gewünscht werden. Mit diversen Hauptanwendungsbereichen von Kunststoffen, wie dem Verpackungs-, Bau-, Fahrzeug- und Elektronikbereich, stieg der Gesamtverbrauch von Kunststoffprodukten durch Endkonsumenten in Deutschland auf ca. 12 Mio. t im Jahr 2017 an (Conversio, 2018a). Erwartet wird eine Verdopplung der weltweiten Gesamtproduktion (322 Mio. t. im Jahr 2015) in den nächsten 20 Jahren.

Entsprechend der hohen Produktionsmengen und des immensen Verbrauchs steigt auch die Menge an Kunststoffabfällen. Allein in Deutschland belief sich die Gesamtmenge an Kunststoffabfällen auf 6 Mio. t im Jahr 2017. Hier stellt sich nun die Frage der Verwertung dieser Abfälle. Etwa 53 % wurden 2017 energetisch verwertet. Etwas weniger als die Hälfte (47 %) der Gesamtmenge an Kunststoffabfällen wurde werkstofflich verwertet (Conversio, 2018a).

Ein kritisches Thema in Bezug auf Kunststoffabfälle stellt die Verbringung von Kunststoffabfällen ins Ausland dar. Eine Reihe von Ländern haben bereits Importverbote oder Importbeschränkungen für verschiedene Kunststoffabfälle erlassen. Zudem wurden auf Ebene des Basler Übereinkommens Verschärfungen der Regelungen zur Verbringung von Kunststoffabfällen beschlossen, die zum 01.01.2021 umzusetzen sind. Diese Maßnahmen konfrontieren Deutschland und Europa mit der Herausforderung, mehr Recyclingkapazitäten aufzubauen. Ein weiteres Argument für ein verstärktes Kunststoffrecycling ist der Klima- und Ressourcenschutz. Die verstärkte Verwendung von Kunststoffzyklen und ein höherer Recyclinganteil könnten die Abhängigkeit von der Gewinnung fossiler Rohstoffe zur Kunststoffgewinnung sowie CO₂-Emissionen verringern. Diese Tatsache wurde auch im Rahmen der im Jahr 2018 angenommenen europäischen Strategie für Kunststoffe (kurz: EU-Kunststoffstrategie) erkannt, die u.a. Recycling zu einem lohnenden Geschäft machen und gleichzeitig Kunststoffabfälle eindämmen möchte².

Sowohl Ressourcenschonung als auch der Schutz von Mensch und Umwelt sind durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) in ihrer Wichtigkeit als gleichrangig zu sehen. Ziel des KrWG ist es also, die Kreislaufwirtschaft zu fördern, um die natürlichen Ressourcen zu schonen und Mensch und Umwelt vor negativen Auswirkungen der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen zu schützen. Dieses Ziel soll insbesondere dadurch erreicht werden, dass Erzeuger und Besitzer zur schadlosen und ordnungsgemäßen Verwertung ihrer Abfälle verpflichtet sind und dass keine Schadstoffe im Wertstoffkreislauf angereicht werden dürfen.

In diesem Projekt wird der Begriff „Schadstoff“ für Stoffe verwendet, die kurz- oder langfristig zu einer nachteiligen Veränderung der menschlichen Gesundheit und der Umwelt führen. Hierzu zählen insbesondere die besonders besorgniserregenden Stoffe (SVHC) der REACH-Verordnung³ (REACH-VO) und „Persistent Organic Pollutants“ (kurz „POP“), die in der europäischen Verordnung über persistente organische Schadstoffe⁴ aufgeführt sind.

In Artikel 57 der REACH-Verordnung sind die Kriterien für eine Identifikation als SVHC-Stoff angegeben: Stoffe, die gemäß der CLP-Verordnung als karzinogen, mutagen oder

² https://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-5_de.htm

³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=LEGISSUM%3A121282>

⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex:32004R0850>

reproduktionstoxisch der Kategorien 1A oder 1B gelten (CMR-Stoffe); Stoffe, die gemäß Anhang XIII der REACH-Verordnung persistent, bioakkumulierbar und toxisch (PBT) oder sehr persistent und sehr bioakkumulierbar (vPvB) sind; Stoffe mit endokrinschädlichen (hormonähnlichen) Eigenschaften; Stoffe mit Atemweg-sensibilisierenden Eigenschaften; Stoffe mit spezifischer Zielorgan-Toxizität nach wiederholter Exposition und schlussendlich von Fall zu Fall Stoffe, die ebenso besorgniserregend sind wie CMR- oder PBT-/vPvB-Stoffe. Ziel der Identifikation ist es, dass SVHC-Stoffe schrittweise durch ungefährlichere Stoffe oder Technologien ersetzt werden, sofern technisch oder wirtschaftlich tragfähige Alternativen vorhanden sind. Eine weitere Besonderheit ist, dass die Beweislast der Unbedenklichkeit bzw. die Pflicht zur Bereitstellung stofflicher Informationen beim Produzenten bzw. dem in Verkehr bringenden Unternehmer liegt. Dieser Ansatz wird häufig unter dem Leitsatz „no data, no market“ (Dt. Keine Daten, kein Markt) zusammengefasst und ist grundlegend wichtig, um es der Politik zu ermöglichen, Maßnahmen entsprechend des Vorsorgeprinzips vorzubereiten.

Auch das internationale Stockholmer Übereinkommen beschäftigt sich mit chemischen Stoffen, die bestimmte Kriterien aufweisen. Diese werden unter dem Begriff POP zusammengefasst. Ziel des Übereinkommens ist die Beendigung oder Einschränkung von Produktion, Verwendung und Freisetzung der hier gelisteten Schadstoffe. In der zugehörigen EU Verordnung (EG) Nr. 1021/2019 wird ein POP-Kriterienkatalog genannt. Auch hier werden Persistenz, Bioakkumulation und Toxizität genannt. Weiterhin nennt die EU POP-Verordnung das Potential zum weiträumigen Transport in der Umwelt als eigenes Kriterium.

Im Vergleich zeigt sich also, dass die beiden Bewertungssysteme teilweise dieselben Auswirkungen heranziehen (vor allem PBT). Dementgegen gesetzt gibt es aber auch Kriterien, die nur in einem der beiden Systeme betrachtet werden (z.B. Potential zum weiträumigen Transport).

SVHC und POP sind also Schadstoffe, die in einem festgelegten und transparenten Verfahren auf europäischer bzw. internationaler Ebene als Schadstoffe charakterisiert wurden. Neben den SVHC und POP werden in diesem Projekt auch noch weitere Stoffe betrachtet, die aufgrund anderer Verfahren und teilweise anderer Kriterien (z.B. das Kriterium Mobilität im Zusammenhang mit der PMT-Liste des UBAs, siehe Kapitel 4.2.2.7) als Schadstoffe gelten bzw. im Verdacht stehen, Schadstoffe zu sein.

In einer effizienten, gemeinwohlverträglichen und ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft sollte ein vernünftiger Kompromiss zwischen Schadstoffausschleusung und Recycling gefunden werden.

Dieser Entwicklung hin zum verstärkten Recycling von Kunststoffabfällen stehen zwei wesentliche Hindernisse entgegen. Zum einen der Mangel an Informationen über potenziell für Mensch und Umwelt schädliche Additive in Kunststoffen, sowie zum anderen unbeabsichtigte Kontaminationen in den Kunststoffabfällen, die aus diversen Quellen stammen können. Insbesondere bei Kunststoffabfällen aus dem Bau-, Elektronik- oder Automobilbereich gibt es häufig nur wenige oder keine Informationen über Art und Konzentration von vorhandenen Stoffen mit schädlichen Wirkungen auf die menschliche Gesundheit oder die Umwelt. Dabei ist wichtig festzuhalten, dass es meistens nicht der Kunststoff selbst ist, der als Schadstoff wirken kann, sondern dem Kunststoff zugesetzte Stoffe. Diese zugesetzten Stoffe werden als Additive bezeichnet. Dabei gilt der Leitsatz: „Ohne Kunststoff-Additive keine Kunststoffe“ (Maier & Schiller, 2016). Wobei, diese Aussage vor allem auf die praktische und kommerzielle Anwendung von Kunststoffen zutrifft. In diesem Projekt wird zwischen Additiven, Füllstoffen und Verstärkungsstoffen unterschieden. Additive beeinflussen aktiv die Materialeigenschaften und bedingen so die chemischen, elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Polymers.

Geläufige Additivgruppen sind z.B. Weichmacher, Stabilisatoren, Flammschutzmittel und Farbmittel.

Füllstoffe haben hauptsächlich die Aufgabe, die bei der Herstellung des Kunststoffs anfallenden Kosten zu senken, da sie als „Streckmittel“ eingesetzt werden können. Diese Additive sind meist natürlichen Ursprungs, so werden z.B. Kreide, Sand, Quarz, Holzmehl, Stärke und Talkum verwendet. Neben der Funktion als Streckmittel können Füllstoffe auch als Flammschutz dienen, da sie meist in hoher Konzentration eingesetzt werden und nicht brennbar sind.

Verstärkungstoffe werden eingesetzt, um die Kunststoffmatrix zu verstärken bezüglich mechanischer und physikalischer Eigenschaften, wie Elastizität oder Biegefestigkeit. Auch Verstärkungstoffe können natürlichen Ursprungs sein, so werden z.B. Flachs und Jute eingesetzt. Des Weiteren werden auch Glasfasern und Kohlenstofffasern verwendet. In diesem Projekt stehen insbesondere die Additive im Fokus. Die meisten, die in Kunststoffen verwendeten Additive sind in der Polymermatrix nicht chemisch gebunden und können daher in allen Lebenszyklusphasen von Kunststoffherzeugnissen durch Migration aus den Kunststoffen emittieren und zur Exposition von Mensch und Umwelt führen. Kunststoffe können daher eine relevante Quelle für die Exposition von Mensch und Umwelt mit Schadstoffen darstellen. Einige Additive mit einer nachteiligen Wirkung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt, wie bestimmte bromierte Flammschutzmittel und Phthalate, sind bereits bekannt. Wegen der Vielfalt der in Kunststoffen als Additive verwendeten Stoffe ist eine Einschätzung der möglichen damit verbundenen Risiken bisher schwierig (Zimmermann et al, 2019).

2 Zielsetzung des Vorhabens

Vor dem Hintergrund einer ökologisch und ökonomisch sinnvollen Intensivierung des Recyclings von Kunststoffen sollen in dem Vorhaben Informationen zu Art und Menge von schädlichen Kunststoffadditiven zusammengetragen und die Auswirkungen auf die Entsorgung untersucht werden.

Die Ergebnisse des Vorhabens sollen auch für mögliche Vorgaben und anderer Maßnahmen zur Ausschleusung von Schadstoffen aus dem Wertstoffkreislauf nach den einschlägigen abfallrechtlichen Vorgaben genutzt werden.

3 Herangehensweise

Die grundsätzliche Herangehensweise lässt sich wie folgt kurz zusammenfassen:

Zunächst wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zur Identifizierung sowohl von bereits bekannten Schadstoffen in Kunststoffen als auch Kunststoffadditiven, welche nicht bzw. noch nicht als Schadstoff charakterisiert sind, durchgeführt, und Ergebnisse für die Zwecke des Vorhabens entsprechend priorisiert (siehe zur Methodik im Detail Kapitel 3.1). Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden für ausgewählte Kunststoffpolymere aus den Bereichen Bau, Elektro/Elektronik sowie Automobil (siehe zur Methodik im Detail Kapitel 3.2) relevante Erzeugnisse ermittelt und darin enthaltene Schadstoffe und deren Charakteristik zusammenfassend dargestellt (siehe zur Methodik im Detail Kapitel 3.3). Auf diesen Schritt folgte eine nähere Untersuchung der Entsorgungswege der ausgewählten Erzeugnisse anhand abfallwirtschaftlicher Daten und Statistiken (siehe zur Methodik im Detail Kapitel 3.4) und der durch diese Entsorgungswege entstehenden Risiken für Mensch und Umwelt (siehe zur Methodik im Detail Kapitel 3.5). Unter Berücksichtigung aller Teilergebnisse wurden schließlich geeignete Entsorgungswege identifiziert (siehe zur Methodik im Detail Kapitel 3.6).

3.1 Identifizierung von Schadstoffen in Kunststoffen

Das Hauptziel des ersten Arbeitsschrittes war die Identifizierung und Priorisierung von Additiven, die in Kunststoffen verwendet werden oder wurden, und die als Schadstoffe angesehen werden können. Der Schwerpunkt der Recherche lag auf bekannten Schadstoffen, wobei hierbei auf die jeweiligen „Schadstoff“-Definitionen der beiden Verordnungen, POP- und REACH-VO, zurückgegriffen wurde. Neben diesen bekannten Schadstoffen wurden auch Additive identifiziert, die nicht bzw. noch nicht als Schadstoff charakterisiert sind. Dies soll vor allem der Vollständigkeit und der Nachhaltigkeit, der im vorliegenden Bericht vorgestellten Ergebnisse dienen.

Verschiedene Literaturquellen wurden recherchiert und ausgewertet, um Additive zu identifizieren, die in Kunststoffen verwendet werden oder wurden (siehe Kapitel 4.1). In einem zweiten Schritt wurden diejenigen Additive identifiziert, die als Schadstoffe angesehen werden können (siehe Kapitel 4.2). In einem dritten Schritt wurde eine Strategie zur Priorisierung entwickelt und angewandt (siehe Kapitel 4.2.3 & 4.3).

3.2 Auswahl relevanter Kunststoffpolymere

Für die Bearbeitung der in den Kapiteln 3.3 bis 3.6 beschriebenen Projektschritte musste zunächst eine sinnvolle Priorisierung von Kunststoffpolymeren aus verschiedenen Bereichen für die Detailbetrachtung vorgenommen werden.

Eine Vorauswahl der zu betrachtenden Bereiche wurde vom BMU bereits im Rahmen der Projektausschreibung vorgenommen. Im Projektfokus standen die Bereiche Bau, Automobil sowie Elektro/Elektronik, da es insbesondere in diesen Bereichen häufig nur wenige oder keine Informationen darüber gibt, welche Stoffe mit schädlichen Wirkungen auf die menschliche Gesundheit oder die Umwelt (z.B. Weichmacher oder Flammschutzmittel) in welchen Konzentrationen enthalten sind.

Die Auswahl relevanter Kunststoffpolymere innerhalb der drei Bereiche erfolgte ebenfalls in enger Abstimmung mit dem BMU anhand der in Conversio (2018a) getroffenen Abschätzungen zum Kunststoffeinsatz in verschiedenen Branchen in Deutschland im Jahr 2017. Maßgeblich für die Auswahl waren insbesondere relevante Einsatzmengen innerhalb der Branchen. Insgesamt wurden neun Kunststoffpolymere zur näheren Betrachtung ausgewählt.

Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.1 dargestellt.

3.3 Identifizierung relevanter Erzeugnisse und darin enthaltener Schadstoffe

Um Abfallströme und deren Entsorgungswege identifizieren zu können, wurde für alle ausgewählten Kunststoffpolymere zunächst recherchiert, in welchen Erzeugnissen diese üblicherweise eingesetzt werden. Die Recherche zur Identifizierung und Auswahl relevanter Erzeugnisse erfolgte beispielsweise über Datenbanken für Bauprodukte, Publikationen von Herstellern und Verbänden aus der Kunststoffindustrie sowie sonstige Publikationen zu den Themenbereichen Einsatz von Kunststoffen in Erzeugnissen und Entsorgung kunststoffhaltiger Abfälle. Berücksichtigt wurden hierbei insbesondere Angaben zur mengenmäßigen Verwendung. Als Ergebnis dieses Arbeitsschrittes stand eine Liste relevanter Erzeugnisse je ausgewähltem Kunststoffpolymer.

Um die Schadstoffbelastung und somit die Betroffenheit von Abfallströmen und deren Entsorgungswege einschätzen zu können, wurde in einem weiteren Schritt untersucht, welche Schadstoffe in den identifizierten Erzeugnissen typischerweise enthalten sind. Hierfür wurden die Ergebnisse aus dem ersten Teil der Studie „Identifizierung und Priorisierung von Kunststoffadditiven“ (Ergebnisse in Kapitel 4) als Ausgangspunkt herangezogen. Für die weitere Bewertung wurde der Fokus auf Substanzen gelegt, die bereits einer abschließenden Bewertung durch REACH bzw. die POP- Verordnung unterzogen wurden.

Die Ergebnisse sind, gesondert nach Bereich, in den Kapiteln 5.2.2, 5.2.3 sowie 5.4.2 dargestellt.

3.4 Abfallströme und deren Entsorgungswege

Nach Identifizierung der relevanten Erzeugnisse und darin enthaltener Schadstoffe wurden entsprechende Abfallströme und Entsorgungswege ermittelt. Hierbei wurde auch die Sammlung miteinbezogen, da diese einen wesentlichen Einfluss auf den späteren Entsorgungsweg hat. Als Quellen wurden beispielsweise Erhebungen zur Abfallentsorgung des Statistischen Bundesamts, einschlägige Berichte des UBA oder BMU zum Management verschiedener Abfallströme oder auch Veröffentlichungen von Verbänden recherchiert und ausgewertet. Als Hauptquelle für die Abschätzung der Abfallströme und Entsorgungswege der jeweiligen Kunststoffpolymere in den verschiedenen Bereichen wurde auf Zahlen des Marktforschungsunternehmens Conversio Market & Strategy GmbH zurückgegriffen. Am Ende der jeweiligen Kapitel wurde eine Tabelle erstellt, welche die wichtigsten Ergebnisse zusammenfasst und den Ausgangspunkt für die Risikoabschätzung darstellt.

Die Ergebnisse sind, gesondert nach Bereich, in den Kapiteln 5.2.3, 5.3.3 sowie 5.4.3 dargestellt.

3.5 Abschätzung der Risiken für Mensch und Umwelt

Für die Risikoabschätzung wurde kein „klassisches Risk Assessment“ vorgenommen. Vielmehr wurde eine qualitative Betrachtung möglicher Risiken als zielführend erachtet. Als Informationsquellen wurde zum einen wissenschaftliche Literatur als auch die verfügbaren Dokumente in Bezug auf REACH herangezogen und durch Erfahrungen des Projektteams ergänzt.

Grundlage für die Risikoabschätzung waren folgende Fragen:

- ▶ Führen die typischen Verwertungs- und Beseitigungsverfahren der als relevant identifizierten Abfallströme zu einer Zerstörung der Schadstoffe?

- ▶ Verursachen Verwertungs- oder Beseitigungsverfahren, bei denen die Schadstoffe nicht zerstört werden, möglicherweise eine Umwelt- oder Gesundheitsgefährdung?
- ▶ Verursacht die weitere Nutzung in aus Rezyklaten hergestellten Produkten möglicherweise eine Umwelt- oder Gesundheitsgefährdung?

Als Ausgangspunkt für die Risikoabschätzung wurden die Ergebnisse der Kapitel zu Abfallströmen und Entsorgungswegen herangezogen, insbesondere die für alle drei Bereiche erstellten Tabellen „Zusammenfassung zu Schadstoffen und Entsorgungswegen der als relevant identifizierten Erzeugnisse“ (zu finden jeweils am Ende der Kapitel 5.2.3, 5.3.3 sowie 5.4.3).

Die Ergebnisse der Risikoabschätzung sind in Kapitel 5.5 dargestellt.

3.6 Identifizierung geeigneter Entsorgungswege

Basierend auf den Erkenntnissen der vorhergehenden Arbeitsschritte wurde schließlich diskutiert, welche Entsorgungswege geeignet sind, den beiden Zielen Ressourcenschonung durch Intensivierung des Recyclings sowie Schutz von Mensch und Umwelt vor Schadstoffen in Kunststoffen möglichst gerecht zu werden.

Die Ergebnisse der Risikoabschätzung sind in Kapitel 5 dargestellt, geeignete Entsorgungswege werden in Kapitel 6 diskutiert.

4 Identifizierung und Priorisierung von Kunststoffadditiven

4.1 Quellen

Die verschiedenen Quellen, in denen Informationen zu potenziellen Schadstoffen recherchiert wurden, werden im Weiteren vorgestellt. Hierbei wird im Detail kritisch auf die jeweiligen Geltungsbereiche, Methoden und Ein- und Ausschlusskriterien eingegangen, die zu einer Aufnahme (bzw. Nicht-Aufnahme) von Stoffen in den jeweiligen Listen geführt haben. Diese unterscheiden sich deutlich – je nach Fokus der jeweiligen Informationsquelle. Es ist darauf zu achten, dass die Aufnahme bzw. Nicht-Aufnahme in die unterschiedlichen Listen keine Wertung per se darstellt, sondern wie oben erwähnt stets in Relation zu den jeweiligen Ein- und Ausschlusskriterien zu sehen ist. Als Beispiel hierfür dient die SIN-Liste mit einem Fokus auf Stoffe, die möglicherweise zukünftig in der POP- oder REACH-Verordnung geregelt werden, wohingegen die SVHC-Liste bereits bewertete Stoffe beinhaltet.

Insbesondere wurden folgende Datenbanken und Literaturquellen für die Projektzwecke herangezogen (Details siehe unten):

- ▶ Datenbanken:
- ▶ „Mapping exercise – Plastic additives initiative“ der ECHA
- ▶ Informationsplattform der europäischen Kunststoffindustrie
- ▶ Literatur von nationalen Umweltbehörden
- ▶ Wissenschaftliche Literatur

4.1.1 Datenbanken

4.1.1.1 Die „Mapping exercise – Plastic additives initiative“ der ECHA

Anfang 2019 wurden die Ergebnisse eines zweijährigen (2016-2018) Projekts mit dem Titel „*Mapping exercise – Plastic additives initiative*“ der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) und von 21 Branchenverbänden (u.a. Cefic, PlasticsEurope) veröffentlicht⁵. Die Ergebnisse sind online auf der Seite der ECHA zugänglich und können dort eingesehen werden. Ein Download der Stoffe in Form einer Excel-Tabelle ist nicht möglich. Daher wurde im Rahmen dieses Projektes eine entsprechende Tabelle der relevanten Inhalte erstellt. Zusätzlich zu der onlineverfügbaren Übersicht stellt ECHA auch noch ergänzende Informationen zum Geltungsbereich und zu den Methoden des Projekts in einem Bericht zur Verfügung⁶. Die folgenden Informationen sind diesem Bericht entnommen (ECHA Exercise, 2019)

Die Datengrundlage der Übersichtsarbeit sind zum einen ECHA-Registrierungsdossiers (Stand 15. November 2016) sowie eine Liste der „*European Weichmachers initiative*“⁷ (im Bericht als ECPI-Liste bezeichnet). Als geographisches Ausschlusskriterium wurde gewählt, dass die Stoffe in der EU hergestellt/verwendet werden. Das heißt, dass Stoffe in importierten Erzeugnissen nicht betrachtet werden. Des Weiteren werden nur solche Stoffe betrachtet, die für eine Anwendung als Kunststoffartikel („*Service life AC 13*“) und mit einer Tonnage > 100 t/y

⁵ <https://echa.europa.eu/de/mapping-exercise-plastic-additives-initiative>

⁶ <https://echa.europa.eu/documents/10162/13630/plastic-additives-supplementary-en.pdf/79bea2d6-8e45-f38c-a318-7d7e812890a1>

⁷ <https://www.europeanplasticisers.eu/>

registriert sind. Stoffe, die auf der Grundlage nicht öffentlicher oder vertraulicher Daten identifiziert wurden, werden nicht betrachtet. Eine anfängliche nach den genannten Kriterien erstellte Liste wurde dann von Industrievertretern auf ihren tatsächlichen Einsatz in Kunststoffen evaluiert.

Die finale Additiv-Liste der ECHA ist nach deren Funktion sortiert, wobei folgende betrachtet werden: Weichmacher, Flammschutzmittel, Pigmente, Antioxidantien, Antistatika, Keimbildner und verschiedene Arten von Stabilisatoren. Weitere Angaben beziehen sich auf die Polymerart und Konzentration, in welchem/r die Stoffe typischerweise verwendet werden. Die finale Additiv-Liste der ECHA enthält ca. 400 Stoffe.

Bei der kritischen Betrachtung, der in der Additiv-Liste aufgeführten Stoffe fällt auf, dass zum einen bekannte Kunststoffadditive wie z.B. Bisphenol A (BPA) nicht gelistet sind, obwohl dessen (Neben-)Verwendung als Antioxidans in Kunststoffen bekannt ist. Zum anderen erscheint die Angabe des Polymertyps, in dem die Stoffe typischerweise verwendet werden, kritisch. Hierbei wird teilweise nur auf Polyolefine-I und Polyolefine-II verwiesen, wobei aber nicht klar ist, welche der polyolefinischen Kunststoffe (PP, PE) unter welcher dieser Bezeichnungen erfasst sind.

4.1.1.2 Informationsplattform der europäischen Kunststoffindustrie

Die Datenbank innerhalb der Informationsplattform der europäischen Kunststoffindustrie enthält nach eigener Aussage ca. 50.000 Sicherheitsdatenblätter⁸ (Engl. „safety data sheets“, kurz SDS). Diese Datenblätter beziehen sich teilweise auf den gleichen chemischen Stoff, der z.B. in verschiedener Konzentration von einer Vielzahl von Herstellern verwendet wird. Die Plattform ist als industriespezifische Informationsquelle bezüglich möglicher Produkte und Anbieter konzipiert. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Plattform genutzt, um für bereits bekannte Stoffe, typische Einsatzpolymere und -konzentrationen zu recherchieren, falls diese nicht schon bekannt waren. Ein Nachteil dieser Datenbank ist, dass nach einer nicht genau feststellbaren Abfrage an SDS weitere Abfragen nur noch kostenpflichtig möglich sind.

4.1.2 Literatur von nationalen Umweltbehörden

Auch die Internetpräsenzen von nationalen Umweltbehörden verschiedener EU-Mitgliedsstaaten und weiterer Länder (z. B. Schweiz, Norwegen) wurden auf Literatur zu Schadstoffen in Kunststoffen überprüft. Dies geschah durch die jeweiligen Suchfunktionen und durch eine „Kontrollsuche“ durch Google, da erfahrungsgemäß die Suche auf den jeweiligen Internetseiten nicht erfolgreich verläuft. Eine mögliche Suche für das deutsche Umweltbundesamt kann z.B. durch „Kunststoffe“ AND UBA AND („Additive“ OR „Schadstoffe“ OR SVHC“ OR „Substanzen“) geschehen. Die folgenden Berichte wurden durch die beschriebenen Suchstrategien als besonders relevant identifiziert (nicht sortiert):

- ▶ Denmark: „Hazardous substances in plastic materials“ der dänischen Umweltbehörde⁹ (COWI, 2013)
- ▶ Norway: „Decabromodiphenyl ether and other flame retardants in plastic waste destined for recycling“ der norwegischen Umweltbehörde¹⁰ (Swerea, 2018)

⁸ <https://www.plasteurope.com/material-databases/additives.asp>

⁹ http://www.byggemiljo.no/wp-content/uploads/2014/10/72_ta3017.pdf

¹⁰ <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M973/M973.pdf>

- ▶ Nordic council of Ministers: “Hazardous substances in plastics – ways to increase recycling”¹¹ (NC, 2017)
- ▶ Netherlands: “Substances of very high concern and the transition to a circular economy”¹² (RIVM, 2017); “Plastics that contain hazardous substances: recycle or incinerate?”¹³ (RIVM, 2016)
- ▶ European Commission: “Study on waste related issues of newly listed POPs and candidate POPs” (BiPRO, 2011)¹⁴
- ▶ European Commission: “Study to support the review of waste related issues in annexes IV and V of regulation (EC) 850/2004” (Ramboll, 2019)¹⁵
- ▶ Schweiz: „Stoffflüsse im Schweizer Elektronikschrott“ (CH_BAFU, 2017)¹⁶
- ▶ European Commission: „Clean material recycling project – Study” (RIVM_Ramboll, 2019)¹⁷
- ▶ European Commission: “Study on specific plastic and rubber wastes” (BiPRO, 2011)¹⁸

¹¹ <https://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1070548/FULLTEXT01.pdf>

¹² <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2017-0071.pdf>

¹³ <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0025.pdf>

¹⁴ <https://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pops.htm>

¹⁵ <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8ea39ec6-4479-11e9-a8ed-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF>

¹⁶ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/chemikalien/publikationen-studien/publikationen/stofffluesse-im-schweizer-elektronikschrott.html>

¹⁷ <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/26e22c04-5b62-11e9-9c52-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF>

¹⁸ <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/36202>

4.1.3 Wissenschaftliche Literatur und Bücher

In einem letzten Schritt wurden Erkenntnisse von Experten und aus wissenschaftlicher Literatur herangezogen. Als wissenschaftliche Literatur sind hier zum einen englischsprachige peer-Review Publikationen und zum anderen das folgende umfassende deutschsprachige wissenschaftliche Buch zu nennen:

- ▶ „Handbuch Kunststoff-Additive“ von Ralph D. Maier und Michael Schiller erschienen 2016 (Maier & Schiller, 2016)

Nach einer anfänglichen Übersicht wurde projektintern aus zeitökonomischen Gründen entschieden, dass der Schwerpunkt der Recherche bei den wissenschaftlichen Publikationen auf den aktuellen Review-Artikeln liegen soll.

Die folgenden Publikationen wurden als besonders relevant identifiziert (nicht sortiert):

- ▶ Overview of toxicological aspects of polybrominated diphenyl ethers: A flame-retardant additive in several consumer products (Talsness, 2008)
- ▶ An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling (Hahladakis et. al., 2018)
- ▶ Determination of plastic additives in packaging by liquid chromatography coupled to high resolution mass spectrometry (Moreta & Tena, 2015)
- ▶ Qualitative Analysis of Additives in Plastic Marine Debris and Its New Products (Rani et al., 2015)
- ▶ Plastics in the Marine Environment: The Dark Side of a Modern Gift (Hammer et. al., 2012)
- ▶ Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition (Lithner et al., 2011)
- ▶ Benchmarking the in Vitro Toxicity and Chemical Composition of Plastic Consumer Products (Zimmermann et al., 2019)

4.2 Auswertung der Daten

Im Weiteren soll verdeutlicht werden, wie die als relevant identifizierten Daten ausgewertet wurden. Die Auswertung der Daten basiert vor allem auf der Erfassung in einer Exceltabelle, die als separate Exceldatei Bestandteil dieses Berichts ist. Diese Tabelle dient im Rahmen dieses Projekts auch als Grundlage der im letzten Teilschritt vorgesehenen Priorisierung.

4.2.1 Extraktion der Daten aus den verschiedenen Quellen

In einem ersten Schritt wurden die jeweiligen Stofflisten, falls verfügbar, als Excel-Datei heruntergeladen. Wenn dies nicht möglich war, wurden die in den Berichten, Büchern o.Ä. vorliegenden Daten manuell in Excel-Listen überführt. In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die Informationen gezeigt, die, soweit verfügbar, den jeweiligen Quellen entnommen wurden:

Tabelle 1: Detaildarstellung der extrahierten Daten zu dem Stoff, relevanter Kunststoffart und Artikeln, Funktion und Konzentration.

Überbegriff	Stoff	Relevante Kunststoffart	Relevante Erzeugnisse	Funktion	Verwendungskonzentration (% w/w)
Detail	Stoff-ID Name (dt. und engl.) Akronym Kommentar (Gruppenzugehörigkeit usw.) EC/CAS	EPS/XPS, PA, PC, PET, PE, PP, PS, PVC, ABS, PUR, Polyolefin-I, Polyolefin-II, Sonstige	Nennung von betreffenden Erzeugnissen	Stabilisator (Wärme-, Licht-, Bio-, weitere) Antistatika Antioxidans Weichmacher Flammschutzmittel Nukleierungsmittel Pigment Intermediat Starter/Initiator Sonstige	Typische Minimal Maximum

Quelle: (Ramboll)

Wie in der Tabelle ersichtlich, wurde eine Vielzahl an Informationen bezüglich der Stoffe den jeweiligen Quellen entnommen. Im Weiteren soll darauf im Detail eingegangen werden.

Die **Stoff-ID** ist eine projektintern vergebene Nummer, die der internen Verwaltung dienen soll. Wichtig ist hervorzuheben, dass Stoffgruppen (wie z.B. PFOA und dessen Vorläufer und Salze) im Rahmen dieses Projektes sowohl als Gruppeneintrag mit mehreren CAS- bzw. EC-Nummer und als auch als einzelne Einträge mit nur einer CAS/EC indexiert wurden. Dabei wurde der Gruppeneintrag mit einer ID versehen (XX) und die einzelnen Gruppenmitglieder mit derselben Zahl, die durch weitere Dezimalstellen ergänzt wurde (XX.YY). Dabei wurden 17 Substanzgruppen berücksichtigt, wie z.B. PFOA, dessen Vorgänger und Salze. Diese einzelne Aufgliederung ist Grundlage für die im nächsten Schritt auf CAS/EC-Nummern basierende Priorisierung.

Der englische Stoffname wurde den jeweiligen Quellen entnommen. Falls nur eine CAS- bzw. EC-Nummer zur Verfügung stand, wurde der jeweilige Name aus einer von der ECHA zur Verfügung gestellten Liste extrahiert, die alle registrierten Stoffe abdeckt (Stand Mai 2019)¹⁹. Gleichartig

¹⁹ <https://echa.europa.eu/de/information-on-chemicals/registered-substances>

wurde verfahren, wenn ausschließlich eine CAS- bzw. EC-Nummer zur Verfügung stand und die jeweilige andere Nummer gefunden werden sollte.

Weitere stoffspezifische Informationen sind **Akronyme**, die häufig bei Stoffen verwendet werden und meist bekannter sind als der eigentliche chemische Name. Akronyme wurden im Rahmen dieses Projektes nicht aktiv recherchiert, sondern durch Vorkenntnis bzw. Nennung in den entsprechenden Quellen in Erfahrung gebracht.

Unter **Kommentar** hat das Projektteam versucht, weitere relevante Informationen zu dem Stoff zu geben, dies betrifft vor allem die Gruppenzugehörigkeit der Stoffe. So sind z.B. auch andere Phthalate unter „Phthalates“ erfasst, die aber von der ECHA nicht als Gruppeneintrag „Phthalates“ gelistet sind.

Unter **relevante Kunststoffarten** wurde erfasst, in welchem Kunststofftyp die gelisteten Additive hauptsächlich verwendet werden oder wurden. Auch diese Information wurde den jeweiligen Quellen entnommen bzw. in der Informationsplattform der europäischen Kunststoffindustrie recherchiert. Die genannten Kunststoffarten decken die für dieses Projekt, das heißt abfalltechnisch, relevantesten Typen ab. Die Angabe Polyolefin-I und Polyolefin-II ist aus der Mapping Exercise der ECHA übernommen, wobei leider keine Angabe gemacht worden ist, welche Arten unter „I“ bzw. „II“ erfasst sind. Polyolefine sind Kunststofftypen, die aus Alkenen wie Ethylen (PE), Propylen (PP), 1-Buten oder Isobuten durch Kettenpolymerisation hergestellt werden. Die Kunststoffarten wurden in der Art erfasst, dass pro relevante Art eine Excelspalte verwendet wurde, durch ankreuzen (eintippen von „x“) wurde dann die relevante Kunststoffart gekennzeichnet. Durch diese Herangehensweise kann nach Kunststoffarten sortiert werden.

Nachfolgend zum Kunststofftyp wurden auch **relevante Erzeugnisse** recherchiert, wobei hier vor allem auf Nennungen von Messungen in spezifischen Verbraucherprodukten, wie z.B. Duschvorhang, als Volltext erfasst sind. Die **Funktion** der Additive in dem Kunststoff ist soweit von Interesse, da Substanzen derselben Funktion teilweise chemisch miteinander verwandt sind. Die genannten Funktionen wurden aus der ECHA Mapping exercise übernommen und decken die relevantesten Funktionen ab (Stabilisatoren, Weichmacher, Flammschutzmittel etc.). Unter „other“ sind weitere Funktionen erfasst, die nicht durch die relevanten abgedeckt sind. Analog zu den Kunststofftypen sind die jeweiligen Funktionen in der Exceltabelle auch als einzelne Spalten erfasst, die sortiert werden können.

Des Weiteren ist auch die **Verwendungskonzentration** angeben. Dies ist dadurch begründet, dass Additive häufig in einem gewissen Verhältnis zu dem Polymer eingesetzt werden müssen, um ihre Funktion zu erfüllen. Dabei haben z.B. Weichmacher einen weitaus höheren Anteil (bis zu 30 Gew.-%) als z.B. Pigmente (bis zu 1 Gew.-%). Die Angabe der Konzentration wurde in der Exceltabelle in drei Säulen realisiert. Diese berücksichtigt die minimale, die maximale und eine typische funktionelle Konzentration, in der der Stoff typischerweise verwendet wird, um die gewünschte Funktion im Polymer zu erreichen. Auch diese können sortiert werden.

4.2.2 Auswertung der Daten und weitere Recherche im Hinblick auf die Priorisierung

Im Rahmen dieses Projekts wurde in enger Absprache mit dem BMU eine Priorisierungsstrategie entworfen, die maßgeblich auf zwei Teilschritten beruht:

- ▶ Schritt 1: Einstufung als „karzinogen“, „mutagen“ und „reproduktionstoxisch“ nach Anhang I der CLP-Verordnung und verschiedene als relevant identifizierte Listen, die sich mit nach den jeweiligen Definitionen eventuell „schädlichen“ Stoffen (POP, SVHC, SIN, CORAP etc.) befassen
- ▶ Schritt 2: Betrachtung weiterer Parameter, z. B. die Relevanz/Menge des additivhaltenden Kunststoffs (insbesondere auch typische Zielpolymere der Recyclingindustrie)

Im Weiteren wird im Detail auf die im ersten Schritt genannten Listen bzw. die Einstufung nach der CLP-Verordnung eingegangen. Dabei wird auch betrachtet, wie viele und welche Kunststoffadditive auf den jeweiligen Listen zu finden sind. Dabei ist es wichtig zu beachten, dass Stoffe auch auf mehreren Listen zu finden sein können, da z.B. die Listen ähnliche Einschlusskriterien besitzen oder teilweise aufeinander aufbauen. Trotzdem wurden im Rahmen dieses Projektes mehrere Listen miteinbezogen, um sicher zu stellen, dass alle als relevant erachteten Kunststoffadditive identifiziert werden.

4.2.2.1 Einstufung nach der CLP-Verordnung

Wie beschrieben, soll der Schwerpunkt der Priorisierung auf Stoffen liegen, die nach der CLP-Verordnung als Stoffe eingeordnet sind, die Krebs verursachen (Engl. „*cancerogenic*“), die DNA verändern (Engl. „*mutagenic*“) oder die Fortpflanzungssysteme schädigen können (engl. „*reproductive*“). Die beschriebenen Effekte sind meist langfristig, das heißt zwischen der auslösenden Exposition und der eigentlichen Erkrankung können mehrere Jahre vergehen (Im Fall von Asbest sind bis zu 40 Jahre beschrieben). Des Weiteren können nicht nur das Individuum, sondern auch die nachfolgenden Generationen geschädigt werden, da das Erbgut bzw. die Entwicklung des Kindes im Mutterleib geschädigt bzw. beeinträchtigt wird. Grundlage der CLP-Verordnung ist das global harmonisierte System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (Engl. „*globally harmonized System of classification, labelling and Packaging of Chemicals*“) der Vereinten Nationen. In diesem System werden CMR-Stoffe in zwei Kategorien eingeteilt, je nach dem Verfügbarkeitsgrad von Informationen bezüglich der Gefährdung. Daher ist es wichtig zu betonen, dass die Kategorien bzw. Nummer 1 oder 2) keine Aussage zur eigentlichen Gefährdung, bzw. der Wirkstärke, geben, da sie sich nur in der verfügbaren Datenlage unterscheiden. Die Basis der Datenlage ist die wissenschaftliche Evidenz epidemiologischer oder tierexperimenteller Befunde und stellt immer nur den aktuellen Wissenstand dar.

Die folgenden Kategorien werden berücksichtigt:

- ▶ Kategorie 1A: nachgewiesene Wirkung beim Menschen
- ▶ Kategorie 1B: erwiesene Wirkung bei Langzeit-Tierversuchen mit möglicher Übertragbarkeit auf den Menschen
- ▶ Kategorie 2: Verdacht einer schädlichen Wirkung

Die gezeigten Kategorien sind im GHS durch sog. „H-Sätze“ berücksichtigt, wobei diese Gefährdungen (Engl. hazard) beschreiben, die von dem chemischen Stoff oder Zubereitungen ausgehen. Zusätzlich zu den CMR-spezifischen H-Sätzen wurden auch weitere H-Sätze in die Liste mitaufgenommen. Teilweise geschah diese Aufnahme vollautomatisch unter Verwendung einer von der ECHA bereitgestellten Tabelle der harmonisierten Einträge aller Stoffe, die im Anhang VI der CLP-Verordnung enthalten sind²⁰.

Da nicht alle Stoffe harmonisiert eingetragen sind, wurden für die restlichen Einträge, die nicht harmonisierten Einträge recherchiert, wobei hier der Fokus auf „joint entries“ bzw. den Eintragungen mit den meisten Anmeldern („notifier“) liegt. Hierfür gibt es keine verfügbare Liste, sodass diese Arbeit manuell erfolgte. Die Einstufung nach der CLP-Verordnung wurde innerhalb der Excelliste in einer Spalte als Text erfasst. Hier wurden auch diejenigen Substanzen erfasst, die mit wahrscheinlich krebserregend usw. gekennzeichnet sind, sodass auch diese in die Priorisierung miteinfließen. Dies wurde weiterhin durch die Überprüfung der KMR-Liste 21 der deutschen gesetzlichen Unfallversicherungen unterstützt, um sicherzugehen, dass wirklich alle wahrscheinlichen bzw. möglicherweise auch erst in der Zukunft relevanten CMR-Substanzen erfasst werden.

In der folgenden Tabelle 2 ist die Anzahl der einzelnen Einträge gezeigt, die mit dem jeweiligen H-Satz klassifiziert sind.

Tabelle 2: Aufstellung der Einträge, die mit dem jeweiligen H-Satz klassifiziert sind

H-Satz	Gefährdung	Anzahl
H340	Kann genetische Defekte verursachen	15
H350	Kann Krebs erzeugen	51
H360	Kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen oder das Kind im Mutterleib schädigen	80
H341	Kann vermutlich genetische Defekte verursachen	24
H351	Kann vermutlich Krebs erzeugen	74
H361	Kann vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen oder das Kind im Mutterleib schädigen	54

Quelle: (Ramboll)

4.2.2.2 Nennung im REACH Anhang XVII

Die Einträge 28, 29 und 30 des Anhangs XVII der REACH-VO beschränken die Verwendung von u.a. CMR-Stoffen der Kategorien 1A und 1B in Gemischen, die an die breite Öffentlichkeit abgegeben werden (z.B. Reinigungsmittel, Farben) und verlangt eine zusätzliche Kennzeichnung für Produkte, die für professionelle Anwender bestimmt sind.

Diese Liste wurde im Rahmen des Projektes als Absicherung genutzt, um sicher zu stellen, dass alle CMR-Stoffe erfolgreich identifiziert werden. Um die Nennung der Additive auf dieser Liste zu überprüfen, wurde in einem ersten Schritt die Excelliste von der ECHA heruntergeladen und als ein einzelnes Arbeitsblatt in der Exceldatei gespeichert (ca. 800 Stoffe). Nachfolgend wurde

²⁰ <https://echa.europa.eu/de/information-on-chemicals/annex-vi-to-clp>; es wurde der Stand des ATP10 vom Dezember 2018 betrachtet

²¹ <https://publikationen.dguv.de/3517/liste-der-krebserzeugenden-keimzellmutagenen-und-reproduktionstoxischen-stoffe-kmr-stoffe>

überprüft, ob ein Stoff, bzw. dessen CAS bzw. EC-Nummer, sowohl als Additiv identifiziert wurde und in Anhang XVII aufgeführt wird. Dies wurde erneut in Excel durch einen Befehl gelöst, da hier aber beides, CAS und EC, überprüft werden sollte, wurde ein INDEX- und ein MATCH-Befehl miteinander kombiniert.

Von den aufgeführten ca. 800 Stoffen sind 51 Stoffe (ca. 4 %) gleichzeitig auch im Anhang XVII der REACH-VO erfasst. Oder mit anderen Worten, im Rahmen des Projekts wurden 51 Anhang-XVII-Stoffe als Kunststoffadditive identifiziert. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Kunststoffadditive die in Anhang XVII der REACH-VO gelistet sind (Stoffname, CAS, EC)

Stoffname	CAS	EC
Acrylamid	79-06-1	201-173-7
Arsen(V)-oxid	1303-28-2	215-116-9
Arsen(III)-oxid	1327-53-3	215-481-4
Arsen-Verbindungen	7778-39-4	231-901-9
Bleiarsenat	7784-40-9	232-064-2
Benzylbutylphthalat	85-68-7	201-622-7
Bis(2-ethylhexyl)phthalat	117-81-7	204-211-0
Bisphenol A	80-05-7	201-245-8
Decabromdiphenylether	1163-19-5	214-604-9
Cadmium (pyrophor)	7440-43-9	231-152-8
Cadmium (nicht-pyrophor)	7440-43-9	231-152-8
Cadmiumchlorid	10108-64-2	233-296-7
Cadmiumcyanid	542-83-6	208-829-1
Cadmiumfluorid	7790-79-6	232-222-0
Cadmiumformiat	4464-23-7	224-729-0
Cadmiumiodid	7790-80-9	232-223-6
Cadmiumhexafluorsilicat	17010-21-8	241-084-0
Cadmiumoxid	1306-19-0	215-146-2
Cadmiumsulfat	10124-36-4	233-331-6
Cadmiumsulfid	1306-23-6	215-147-8
Dibutylphthalat	84-74-2	201-557-4
Diisobutylphthalat	84-69-5	201-553-2
Bleihydroxidcarbonat	1319-46-6	215-290-6

Stoffname	CAS	EC
Blei(II)-carbonat	598-63-0	209-943-4
Blei	7439-92-1	231-100-4
Blei(II)-sulfat	7446-14-2	231-198-9
Phenylquecksilberacetat	62-38-4	200-532-5
Quecksilber	7439-97-6	231-106-7
Nonylphenol, ISre	25154-52-3	246-672-0
Nonylphenoethoxylat, ISre,	9016-45-9	500-024-6
Nonoxinol	26027-38-3	500-045-0
Isononylphenol, ethoxyliert	37205-87-1	609-346-2
Nonylphenol, verzweigt, ethoxyliert	68412-54-4	500-209-1
4-Nonylphenol, verzweigt, ethoxyliert	127087-87-0	500-315-8
Rußöl (Anthracenöl)	90640-80-5	292-602-7
Pigment Yellow 35; Cadmiumzinksulfidgelb	8048-07-5	232-466-8
Pigment Red 108	58339-34-7	261-218-1
Kieselsäure, Zirkoniumsalz, Cadmiumpigment-umhüllt	102184-95-2	310-077-5
Phthalsäurediisononylester	68515-48-0	271-090-9
Diisononylphthalat	28553-12-0	249-079-5
Diisodecylphthalat	68515-49-1	271-091-4

Quelle: (Ramboll)

4.2.2.3 Nennung als besonders besorgniserregende Substanz (SVHC)

Im Jahr 2007 ist die EU-Chemikalienverordnung REACH in Kraft getreten. Im Rahmen der REACH-VO werden als gefährlich eingeschätzte Stoffe als besonders besorgniserregend (SVHCs) eingestuft und anschließend auf die Kandidatenliste gesetzt. Anschließend ist die Verwendung dieser Stoffe strengen Begrenzungen unterlegen. Eine Einstufung als SVHC zieht die Informationspflichten nach Art. 33 (1) REACH-VO nach sich sowie entweder die Aufnahme in Anhang XIV (Zulassungsverfahren) oder Anhang XVII (Beschränkung). Zudem sollen SVHC durch weniger „riskante“ Stoffe ersetzt werden.

Die Kriterien für eine Identifizierung als SVHC sind in REACH Artikel 57 a-f beschrieben. Dort sind drei Kategorien enthalten.

- ▶ CMR-Stoffe: Chemikalien, die Krebs verursachen (Engl. „cancerogenic“), die DNA verändern (Engl. „mutagenic“) oder die Fortpflanzungssysteme schädigen können (Engl. „reproductive“).
- ▶ PBT/vPvB: Schadstoffe, die persistent, toxisch und sich in der Nahrungskette ansammeln. Diese werden als PBT-Stoffe (kurz für persistent, bioakkumulierend und

toxisch) bezeichnet. Ebenso vPvB, kurz für sehr (Engl. sehr = „very“) persistent und sehr bioakkumulierend.

- ▶ „weitere besorgniserregende Stoffe“: Diese Kategorie umfasst Stoffe, die nicht unter die beiden anderen Kategorien fallen, die aber dennoch Anlass zu gleichwertiger Besorgnis in Bezug auf mögliche Gesundheits- und Umweltschäden geben. Diese Kategorie kann z.B. endokrinschädlich auf die Umwelt und den Menschen wirkende Stoffe, d.h. solche Stoffe, die durch eine Veränderung des Hormonsystems die Gesundheit schädigen können, umfassen.

Auch die SVHC-Liste wurde von der ECHA-Internetseite als Excelliste heruntergeladen (Stand Oktober 2019) mit 201 Einzelstoffen. Auch für die SVHC-Stoffe wurde überprüft, ob diese im Rahmen dieses Projektes auch als Kunststoffadditiv identifiziert wurden.

Im Rahmen dieses Projektes wurden 156 einzelne CAS- bzw.-EC-Nummern als relevant identifiziert. Dies entspricht, wenn die Gruppeneinträge abgezogen werden, ca. 150 SVHC, die als Kunststoffadditive identifiziert wurden. Es ist zu beachten, dass aus der Stoffgruppe PFOA und seine Vorgängerstoffe und Salze, bereits 29 einzelne Stoffe identifiziert wurden. In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die CAS- bzw. EC-Nummern einzeln aufgetragen, damit die Tabelle ohne weitere Formatierung für weitere Arbeiten verwendet werden kann.

Tabelle 4: Kunststoffadditive, die als SVHC gelistet sind (Stoffname, CAS, EC)

Stoffname	CAS	EC
Acrylamid	79-06-1	201-173-7
Kurzkettige Chlorparaffine	85535-84-8	287-476-5
Arsen(V)-oxid	1303-28-2	215-116-9
Arsen(III)-oxid	1327-53-3	215-481-4
Arsen-Verbindungen	7778-39-4	231-901-9
Bleiarsenat	7784-40-9	232-064-2
Bleiarsenat	15606-95-8	427-700-2
1,2-Benzoldicarbonsäure, Di-C6-8-verzweigte Alkylester, C7-reich	71888-89-6	276-158-1
1,2-Benzoldicarbonsäure, Di-C7-11-verzweigte und lineare Alkylester	68515-42-4	271-084-6
Benzylbutylphthalat	85-68-7	201-622-7
Bis(2-ethylhexyl)phthalat	117-81-7	204-211-0
Bisphenol A	80-05-7	201-245-8
Bis(2-methoxyethyl)phthalat	117-82-8	204-212-6
Tributylzinnoxid	56-35-9	200-268-0
Borsäure	10043-35-3	233-139-2
Borsäure	11113-50-1	234-343-4

Stoffname	CAS	EC
Decabromdiphenylether	1163-19-5	214-604-9
Hexabromcyclododecan	25637-99-4	247-148-4
Hexabromcyclododecan	3194-55-6	221-695-9
Beta-Hexabromcyclododecan	134237-51-7	603-802-4
Gamma-Hexabromcyclododecan	134237-52-8	603-804-5
Cadmium (pyrophor)	7440-43-9	231-152-8
Cadmium (nicht-pyrophor)	7440-43-9	231-152-8
Cadmiumchlorid	10108-64-2	233-296-7
Cadmiumfluorid	7790-79-6	232-222-0
Cadmiumoxid	1306-19-0	215-146-2
Cadmiumsulphat	10124-36-4	233-331-6
Cadmiumsulfid	1306-23-6	215-147-8
Chromtrioxid	1333-82-0	215-607-8
Kaliumdichromat	7778-50-9	231-906-6
Ammoniumdichromat	7789-09-5	232-143-1
Natriumdichromat	10588-01-9	234-190-3
Kaliumchromat	7789-00-6	232-140-5
Strontiumchromat	7789-06-2	232-142-6
Chrom(III)-chromat	24613-89-6	246-356-2
Pigment Red 104	12656-85-8	235-759-9
Pigment Yellow 34	1344-37-2	215-693-7
Chromsäure	7738-94-5	231-801-5
Bleichromat	7758-97-6	231-846-0
Natriumchromat	7775-11-3	231-889-5
Dichromsäure	13530-68-2	236-881-5
Zinkkaliumchromat	11103-86-9	234-329-8
Cobalt(II)-acetat	71-48-7	200-755-8
4,4'- Diaminodiphenylmethan	101-77-9	202-974-4
Dibutylphthalat	84-74-2	201-557-4
4,4'-Methylen-bis(2-chloranilin)	101-14-4	202-918-9
Diisobutylphtalat	84-69-5	201-553-2
Di-Natriumtetraborat-Decahydrat	1303-96-4	215-540-4

Stoffname	CAS	EC
Di-Natriumtetraborat	1330-43-4	215-540-4
Di-Natriumtetraborat-Pentahydrat	12179-04-3	215-540-4
Formaldehyd, oligomeres Reaktionsprodukt mit Anilin	25214-70-4	500-036-1
Hydrazin	302-01-2	206-114-9
Tetraethylblei	78-00-2	201-075-4
Orangemennige	1314-41-6	215-235-6
Bleihydroxidkarbonat	1319-46-6	215-290-6
Blei(II)-carbonat	598-63-0	209-943-4
Blei(II)-oxid	1317-36-8	215-267-0
Blei	7439-92-1	231-100-4
Blei(II)-acetat	301-04-2	206-104-4
Blei(II)-sulfat	7446-14-2	231-198-9
Tribleidioxidphosphonat	12141-20-7	235-252-2
Bleiazid	13424-46-9	236-542-1
Blei-2,4,6-trinitro-m-phenylendioxid	15245-44-0	239-290-0
Blei(II)methansulfonat	17570-76-2	401-750-5
Phenylquecksilberacetat	62-38-4	200-532-5
Quecksilber	7439-97-6	231-106-7
2-Methoxyethanol	109-86-4	203-713-7
Nonylphenol, Isomere	25154-52-3	246-672-0
4-Nonylphenol, verzweigt	84852-15-3	284-325-5
4-Nonylphenol, unverzweigt	104-40-5	203-199-4
2-[2-[2-[2-(4-Nonylphenoxy)ethoxy]ethoxy]ethoxy]ethanol	7311-27-5	230-770-5
Nonylphenoethoxylat, Isomere, Nonylphenolpolyglykoether	9016-45-9	500-024-6
Nonoxinol	26027-38-3	500-045-0
NONOXYNOL-9	26571-11-9	247-816-5
Isononylphenol, ethoxyliert	37205-87-1	609-346-2
Nonylphenol, verzweigt, ethoxyliert	68412-54-4	500-209-1
4-Nonylphenol, verzweigt, ethoxyliert	127087-87-0	500-315-8
4-tert-Octylphenol	140-66-9	932-665-6
4-tert-Octylphenol	140-66-9	205-426-2
Hexamethylendiisocyanat	15166-06-0	206-397-9

Stoffname	CAS	EC
PFOA Vorgänger/salz	90480-57-2	206-397-9
Fettsäuren, C7-19, perfluoriert	91032-01-8	206-397-9
Perfluorocaprylamido-N-polyethylenglykol	93480-00-3	206-397-9
PFOA Vorgänger/salz	2395-00-8	206-397-9
PFOA Vorgänger/salz	24216-05-5	206-397-9
Ethylperfluorooctanoat	3108-24-5	206-397-9
Perfluorooctansäureanhydrid	33496-48-9	206-397-9
Pentadecafluorooctanoylchlorid	335-64-8	206-397-9
Perfluorooctanoylfluorid ; Pentadecafluoro-octanoylfluorid	335-66-0	206-397-9
Perfluorooctansäure	335-67-1	206-397-9
Silber(I) Perfluorooctanoat	335-93-3	206-397-9
Natriumperfluorooctanoat	335-95-5	206-397-9
Methylperfluorooctanoat ; Pentadecafluoro-octansäure-Methylester	376-27-2	206-397-9
Ammoniumpentadecafluorooctanoate	3825-26-1	206-397-9
2-Carboxyethylbis(2-hydroxyethyl)-3-[(2,2,3,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Pentadecafluoro-1-oxooctyl)amino]propylammoniumhydroxid	39186-68-0	206-397-9
Oxooctylamino)benzolsulfonylchlorid	41358-63-8	206-397-9
Perfluorooctanamid	423-54-1	206-397-9
1-Propanamin,N,N,N,N-Trimethyl-3-[(2,2,3,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Pentadecafluoro-1-oxooctyl)amino]-, Chlorid	53517-98-9	206-397-9
Chrom(3+) Perfluorooctanoat	68141-02-6	206-397-9
Fettsäuren, C7-13, perfluoriert	68333-92-6	206-397-9
Fettsäuren, C7-13, perfluoriert, Verbindungen mit Ethylamin	69278-80-4	206-397-9
Fettsäuren, C6-18, perfluoriert, Ammoniumsalze	72623-77-9	206-397-9
Fettsäuren, C7-13, perfluoiert, Ammoniumsalze	72968-38-8	206-397-9
N-(3-Aminopropyl)-2,2,3,3,3,4,4,4,5,5,6,6,6,7,7,8,8,8-Pentadecafluorooctanamid	85938-56-3	206-397-9
1-Propansulfonsäure, 3-[Ethyl(2,2,3,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Pentadecafluoro-1-oxooctyl)amino] -, Natriumsalz	89685-61-0	206-397-9
1-Propanamin, N-(Carboxymethyl)-N,N-Dimethyl-3-[(2,2,3,3,3,4,4,5,5,6,6,6,7,7,8,8,8-Pentadecafluoro-1-oxooctyl)amino]-, Innensalz	90179-39-8	206-397-9

Stoffname	CAS	EC
Octansäure, Pentadecafluoro-, verzweigt	90480-55-0	206-397-9
Octansäure, Pentadecafluoro-, verzweigt, Ammoniumsalz	90480-56-1	206-397-9
Benzo(a)pyren	50-32-8	200-028-5
Benz(a)anthracen	56-55-3	200-280-6
Anthracen	120-12-7	204-371-1
Benzo(e)pyren	192-97-2	205-892-7
Benzo(b)fluoranthen	205-99-2	205-911-9
Benzo(j)fluoranthen	205-82-3	205-910-3
Benzo(k)fluoranthene	207-08-9	205-916-6
Chrysen	218-01-9	205-923-4
Pech, Kohlenteer, Hochtemperatur	65996-93-2	266-028-2
Rußöl (Anthracenöl)	90640-80-5	292-602-7
Anthracenöl, Anthracenpaste	90640-81-6	292-603-2
Anthracen Öl	90640-82-7	292-604-8
Anthracen Öl	90640-86-1	292-607-4
Anthracen Öl	91995-15-2	295-275-9
Anthracen Öl	91995-17-4	295-278-5
Trichlorethylen	79-01-6	201-167-4
1,2,3-Trichlorpropan	96-18-4	202-486-1
Tris(2-chlorethyl)phosphat	115-96-8	204-118-5
Triglycidylisocyanurat	2451-62-9	219-514-3
Cobalt(II,III)-oxid	1308-06-1	215-157-2
Pentalead Tetraoxidsulfat	12065-90-6	235-067-7
Blei(II)-sulfat	12202-17-4	235-380-9
Blei-Stearat dibasisch ; Dioxobis(stearato)triblei	12578-12-0	235-702-8
Diocetylzinnbis(2-ethylhexylthioglykolat)	15571-58-1	239-622-4
Schweflige Säure, Bleisalz	62229-08-7	263-467-1
Fettsäuren, C16-18, Bleisalz	91031-62-8	292-966-7
Dechloran plus	13560-89-9	236-948-9
Azodicarboxamid	123-77-3	204-650-8
Resorcin	108-46-3	203-585-2
2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-4,6-di-tert-pentylphenol	25973-55-1	247-384-8

Stoffname	CAS	EC
Terphenyl, hydriert	61788-32-7	262-967-7
Phthalsäurediisononylester	68515-48-0	271-090-9
Diisononylphthalat	28553-12-0	249-079-5
Diisodecylphthalat	68515-49-1	271-091-4
Trixylylphosphat	25155-23-1	246-677-8
N,N-Dimethylformamid	68-12-2	200-679-5
Dibutylzinddichlorid	683-18-1	211-670-0
Dichlormethan	75-09-2	200-838-9
Propylenoxid	75-56-9	200-879-2
2-(Benzotriazol-2-yl)-4,6-Diter-Butylphenol		223-346-6
2,4-Diter-Butyl-6-(5-Chlorbenzotriazol-2-yl)phenol		223-383-8
2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-4-(tert-butyl)-6-(sec-butyl)phenol	36437-37-3	253-037-1

Quelle: (Ramboll)

4.2.2.4 Nennung auf der CoRAP-Liste

CoRAP (Engl. „Community Rolling Action Plan“, dt. fortlaufender Aktionsplan der Gemeinschaft) ist ein Stoffevaluierungsprozess im Rahmen der REACH-VO. Dabei dient die Stoffevaluierung der Feststellung der Regulierungsbedürftigkeit bei vorhanden sein von Informationslücken sowie einem Risikoverdacht. Betrachtet werden Gefahren, Expositionen und Einsatzmengen des Stoffs beziehen. In der Liste sind jeweils die ursprünglichen Bedenken in Bezug auf den Stoff (z.B. PBT, sensibilisierend o.Ä. in Kombination mit hoher Tonnage) aufgeführt. Die Bewertung wird von den zuständigen Behörden des Mitgliedsstaats durchgeführt, die zwölf Monate Zeit für die Bewertung des Stoffs haben. Nach Abschluss der Bewertung sind unterschiedliche Risikomanagementoptionen möglich:

- ▶ Nachforderung von Informationen
- ▶ Zulassungsverfahren (SVHC, zulassungspflichtige Stoffe in Anhang XIV)
- ▶ Beschränkungsverfahren (Stoffe mit Beschränkungen der Herstellung, des Inverkehrbringens und der Verwendung in Anhang XVII)
- ▶ Harmonisierte Einstufung und Kennzeichnung (CLP)

Dabei hängt die Aufnahme von Stoffen in die Anhänge XIV und XVII (Optionen 2 und 3) u.a. davon ab, ob das Risiko im Umgang mit dem Stoff durch Schutzmaßnahmen so vermindern lässt, dass die Gesundheit des Menschen bzw. die Umwelt so gut wie möglich geschützt wird. Ist die Verwendung eines Stoffes unter Auflagen möglich und das Risiko entsprechend erniedrigt, ist eine Aufnahme in Anhang XIV möglich. Kann das Risiko nicht verringert werden, so wird der Stoff in Anhang XVII aufgenommen. Hierdurch ist die Verwendung eines Stoffs – abgesehen von den in Anhang XVII genannten Ausnahmen – verboten.

Die CorapListe enthält demnach die Stoffe, die der Stoffevaluierung unterworfen werden sollen oder bereits unterworfen wurden. In der CoRAP-Liste befinden sich 352 Stoffe (Stand September 2019), wobei zwischen 2016 und 2018 138 Stoffe bewertet wurden. Für die Jahre 2019-2021 ist die Bewertung von 96 weiteren Stoffen geplant. Auch diese Liste kann auf der entsprechenden Seite der ECHA heruntergeladen werden²². Analog zur Annex XVII- und SVHC-Liste wurden auch die als Kunststoffadditiv identifizierten Stoffe daraufhin geprüft, ob sie auch als CoRAP-Stoff gelistet sind.

Von den aufgeführten ca. 800 Stoffen sind 74 (ca. 4 %) auch innerhalb der CoRAP-Liste erfasst. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Kunststoffadditive die auf der CoRAP-Liste gelistet sind (Stoffname, Akronym, CAS)

Stoffname	CAS	EC
Bisphenol A	80-05-7	201-245-8
Tetrabrombisphenol A	79-94-7	201-236-9
Chrom, Chromverbindungen / Chromtrioxid (1308-38-9	215-160-9
Pigment Green 17 Chromoxid, Cr2O3		

²² <https://echa.europa.eu/de/information-on-chemicals/evaluation/community-rolling-action-plan/corap-table>

Stoffname	CAS	EC
Mittelkettige chlorierte Paraffine	85535-85-9	287-477-0
ver. Nonylphenole	84852-15-3	284-325-5
ver. Nonylphenole	68412-54-4	500-209-1
Poly(methylmethacrylate, tributyltin methacrylate)	80-62-6	201-297-1
5-Chlor-2-(2,4-dichlorphenoxy)-phenol	3380-34-5	222-182-2
1,3,5-Tris(oxiran-2-ylmethyl)-1,3,5-triazinane-2,4,6-trione	2451-62-9	219-514-3
Antimontrioxid	1309-64-4	215-175-0
2-ethylhexyl 10-ethyl-4-[[2-[(2-ethylhexyl)oxy]-2-oxoethyl]thio]-4-octyl-7-oxo-8-oxa-3,5-dithia-4-stannatetradecanoate	27107-89-7	248-227-6
2-ethylhexyl 10-ethyl-4-[[2-[(2-ethylhexyl)oxy]-2-oxoethyl]thio]-4-methyl-7-oxo-8-oxa-3,5-dithia-4-stannatetradecanoate	57583-34-3	260-828-5
Perylene-3,4:9,10-tetracarboxydiimide	81-33-4	201-344-6
Pigment Red 53 : 1 Ba-Salz eines Monoazosäurefarbstoffs	5160-02-1	225-935-3
Pigment Red 57 : 1 Ca-Salz eines Monoazosäurefarbstoffs	5521-31-3	226-866-1
2-[(2-methoxy-4-nitrophenyl)azo]-N-(2-methoxyphenyl)-3-oxobutyramide	6358-31-2	228-768-4
Triphenylphosphat	115-86-6	204-112-2
Triphenylphosphit	101-02-0	202-908-4
Zinkoxid	1314-13-2	215-222-5
Tris(2-ethylhexyl) benzene-1,2,4-tricarboxylat	3319-31-1	222-020-0
6,6'-di-tert-butyl-4,4'-butylidenedi-m-kresol	85-60-9	201-618-5
6,6'-di-tert-butyl-2,2'-methylenedi-p-kresol	119-47-1	204-327-1
2,2',6,6'-tetra-tert-butyl-4,4'-methylenediphenol	118-82-1	204-279-1
Butyl- hydroxy- toluol)	128-37-0	204-881-4
1,3-dihydro-4(or 5)-methyl-2H-benzimidazole-2-thione, Zink Salz	61617-00-3	262-872-0
Tris[2-chloro-1-(chloromethyl)ethyl]phosphat	13674-87-8	237-159-2
N,N'-ethylenbis(3,4,5,6-tetrabromophthalimid)	32588-76-4	251-118-6
Resorcinol	108-46-3	203-585-2
2,2',2''-nitrilotriethanol	102-71-6	203-049-8
Bis(pentane-2,4-dionato)calcium	19372-44-2	243-001-3

Stoffname	CAS	EC
Phenol, 4-methyl-, reaction products mit dicyclopentadien und isobutyle	68610-51-5	271-867-2
1-[(2-chloro-4-nitrophenyl)azo]-2-naphthol	2814-77-9	220-562-2
2-[(4-chloro-2-nitrophenyl)azo]-N-(2-chlorophenyl)-3-oxobutyramid	6486-23-3	229-355-1
Siliziumdioxid	7631-86-9	231-545-4
Oxydiethylendibenzoat	120-55-8	204-407-6
Oxydipropyldibenzoat	27138-31-4	248-258-5
Diisodecylszelat	28472-97-1	249-044-4
Diundecylphthalate, verzweigt and linear	85507-79-5	287-401-6
6,6'-di-tert-butyl-4,4'-thiodi-m-kresol	96-69-5	202-525-2
Octabenzon	1843-05-6	217-421-2
Ruß	1333-86-4	215-609-9
Titaniumdioxid	13463-67-7	236-675-5
Bis(2-ethylhexyl)adipat	103-23-1	203-090-1
Diallylphthalat	131-17-9	205-016-3
Diisotridecyladipat	26401-35-4	247-660-8
Bis(2-propylheptyl)phthalat	53306-54-0	258-469-4
1,2-Benzenedicarboxylic acid, di-C11-14-branched alkyl esters, C13-rich	68515-47-9	271-089-3
2-(2H-benzotriazol-2-yl)-p-cresol	2440-22-4	219-470-5
1,3-butadiene	106-99-0	203-450-8
Vinylacetat	108-05-4	203-545-4
Phenol	108-95-2	203-632-7
Tributyl phosphat	126-73-8	204-800-2
2-Ethylhexansäure	149-57-5	205-743-6
Trixylylphosphat	25155-23-1	246-677-8
Imidazol	288-32-4	206-019-2
Formaldehyd	50-00-0	200-001-8
Chloromethan	74-87-3	200-817-4
N-1-naphthylaniline	90-30-2	201-983-0
Benzenamine, N-phenyl-, reaction products with 2,4,4-trimethylpentene	68411-46-1	270-128-1

Stoffname	CAS	EC
Iso(C10-C14)alkyl (3,5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenyl)methylthioacetate	118832-72-7	404-800-4
2,5-di-tert-pentylhydroquinone	79-74-3	201-222-2
Oxybenzol	131-57-7	205-031-5
Octocrilen	6197-30-4	228-250-8
Di-tert-butylperoxid	110-05-4	203-733-6
Di-tert-amylperoxid	10508-09-5	234-042-8
Dicumylperoxid	80-43-3	201-279-3
Bis-(2-tert-butylperoxyisopropyl)benzol	25155-25-3	246-678-3
tert-Butylperoxybenzoat	614-45-9	210-382-2
1,3-Di(tert-butylperoxy)-3,3,5-trimethyl- cyclohexan	6731-36-8	229-782-3
3,6,9-Triethyl-3,6-9-trimethyl-1,4,7-triperoxyan	24748-23-0	429-320-2

Quelle: (Ramboll)

4.2.2.5 Nennung als POP

Auch die Stockholm Konvention, ein internationales Übereinkommen, beschäftigt sich mit chemischen Stoffen, die bestimmte Kriterien erfüllen. Die Stoffe werden unter dem Begriff „Persistent Organic Pollutants“ (kurz „POP“) zusammengefasst. Ziel des Übereinkommens ist die Beendigung oder Einschränkung der Produktion, Verwendung und Freisetzung von den gelisteten Schadstoffen. In der zugehörigen Verordnung (EU) Nr. 1021/2019, wird der POP-Kriterienkatalog, der die chemischen bzw. physikalischen Eigenschaften näher definiert, nicht genannt. Er ist aber in der Pflanzenschutzmittel-VO (EG) Nr. 1107/2009²³ aufgeführt. POP sind meist halogeniert, das heißt, dass sie Fluor-, Brom- und Chlor-Atome in ihrer Molekülstruktur enthalten.

Dieser weist, wie auch in der Einleitung bereits ausgeführt, Ähnlichkeiten zu den SVHC-Kriterien PBT/vPvB auf, beinhaltet aber auch POP-spezifische Kriterien, insbesondere das Potential zum weiträumigen Transport der Stoffe in der Umwelt (Engl. „*long range transport potential*“, kurz LRTP). Bei den POP handelt es sich beispielsweise um absichtlich hergestellte Industriechemikalien und Pestizide aber auch um bei bestimmten Prozessen (z.B. Verbrennungen, chemische Synthesen) unbeabsichtigt gebildete Stoffe.

In der für dieses Projekt erstellten Liste mit POP wurden auch die POP-Kandidaten eingeschlossen, die sich derzeit in der Evaluierung befinden und möglicherweise in Zukunft als POP gelistet werden. Die entsprechenden Daten wurden der offiziellen Seite der Stockholm-Konvention entnommen. Analog zu den anderen Stoffen wurde auch hier überprüft, ob eine gleichzeitige Listung als Kunststoffadditive und als POP zutrifft.

Tabelle 6: Kunststoffadditive, die auf der POP-Liste gelistet sind (Stoffname, CAS, EC)

Stoffname	CAS	EC
Kurzkettige Chlorparaffine	85535-84-8	287-476-5

²³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32009R1107>

Stoffname	CAS	EC
Pentabromdiphenylether	32534-81-9	251-084-2
Decabromdiphenylether	1163-19-5	214-604-9
Tetrabromdiphenylether	40088-47-9	254-787-2
Hexabromdiphenylether	36483-60-0	253-058-6
Heptabromdiphenylether	68928-80-3	273-031-2
Hexabromcyclododecan	25637-99-4	247-148-4
Alpha-Hexabromcyclododecan	3194-55-6	221-695-9
Beta-Hexabromcyclododecan	134237-51-7	603-802-4
Gamma-Hexabromcyclododecan	134237-52-8	603-804-5
Perfluorooctansäure	335-67-1	206-397-9
Dechloran plus	13560-89-9	236-948-9
Dechloran plus	135821-03-3	
Mirex	2385-85-5	219-196-6

Quelle: (Ramboll)

4.2.2.6 Nennung auf der SIN-Liste

Die SIN (Engl. "Substitute It Now!") Liste ist eine von der Nicht-Regierungs-Organisation Internationales Chemikaliensekretariat (ChemSec) entwickelte Datenbank für Stoffe, deren Verwendung zukünftig durch die REACH-VO gesetzlich eingeschränkt werden könnte. In der Praxis hat sich diese Liste insofern bewährt, dass sie als Kampagneninstrument genutzt wird, um sich für eine schnellere Umsetzung der REACH-VO einzusetzen. Auch in der Industrie wird die Listung eines Stoffes in der SIN-Liste wahrgenommen.

In einem ersten Schritt wurden ca. 300 für Kunststoff/Gummi-spezifische Stoffe als Excel-Datei heruntergeladen (Stand 18.07.2019). Diese Zuordnung nach Anwendung wurde dabei durch SIN vorgegeben. Die SIN-Liste nennt 70 Stoffe, die auch im Rahmen dieses Projektes als Kunststoffadditiv identifiziert wurden.

Tabelle 7: Kunststoffadditive die auf der SIN-Liste gelistet sind (Stoffname, CAS, EC)

Stoffname	CAS	EC
Acrylamid	79-06-1	201-173-7
Kurzkettige Chlorparaffine	85535-84-8	287-476-5
Benzylbutylphthalat	85-68-7	201-622-7
Bis(2-ethylhexyl)phthalat	117-81-7	204-211-0
Bisphenol A	80-05-7	201-245-8
Tributylzinnoxid	56-35-9	200-268-0
Decabromdiphenylether	1163-19-5	214-604-9
Hexabromcyclododecan	25637-99-4	247-148-4
Tetrabrombisphenol A	79-94-7	201-236-9
Cadmium (pyrophor)	7440-43-9	231-152-8
Cadmium (nicht-pyrophor)	7440-43-9	231-152-8
Cadmiumoxid	1306-19-0	215-146-2
Cadmiumsulfid	1306-23-6	215-147-8
Chromtrioxid	1333-82-0	215-607-8
Natriumdichromat	10588-01-9	234-190-3
Calciumchromat	13765-19-0	237-366-8
Pigment Red 104	12656-85-8	235-759-9
Pigment Yellow 34	1344-37-2	215-693-7
Zinkkaliumchromat	11103-86-9	234-329-8
Chrom(VI)-oxidchlorid	14977-61-8	239-056-8
4,4'- Diaminodiphenylmethan	101-77-9	202-974-4
Dibutylphthalat	84-74-2	201-557-4
Diisobutylphthalat	84-69-5	201-553-2

Stoffname	CAS	EC
Di-Natriumtetraborat	1330-43-4	215-540-4
Hydrazin	302-01-2	206-114-9
Orangemennige	1314-41-6	215-235-6
Blei(II)-oxid	1317-36-8	215-267-0
Blei(II)-chlorid	7758-95-4	231-845-5
Tribleidioxidphosphonat	12141-20-7	235-252-2
Quecksilber	7439-97-6	231-106-7
Nonylphenol, ISre	25154-52-3	246-672-0
4-Nonylphenol, unverzweigt	104-40-5	203-199-4
4-tert-Octylphenol	140-66-9	205-426-2
Tributylzinnchlorid	1461-22-9	215-958-7
Tributylstannan	688-73-3	211-704-4
Perfluorooctansäure	335-67-1	206-397-9
Ammoniumpentadecafluorooctanoate	3825-26-1	206-397-9
Anthracen	120-12-7	204-371-1
Pech, Kohlenteer, Hochtemperatur	65996-93-2	266-028-2
Anthracenöl, anthracenarm	90640-82-7	292-604-8
Trichlorethylen	79-01-6	201-167-4
1,2,3-Trichlorpropan	96-18-4	202-486-1
5-Chlor-2-(2,4-dichlorphenoxy)-phenol	3380-34-5	222-182-2
Tris(2-chlorethyl)phosphat	115-96-8	204-118-5
Triglycidylisocyanurat	2451-62-9	219-514-3
Antimontrioxid	1309-64-4	215-175-0
Pentalead Tetraoxidsulfat	12065-90-6	235-067-7
Blei(II)-sulfat	12202-17-4	235-380-9
Blei-Stearat dibasisch; ioxobis(stearato)triblei	12578-12-0	235-702-8
Diocetylzinnbis(2-ethylhexylthioglykolat)	15571-58-1	239-622-4
Schweflige Säure, Bleisalz	62229-08-7	263-467-1
Fettsäuren, C16-18, Bleisalz	91031-62-8	292-966-7
Triphenylphosphat	115-86-6	204-112-2
Dechloran plus	13560-89-9	236-948-9
Dibutylzinndilaurat	77-58-7	201-039-8

Stoffname	CAS	EC
Azodicarboxamid	123-77-3	204-650-8
Butyl-hydroxy-toluol)	128-37-0	204-881-4
Tris(1,3-dichlorisopropyl)phosphat	13674-87-8	237-159-2
Chlorierte Paraffinwachse und Kohlenwasserstoffwachse	63449-39-8	264-150-0
2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-4,6-di-tert-pentylphenol	25973-55-1	247-384-8
Terphenyl, hydriert	61788-32-7	262-967-7
Phthalsäurediisononylester	68515-48-0	271-090-9
Diisononylphthalat	28553-12-0	249-079-5
Diisodecylphthalat	68515-49-1	271-091-4
1,2-Bis(pentabromphenyl)ethan	84852-53-9	284-366-9
1,3-Butadien	106-99-0	203-450-8
Acrylonitrile	107-13-1	203-466-5
Trixylylphosphat	25155-23-1	246-677-8
Imidazole	288-32-4	206-019-2
Formaldehyd	50-00-0	200-001-8
N,N-Dimethylformamid	68-12-2	200-679-5
Dibutylzinndichlorid	683-18-1	211-670-0
Propylenoxid	75-56-9	200-879-2
Oxybenzon	131-57-7	205-031-5
2,4-Dihydroxybenzophenon	131-56-6	205-029-4

Quelle: (Ramboll)

4.2.2.7 Nennung auf der PMT-Liste des UBA

Bereits seit mehreren Jahren arbeitet das Umweltbundesamt an einem Bewertungskonzept für Stoffe, die persistent in der Umwelt („P“), mobil im Wasserkreislauf („M“) und toxisch gegenüber dem Menschen („T“) sind. Dabei ist es das Ziel, dass dieses Konzept analog zu z.B. dem PBT-Bewertungskonzept im Rahmen der REACH-VO Beachtung finden soll. Anfang 2019 veröffentlichte das UBA einen Bericht, der eine Stoffliste mit PMT enthält (UBA, 2019a). Ebenfalls in der Liste enthalten sind auch solche Stoffe, die mindestens eins der Kriterien erfüllen würden. Die Liste wurde innerhalb dieses Projektes als Excelliste digitalisiert als eigenes Excel-Arbeitsblatt abgelegt. Analog zu den anderen Listen wurde auch hier auf eine gleichzeitige Nennung als PMT-Stoff und Kunststoffadditiv verglichen.

Von den aufgeführten ca. 800 Stoffen würden 29 Stoffe die PMT-Kriterien erfüllen. In nachfolgender Tabelle 8 sind diese Stoffe aufgeführt.

Tabelle 8: Kunststoffadditive die auf der UBA-PMT-Liste gelistet sind (Stoffname, CAS, EC)

Stoffname	CAS	EC
Benzylbutylphthalat	85-68-7	201-622-7
Bis(2-ethylhexyl)phthalat	117-81-7	204-211-0
Bisphenol A	80-05-7	201-245-8
Dibutylphthalat	84-74-2	201-557-4
4-Nonylphenol, unverzweigt	104-40-5	203-199-4
4-tert-Octylphenol	140-66-9	932-665-6
4-tert-Octylphenol	140-66-9	205-426-2
Anthracen	120-12-7	204-371-1
Trichlorethylen	79-01-6	201-167-4
1,2,3-Trichlorpropan	96-18-4	202-486-1
5-Chlor-2-(2,4-dichlorphenoxy)-phenol	3380-34-5	222-182-2
Tris(2-chlorethyl)phosphat	115-96-8	204-118-5
Glycerintriacetat	102-76-1	203-051-9
Melamin	108-78-1	203-615-4
Butyl-hydroxy-toluol)	128-37-0	204-881-4
Cyanursäure	108-80-5	203-618-0
Tris(1,3-dichlorisopropyl)phosphat	13674-87-8	237-159-2
N-Butylbenzolsulfonamid	3622-84-2	222-823-6
Triethylcitrat	77-93-0	201-070-7
Styrol	100-42-5	202-851-5
1,4-Dichlorbenzol	106-46-7	203-400-5
1,4-Dioxan	123-91-1	204-661-8

Stoffname	CAS	EC
Tributylphosphat	126-73-8	204-800-2
Chlormethan	74-87-3	200-817-4
Dichlormethan	75-09-2	200-838-9
1,1-Dichlorethen	75-35-4	200-864-0
1,1,2-Trichlorethan	79-00-5	201-166-9
Oxybenzon	131-57-7	205-031-5
Benzophenone	119-61-9	807.00

Quelle: (Ramboll)

4.2.3 Gesamtbetrachtung prioritäre Stoffe & Priorisierung anhand CMR und Listung

In diesem Schritt sollen alle gezeigten gelisteten Stoffe noch einmal vergleichend betrachtet werden. Dazu wurden, basierend auf der Priorisierungsstrategie, in einem ersten Schritt alle Einträge entfernt, die nicht laut der CLP-VO als ein CMR-Stoff kategorisiert sind und auf keiner der oben genannten Listen zu finden sind. Die verbleibenden Einträge sind somit entweder mit ihrer CAS/EC-Nummer als CMR-Stoff identifiziert oder sind auf einer der Listen zu finden. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass die Anzahl der Einträge nicht gleich der Anzahl der Stoffe ist, da hier auch CAS/EC-Nummern aus Gruppeneinträgen einzeln betrachtet werden.

Des Weiteren hat das Projektteam aufgrund der hohen Anzahl an Stoffen ein weiteres Punktesystem entwickelt, um die gelisteten Stoffe weiter zu priorisieren. Das Ziel der Priorisierung ist es, Schadstoffe in Kunststoffen zu identifizieren, die eine hohe Relevanz in der Kreislaufwirtschaft haben und möglicherweise mit einem hohen Risiko für Mensch oder Umwelt in Verbindung stehen.

Mittels des Punktesystems sollen neben der jeweiligen Listung auch die Tonnage und die typische Konzentration im Kunststoff betrachtet werden. Es werden die bei der ECHA registrierte Tonnage (Stand Mai 2019) und die recherchierten Konzentrationen betrachtet. Im Weiteren wird auf die Wertung im Detail eingegangen. So werden drei Punkte zugeordnet, wenn der Stoff als CMR-Stoff nach CLP kategorisiert ist oder wenn sie nach REACH-VO auf der SVHC-, Anhang XVIII gelistet ist oder als POP nach dem Stockholmer Abkommen identifiziert ist. Da der gleiche Stoff auch auf mehreren Listen zu finden sein kann, da teilweise gleiche Bewertungskriterien verwendet werden, soll die Nennung nur einmal betrachtet werden. Die maximale Punktzahl ist demnach 8. Die Nennung auf der CoRAP-, PMT- und SIN-Liste geht schwächer in die Bewertung ein, da hier eine mögliche zukünftige Bewertung als SVHC-Stoff bewertet wird. Hier ist der Maximalwert dementsprechend 7 Punkte. Wie erwähnt, werden auch die typische Konzentration und die Tonnage betrachtet. Da aber, wie vereinbart eine Listung bzw. zukünftige Listung als erstes Ausschlusskriterium dienen sollen, wird die Tonnage/Konzentration nicht höher bewertet als die Listung. Dementsprechend ist die Maximalpunktzahl hier 3 Punkte. Die Konzentration in dem jeweiligen Kunststoff kann zumindest einen Ansatzpunkt für die mögliche Relevanz in Abfällen geben. Gleiches gilt auch für die bei der ECHA-registrierten Tonnage, wobei hier eingeschränkt werden muss, dass nur (bisher) nicht-regulierte Stoffe betrachtet werden können. Die bereits regulierten Stoffe (z.B. PBDEs) werden nicht mehr in der EU hergestellt, verbraucht und/oder importiert und weisen daher keine aktuelle Tonnage auf. Dennoch können sie abfallwirtschaftlich von Bedeutung sein. Die Tonnage gilt daher als Indikator was in Zukunft die Abfallströme betreffen kann.

Auch für diese Art der Listung soll gelten, dass bei einer möglichen mehrmaligen Listung nur einmal Punkte verteilt werden. Demnach beträgt die maximale Punktzahl hier 3 Punkte.

Die Konzentration wird dabei auf Grundlage der im Projekt identifizierten Konzentrationsbereiche in sechs Teilschritten erfasst. Gleiches gilt auch für die Tonnage, wobei hier die Tonnage an der Einteilung nach ECHA angepasst ist. Wichtig zu beachten ist, dass ein niedriger Punktwert nicht mit einer niedrigen Gefahr bzw. umwelttechnische/gesundheitliche Relevanz einhergeht. Das Punktesystem soll lediglich Auskunft über die projektspezifische Relevanz geben. Beispielhaft sind verschiedene Weichmacher (Phthalate) durch ihre hohe Tonnage und Einsatzkonzentration im Punktesystem hoch priorisiert. Dies wird zusätzlich dadurch verstärkt dass die Stoffe auch als SVHC identifiziert wurden. Dies ist auch in der nachfolgenden Tabelle 10 ersichtlich, in der die TOP 3 Positionen alle von den genannten Stoffen besetzt ist.

Das Punktesystem ist in der folgenden Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Darstellung Punktesystem

Kriterium	Punkte
CMR; SVHC; Anhang XVII; POP (Priorität 1)	8
CoRAP; PMT; SIN (Priorität 2)	7
Konzentration	
0 bis 1	0.5
1 bis 5	1
5 bis 10	1.5
10 bis 15	2
15 bis 20	2.5
>30	3
Tonnage	
0-10	0.5
10-100	1
100-1000	1.5
1000-10000	2
10000-100000	2.5
>1000000	3

Quelle: (Ramboll)

In der nachfolgenden Tabelle 10 sind die einzelnen Einträge, die mindestens auf einer Liste zu finden sind, aufgeführt (ca. 300). Die Stoffe sind nach absteigenden Punkten sortiert.

Dabei ist zu beachten, dass Stoffe, die mehr als eine CAS/EC-Nummer besitzen auch verschiedenen hohe Punktzahlen erreichen können, da sie mit einer anderen Tonnage registriert sind. In diesem Falle zählt immer die höhere Punktzahl. Diese Einträge sind mit einem Kreuzsymbol (+) markiert.

Tabelle 10: Kunststoffadditive, sortiert nach dem projektinternen Punktesystem. (AO= Antioxidantien, AS= Antistatikum, BS = Biostabilisator, FM= Flammenschutzmittel, HS = Hitzestabilisator, I= Intermediat, LS = Lichtstabilisator, OS = weiterer Stabilisator, O=Other, nicht weiter spezifiziert, P = Pigment, WM= Weichmacher), *Nicht gelistet, aber Mehrheit der CLP-Registranten meldet relevante Effekte.

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Diisononylphthalat	DINP	28553-12-0	249-079-5	WM		10	35	SVHC, Annex XVII, SIN	100000 - 1000000	14
Diisodecylphthalat	DIDP	68515-49-1	271-091-4	WM		10	35	SVHC, Annex XVII, SIN	100000 - 1000000	14
Bis(2-ethylhexyl)phthalat	DEHP	117-81-7	204-211-0	WM	30		61	SVHC, Annex XVII, SIN, PMT	10000 - 100000	13.5
4-tert-Octylphenol	4-tert-OPnEO	140-66-9	205-426-2	FM, I	0-10		30	SVHC, PMT, SIN	10000 - 100000	13.5
Decabromdiphenylether	Deca-BDE	1163-19-5	214-604-9	FM	10-15		20	SVHC, Annex XVII, SIN	1000 - 10000	13
Hexabromcyclododecan	HBCDD	25637-99-4	247-148-4	FM		0.7	28	POP	1000 - 10000	13
Dibutylphthalat	DBP	84-74-2	201-557-4	WM, O		10	35	SVHC, Annex XVII, SIN, PMT	1000 - 10000	13
Melamin		108-78-1	203-615-4	FM	25			PMT	100000 - 1000000	13

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Ruß		1333-86-4	215-609-9	LS, AS, P		2.5	40	CoRAP	1000000 - 10000000	13
Bis(2-propylheptyl)phthalat		53306-54-0	258-469-4	WM		10	35	CoRAP	100000 - 1000000	13
Borsäure	H3BO3	10043-35-3	233-139-2	FM	<5,5		8	SVHC, SIN	100000 - 1000000	12.5
Zinkkaliumchromat		11103-86-9	234-329-8	P, O		<1	25	SVHC, SIN	100 - 1000	12.5
Di-Natriumtetraborat	Borax	1330-43-4	215-540-4	AS, FM	5			SVHC, SIN	100000 - 1000000	12.5
Pech, Kohlenteer, Hochtemperatur	CTPHT, CTP(ht)	65996-93-2	266-028-2			4	8	SVHC, SIN	100000 - 1000000	12.5
Zinkoxid		1314-13-2	215-222-5	LS, AS, FM	5			CoRAP	100000 - 1000000	12.5
Tris(2-ethylhexyl)trimellitat		3319-31-1	222-020-0	WM	35			CoRAP	10000 - 100000	12.5
Bis(2-ethylhexyl)adipat		103-23-1	203-090-1	WM	22.5	10	35	CoRAP	10000 - 100000	12.5
1,2-Bis(pentabromphenyl)ethan		84852-53-9	284-366-9	FM		15	35	CoRAP	10000 - 100000	12.5
Mittelkettige chlorierte Paraffine	MCCP	85535-85-9	287-477-0	WM, FM	15			CoRAP	10000 - 100000	12
Blei(II)-sulfat		12202-17-4	235-380-9	HS	2			SVHC, SIN	100000 - 1000000	12

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Dimethylpropylphosphonat		18755-43-6	242-555-3	FM	15			*	100 - 1000	12
Titan(IV)-oxid		13463-67-7	236-675-5	LS, P		5	20	CoRAP	1000+	12
Triethylcitrat		77-93-0	201-070-7	WM	22.5	10	35	PMT	1000 - 10000	12
Diallylphthalat		131-17-9	205-016-3	WM	22.5	10	35	CoRAP	1000 - 10000	12
Diisotridecyladipat		26401-35-4	247-660-8	WM	22.5	10	35	CoRAP	1000 - 10000	12
1,2 Benzoldicarbonsäure, di-C11-14-verzweigte Alkylester, C13-reichhaltig		68515-47-9	271-089-3	WM		10	35	CoRAP	1000 - 10000	12
Acrylamid	AA	79-06-1	201-173-7	WM, I	<0,1		2	SVHC, Annex XVII, SIN	100000 - 1000000	11.5
Benzylbutylphthalat	BBP	85-68-7	201-622-7	WM		10	30	SVHC, Annex XVII, SIN, PMT	0 - 10	11.5
Bisphenol A	BPA	80-05-7	201-245-8	AO, WM		0.0003	0.2	SVHC, Annex XVII, SIN, PMT	100000 - 1000000	11.5
Chromtrioxid	PG 17	1333-82-0	215-607-8	P, O		0	5	SVHC, SIN	10000 - 100000	11.5
Chromtrioxid	PG 17	1308-38-9	215-160-9	P, O	1			CoRAP	10000+	11.5

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Strontiumchromat		7789-06-2	232-142-6	P, O		0	5	SVHC	1000 - 10000	11.5
P Red 104	PR 104	12656-85-8	235-759-9	P, O		0	5	SVHC, SIN	1000 - 10000	11.5
P Yellow 34	PY 34	1344-37-2	215-693-7	P, O		0	5	SVHC, SIN	1000 - 10000	11.5
Diisobutylphthalat	DIBP	84-69-5	201-553-2	WM	30			SVHC, Annex XVII, SIN	0 - 10	11.5
Tris(2-chlorethyl)phosphat	TCEP	115-96-8	204-118-5	WM, FM		0	20	SVHC, PMT, SIN	0 - 10	11.5
Triglycidylisocyanurat	TGIC	2451-62-9	219-514-3	I		4	10	SVHC, CoRAP, SIN	100 - 1000	11.5
Pentalead Tetraoxidsulfat		12065-90-6	235-067-7	HS	2			SVHC, SIN	10000 - 100000	11.5
Dimethylzinnbis(2-ethylhexylmercaptoacetat)		57583-35-4	260-829-0	HS	4			*	1000 - 10000	11.5
Glycerintriacetat		102-76-1	203-051-9	WM	10			PMT	10000 - 100000	11.5
1,1'-(Isopropyliden)bis[3,5-Dibrom-4-(2,3-Dibrom-2-methylpropoxy)benzol]]		97416-84-7	306-832-3	FM	15			CoRAP	1000 - 10000	11.5
N-Butylbenzolsulfonamid		3622-84-2	222-823-6	WM		10	15	PMT	1000 - 10000	11.5

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Kurzkettige Chlorparaffine	SCCP	85535-84-8	287-476-5	WM, FM		10	15	SVHC, POP, SIN	0 - 10	11
1,2-Benzoldicarbonsäure, Di-C6-8-verzweigte Alkylester, C7-reich	DIHP	71888-89-6	276-158-1	WM		10	40	SVHC		11
1,2-Benzoldicarbonsäure, Di-C7-11-verzweigte und lineare Alkylester	DHNUP	68515-42-4	271-084-6	WM		10	40	SVHC		11
Bis(2-methoxyethyl)phthalat	DMEP	117-82-8	204-212-6	WM		0.1	30	SVHC		11
Pentabromdiphenylether	Penta-BDE, PeBDE	32534-81-9	251-084-2	FM	4	2	28	POP		11
Octabromdiphenylether	Octa-BDE, OBDE	32536-52-0	251-087-9	FM		2	28	POP		11
Hexabromcyclododecan	HBCDD	25637-99-4	247-148-4	FM		2	28	SVHC, POP, SIN		11 ⁺
Hexabromcyclododecan	HBCDD	3194-55-6	221-695-9	FM		2	28	SVHC, POP, SIN		11 ⁺
Beta-Hexabromcyclododecan	β-HBCD	134237-51-7	603-802-4	FM		n.a		SVHC, POP, SIN		11 ⁺
Gamma-Hexabromcyclododecan	γ-HBCD	134237-52-8	603-804-5	FM		n.a		SVHC, POP, SIN		11 ⁺
Tetrabrombisphenol A	TBBPA	79-94-7	201-236-9	FM		5	10	CoRAP	1000 - 10000	11

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Cadmium (pyrophor)	Cd	7440-43-9	231-152-8	LS & HS, P		0.01	1	SVHC, Annex XVII, SIN	1000 - 10000	11
Cadmium (nicht-pyrophor)	Cd	7440-43-9	231-152-8	LS & HS, P		0.01	1	SVHC, Annex XVII, SIN	1000 - 10000	11
Cadmiumoxid		1306-19-0	215-146-2	LS & HS, P		0.01	1	SVHC, Annex XVII, SIN	1000 - 10000	11
Kaliumdichromat		7778-50-9	231-906-6	P, O		0	5	SVHC	100 - 1000	11
Natriumdichromat		10588-01-9	234-190-3	P, O		0	5	SVHC, SIN	100 - 1000	11
4,4'-Methylen-bis(2-chloranilin)	MOCA	101-14-4	202-918-9	I		0.01	4	SVHC, SIN	1000 - 10000	11
Rußöl (Anthracenöl)		90640-80-5	292-602-7	I			0.0023	SVHC	10000 - 100000	11
Anthracen Öl		90640-86-1	292-607-4	I				SVHC	100000 - 1000000	11
Cobalt(II,III)-oxid		1308-06-1	215-157-2	I	1			SVHC	1000 - 10000	11
Blei-Stearat dibasisch ; Dioxobis(stearato)triblei		12578-12-0	235-702-8	HS	2			SVHC, SIN	1000+	11
Diocetylzinnbis(2-ethylhexylthioglykolat)		15571-58-1	239-622-4	HS	2			SVHC, SIN	1000 - 10000	11

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Methylzinntris(2-ethylhexylthioglykolat)		57583-34-3	260-828-5	HS	2			CoRAP	1000 - 10000	11
Fettsäuren, C16-18, Bleisalz		91031-62-8	292-966-7	HS	2			SVHC, SIN	1000 - 10000	11
Dibutylzinn-dilaurat		77-58-7	201-039-8	HS	3			SIN	100 - 1000	11
Kieselsäure, Zirkoniumsalz, Cadmiumpigment-umhüllt		102184-95-2	310-077-5	P	5			Annex XVII	100 - 1000	11
Azodicarboxamid	ADC	123-77-3	204-650-8	P, O	0.1			SVHC, SIN	10000 - 100000	11
Phthalsäurediisononylester		68515-48-0	271-090-9	WM		10	35	SVHC, Annex XVII, SIN		11
Styrol		100-42-5	202-851-5	FM				*	1000000 - 10000000	11
1,3-Butadien		106-99-0	203-450-8	FM				*	1000000 - 10000000	11
Acrylonitrile		107-13-1	203-466-5	FM				SIN	1000000 - 10000000	11
Vinylacetat		108-05-4	203-545-4	FM				CoRAP	100000 - 1000000	11
Chlormethan		74-87-3	200-817-4	WM				*	100000 - 1000000	11
Propylenoxid	PO	75-56-9	200-879-2	WM				SVHC, SIN	1000000 - 10000000	11

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Chrom(III)-chromat		24613-89-6	246-356-2	P, O		0	5	SVHC	10 - 100	10.5
4,4'- Diaminodiphenylmethan	MDA	101-77-9	202-974-4	I, O			< 0,1	SVHC, SIN	10000 - 100000	10.5
Orangemennige		1314-41-6	215-235-6	LS & HS, P, O				SVHC, SIN	10000 - 100000	10.5
Bleiazid		13424-46-9	236-542-1	LS & HS, P		0	5	SVHC	10 - 100	10.5
Blei-2,4,6-trinitro-m-phenylendioxid		15245-44-0	239-290-0	LS & HS, P		0	5	SVHC	10 - 100	10.5
2-Methoxyethanol		109-86-4	203-713-7	I, O	<0,1			SVHC	1000 - 10000	10.5
Trichlorethylen	TRI	79-01-6	201-167-4	I, O	<0,1	n.a		SVHC, PMT, SIN	10000 - 100000	10.5
1,2,3-Trichlorpropan		96-18-4	202-486-1	I	<0,1			SVHC, PMT, SIN	1000 - 10000	10.5
Dibutylzinnbis(methylmaleat)		15546-11-9	239-594-3	HS	2			*	100 - 1000	10.5
Dechloran plus	Dechloran plus	13560-89-9	236-948-9	FM	3			SVHC, POP, SIN	100 - 1000	10.5
Triphenylphosphit		101-02-0	202-908-4	HS & OSs	3			CoRAP	1000 - 10000	10.5
2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-4,6-di-tert-pentylphenol	UV-328	25973-55-1	247-384-8	LS		0.1	1	SVHC, SIN	100 - 1000	10.5
Vanadium(V)-oxid		1314-62-1	215-239-8	P				*	10000 - 100000	10.5

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Kupfer(II)-sulfat		7758-98-7	231-847-6	P				*	10000 - 100000	10.5
Octabenzon		1843-05-6	217-421-2	Light & OS		0.2	5	CoRAP	1000+	10.5
Molybdän(VI)-oxid		1313-27-5	215-204-7	FM					10000 - 100000	10.5
2-Ethylhexansäure		149-57-5	205-743-6	FM				CoRAP	10000 - 100000	10.5
N,N-Dimethylformamid	DMF	68-12-2	200-679-5	I, O	0			SVHC, SIN	10000 - 100000	10.5
Dichlormethan		75-09-2	200-838-9	WM				SVHC	10000 - 100000	10.5
1,1-Dichlorethen		75-35-4	200-864-0	WM				*	10000 - 100000	10.5
Arsen(III)-oxid	-	1327-53-3	215-481-4	BS		0.03	0.05	SVHC	100 - 1000	10
Arsen-Verbindungen	-	7778-39-4	231-901-9	BS		0.03	0.05	SVHC	100 - 1000	10
Cadmiumsulfid		1306-23-6	215-147-8	LS & HS, P		0.01	1	SVHC, Annex XVII, SIN	10 - 100	10
Kaliumchromat		7789-00-6	232-140-5	P, O		0	5	SVHC	0 - 10	10
Natriumchromat		7775-11-3	231-889-5	P, O		0	5	SVHC	0 - 10	10
Hydrazin		302-01-2	206-114-9	I, O				SVHC, SIN	1000 - 10000	10

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Tetraethylblei		78-00-2	201-075-4	LS & HS, P				SVHC	1000 - 10000	10
Blei(II)-chlorid		7758-95-4	231-845-5	LS & HS, P				SIN	1000+	10
Tribleidioxidphosphonat		12141-20-7	235-252-2	LS & HS, P				SVHC, SIN	1000 - 10000	10
Quecksilber		7439-97-6	231-106-7	O		0.1	0.3	SVHC, Annex XVII, SIN	100 - 1000	10
Methylmethacrylat		80-62-6	201-297-1	O				CoRAP	100000 - 1000000	10
Octylzintris(2-ethylhexyl)mercaptoacetat		27107-89-7	248-227-6	HS	2			CoRAP	1000 - 10000	10
Pigment Red 53 : 1 Ba-Salz eines Monoazosäurefarbstoffs	PR 53: 1	5160-02-1	225-935-3	P	2			CoRAP	1000 - 10000	10
Pigment Yellow 74	PY 74	6358-31-2	228-768-4	P	2			CoRAP	1000 - 10000	10
Tris(1,3-dichlorisopropyl)phosphat		13674-87-8	237-159-2	FM				*	1000 - 10000	10
Resorcin		108-46-3	203-585-2	HS & OSs, FM				SVHC, CoRAP, SIN	1000 - 10000	10
Cobaltbis(2-ethylhexanoat)		136-52-7	205-250-6	O				*	1000 - 10000	10
Terphenyl, hydriert		61788-32-7	262-967-7	O				SVHC	1000 - 10000	10

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
2,2',2"-Nitrilotriethanol		102-71-6	203-049-8	OS				CoRAP	100000 - 1000000	10
Siliciumdioxid, kolloidal		7631-86-9	231-545-4	OS				CoRAP	1000000+	10
1,4-Dichlorbenzol		106-46-7	203-400-5	FM				*	1000 - 10000	10
1,2-Epoxybutan		106-88-7	203-438-2	FM					1000+	10
Phenol		108-95-2	203-632-7	FM				CoRAP	1000000 - 10000000	10
1,4-Dioxan		123-91-1	204-661-8	FM				PMT	1000+	10
Tributylphosphat		126-73-8	204-800-2	FM				*	1000 - 10000	10
Triäthylphosphat		25155-23-1	246-677-8	FM				SVHC, CoRAP, SIN	1000+	10
Diphenylamin, octyliert		68411-46-1	270-128-1	AO		0.1	0.4	CoRAP	10000 - 100000	10
Borsäure	H3BO3	10043-35-3; 11113-50-1	233-139-2; 234-343-4	FM	5.5		8	SVHC		9.5
Borsäure	H3BO3	11113-50-1	234-343-4	FM	< 5,5		8	SVHC		9.5
Cadmiumchlorid	CdCl	10108-64-2	233-296-7	LS & HS, P		0.01	1	SVHC, Annex XVII, SIN	1 - 10	9.5
Ammoniumdichromat		7789-09-5	232-143-1	P, O		0	5	SVHC		9.5

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Calciumchromat		13765-19-0	237-366-8	P, O		0	5	SIN		9.5
Bleichromat		7758-97-6	231-846-0	P, O		0	5	SVHC		9.5
Chrom(VI)-oxidchlorid		14977-61-8	239-056-8	P, O		0	5	SIN		9.5
Cobalt(II)-acetat		71-48-7	200-755-8	P, O				SVHC	100 - 1000	9.5
Formaldehyd, oligomeres Reaktionsprodukt mit Anilin	MDA	25214-70-4	500-036-1	I, O				SVHC	100 - 1000	9.5
Blei(II)-acetat		301-04-2; 6080-56-4	206-104-4; 612-031-2	LS & HS, P		0	5	*		9.5
Bleiacetat, basisch		1335-32-6	215-630-3	LS & HS, P		0	5	*		9.5
Bleidistearat		7428-48-0	231-068-1	LS & HS, P		0	5	*		9.5
Blei(II)-sulfat		7446-14-2	231-198-9	LS & HS, P		0	5	SVHC		9.5
Bleiphosphat		7446-27-7	231-205-5	LS & HS, P		0	5	*		9.5
Phosphonsäure		13453-65-1	603-832-8	LS & HS, P		0	5	*		9.5
Blei(II)methansulfonat		17570-76-2	401-750-5	LS & HS, P		0	5	SVHC	Tonnage Data Confidential	9.5
Bleihexafluorsilikat		25808-74-6	247-278-1	LS & HS, P		0	5	*		9.5
Naphtensäuren, Bleisalze		61790-14-5	263-109-4	LS & HS, P		0	5	*		9.5
Antimontrioxid	SbO3	1309-64-4	215-175-0	FM	8			CoRAP, SIN		9.5
Schweflige Säure, Bleisalz		62229-08-7	263-467-1	HS	2			SVHC	0 - 10	9.5

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Pigment Red 57 : 1 Ca-Salz eines Monoazosäurefarbstoffs	PR 57 : 1	5521-31-3	226-866-1	P	2			CoRAP	100 - 1000	9.5
Pigment Yellow 35 ; Cadmiumzinksulfidgelb		8048-07-5	232-466-8	P	5			Annex XVII		9.5
Pigment Red 108	PR 108	58339-34-7	261-218-1	P	5			Annex XVII		9.5
Reaktionsmasse aus Tris(2-Chlorpropyl)phosphat und Tris(2-Chlor-1-methylethyl)phosphat und Phosphorsäure, Bis(2-Chlor-1-methylethyl)2-Chlorpropylester und Phosphorsäure, 2-Chlor-1-methylethyl-bis(2-Chlorpropyl)ester			911-815-4	WM, FM	15			CoRAP		9.5
2,2'-Methylenbis(4-methyl-6-tert-butylphenol)		119-47-1	204-327-1	AO	0.5			CoRAP	1000 - 10000	9.5
Cyanursäure		108-80-5	203-618-0	FM				PMT	10000 - 100000	9.5
2,2-Bis(bromomethyl)propan-1,3-diol		3296-90-0	221-967-7	FM					100 - 1000	9.5
Chlorierte Paraffinwachse und Kohlenwasserstoffwachse		63449-39-8	264-150-0	WM, FM				SIN	10000 - 100000	9.5
Diundecylphthalat, verzweigt und linear		85507-79-5	287-401-6	WM				CoRAP	10000 - 100000	9.5

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
6,6'-Di-tert-butyl-4,4'-thiodi-m-kresol		96-69-5	202-525-2	AO	0.001			CoRAP	1000 - 10000	9.5
2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-p-kresol		2440-22-4	219-470-5	Light & OS		0.0015	0.5	CoRAP	1000 - 10000	9.5
Allylglycidylether		106-92-3	203-442-4	FM				*	100 - 1000	9.5
Butylglycidylether		2426-08-6	219-376-4	FM				*	100 - 1000	9.5
2,5-Di-tert-pentylhydrochinon		79-74-3	201-222-2	AO		0.5	1.5	CoRAP	100 - 1000	9.5
Blei(II)-acetat		6080-56-4	612-031-2	LS & HS, P		0	5	*		9.5
Dicumylperoxid	DCUP	80-43-3	201-279-3	SI				CoRAP	10000 - 100000	9.5
Pigment Green 50 Spinell, Co, Ti, Ni, Zn-Oxid	PG 50	68186-85-6	269-047-4	P				*	100+	9.5
Bleiarsenat	-	7784-40-9	232-064-2	BS		1	4	SVHC		9
Bleiarsenat; Arsenwasserstoff; Triethylarsenat	-	7784-42-1	232-066-3	BS				*	10 - 100	9
Bleiarsenat	-	15606-95-8	427-700-2	BS		1	4	SVHC		9
Cadmiumcyanid	CdCN	542-83-6	208-829-1	LS & HS, P		0.01	1	Annex XVII		9
Cadmiumfluorid	CdF	7790-79-6	232-222-0	LS & HS, P		0.01	1	SVHC		9
Cadmiumformiat		4464-23-7	224-729-0	LS & HS, P		0.01	1	Annex XVII		9

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Cadmiumiodid		7790-80-9	232-223-6	LS & HS, P		0.01	1	Annex XVII		9
Cadmiumhexafluorsilicat		17010-21-8	241-084-0	LS & HS, P		0.01	1	Annex XVII		9
Cadmiumsulfat	CdSO4	10124-36-4	233-331-6	LS & HS, P		0.01	1	SVHC, Annex XVII, SIN		9
Bariumchromat		10294-40-3	233-660-5	P, O					10 - 100	9
Bleihydroxidkarbonat		1319-46-6	215-290-6	LS & HS, P				SVHC	10 - 100	9
Blei(II)-oxid (Bleioxid) ; Blei		1317-36-8;7439-92-1	215-267-0	LS & HS, P		1	3	SVHC		9
Blei(II)-oxid		1317-36-8	215-267-0	LS & HS, P		1	3	SVHC		9
Blei		7439-92-1	231-100-4	LS & HS, P		1	3	SVHC		9
Blei(II)-acetat		301-04-2	206-104-4	LS & HS, P		1	3	SVHC		9
Blei(II)-acetat		6080-56-4	612-031-2	LS & HS, P		1	3	*		9
Nonylphenol, Isomere	NP	25154-52-3	246-672-0	HS & OS, AO		<,1	1	SVHC, Annex XVII, SIN		9
4-Nonylphenol, verzweigt	NP	84852-15-3	284-325-5	HS & OS, AO		<,1	1	SVHC		9
Nonylphenol	NPEO		500-024-6	HS & OS, AO		<,1	1	SVHC		9

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
4-Nonylphenol, unverzweigt	NPEO	104-40-5	203-199-4	HS & OS, AO		<,1	1	SVHC, PMT, SIN		9
2-[2-[2-[2-(4-Nonylphenoxy)-ethoxy]ethoxy]ethoxy]ethanol	NPEO	7311-27-5	230-770-5	HS & OS, AO		<,1	1	SVHC		9
Nonylphenoethoxylat, Isomere, Nonylphenolpolyglykoether	NPEO	9016-45-9	500-024-6	HS & OS, AO		<,1	1	SVHC		9
Nonoxinol	NPEO	26027-38-3	500-045-0	HS & OS, AO		<,1	1	SVHC		9
NONOXYNOL-9	NPEO	26571-11-9	247-816-5	HS & OS, AO		<,1	1	SVHC		9
Isononylphenol, ethoxyliert	NPEO	37205-87-1	609-346-2	HS & OS, AO		<,1	1	SVHC		9
Nonylphenol, verzweigt, ethoxyliert	NPEO	68412-54-4	500-209-1	HS & OS, AO		<,1	1	SVHC		9
4-Nonylphenol, verzweigt, ethoxyliert	NPEO	127087-87-0	500-315-8	HS & OS, AO		<,1	1	SVHC		9
4-tert-Octylphenol	OP / OPEO	140-66-9	932-665-6	HS & OS, AO		3	4	SVHC, PMT, SIN		9
Perfluoroktansäure und ähnliche Substanzen	PFOA	Gruppeneintrag	206-397-9	I		0.1	1	SVHC		9
Perfluoroktansäure	PFOA	335-67-1	206-397-9	I		0.1	1	SVHC		9
Perylen-3,4:9,10-tetracarboxydiimid		81-33-4	201-344-6	I	2			CoRAP	10 - 100	9

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Dechloran plus	Dechloran plus	13560-89-9; 135821-03-3; 135821-74-8	236-948-9	FM	3			SVHC		9
Dechloran plus	Dechloran plus	135821-03-3		FM	4			POP-Kandidat		9
6,6'-Di-tert-butyl-4,4'-butylidendi-m-kresol		85-60-9	201-618-5	OS, AO	0.5			CoRAP	100 - 1000	9
Butyl- hydroxy- toluol)	BHT	128-37-0	204-881-4	AO					1000 - 10000	9
1,1'-(Isopropyliden)bis[3,5-Dibrom-4-(2,3-Dibromopropoxy)benzol]]		21850-44-2	244-617-5	FM				CoRAP	1000 - 10000	9
Calciumacetylacetonat		19372-44-2	243-001-3	OS				CoRAP	1000 - 10000	9
Phenol, 4-Methyl-, Reaktionsprodukte mit Dicyclopentadien und Isobutylene		68610-51-5	271-867-2	OS				CoRAP	1000 - 10000	9
Diethylenglykoldibenzoat		120-55-8	204-407-6	WM				CoRAP	1000 - 10000	9
Dipropylenglykoldibenzoat, Isomergemisch		27138-31-4	248-258-5	WM				CoRAP	1000 - 10000	9
Diisodecylazelat		28472-97-1	249-044-4	WM				CoRAP	1000 - 10000	9
Resorcinoldiglycidylether		101-90-6	202-987-5	FM					10 - 100	9

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Dibutylzinndichlorid	DBTC	683-18-1	211-670-0	Ligh & OS				SVHC	10 - 100	9
Octocilene		6197-30-4	228-250-8	LS				CoRAP	1000 - 10000	9
Di-tert-butylperoxid	DTBP	110-05-4	203-733-6	SI				CoRAP	1000 - 10000	9
Bis-(2-tert-butylperoxyisopropyl)benzol	DIPP	25155-25-3	246-678-3	SI				CoRAP	1000 - 10000	9
tert-Butylperoxybenzoat	TBPB	614-45-9	210-382-2	SI				CoRAP	1000 - 10000	9
1,3-Di(tert-butylperoxy)-3,3,5-trimethyl- cyclohexan	TMCH	6731-36-8	229-782-3	SI				CoRAP	1000 - 10000	9
Arsen	As	7440-38-2	231-148-6	BS		0.03	0.05		100 - 1000	8.5
Arsen(V)-oxid	-	1303-28-2	215-116-9	BS		0.03	0.05	SVHC		8.5
Arsen-Verbindungen	-	58-36-6	200-377-3	BS		0.03	0.05			8.5
Tributylzinnoxid	TBTO	56-35-9	200-268-0	I			0.67	SVHC		8.5
Bleiphthalat		16183-12-3	700-989-5	LS & HS, P		0	5	CoRAP		8.5
Phenylquecksilberacetat		62-38-4	200-532-5	O		0.1	0.3	SVHC		8.5
Quecksilber(II)-chlorid		7487-94-7	231-299-8	O		0.1	0.3			8.5
Fentinacetat		900-95-8	212-984-0	O		0.001	0.3			8.5
Benzo(a)pyren	B[a]P	50-32-8	200-028-5	I		0.0087	0.053	SVHC		8.5
Benz(a)anthracen	BaA	56-55-3	200-280-6	I			0.0021	SVHC		8.5

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Anthracen		120-12-7	204-371-1	I	>,00005*	n.a	0.0023	SVHC, PMT, SIN		8.5
Benzo(k)fluoranthene	BkFA	207-08-9	205-916-6	I			0.00075	SVHC		8.5
Chrysen		218-01-9	205-923-4	I			0.032	SVHC		8.5
Anthracenöl, Anthracenpaste		90640-81-6	292-603-2	I			0.0023	SVHC		8.5
Anthracen Öl		90640-82-7	292-604-8	I			0.0023	SVHC		8.5
Anthracen Öl		91995-15-2	295-275-9	I			0.0023	SVHC		8.5
Anthracen Öl		91995-17-4	295-278-5	I			0.0023	SVHC		8.5
4,4'-Methylenbis(2,6-di-tert-butylphenol)		118-82-1	204-279-1	AO				CoRAP	100 - 1000	8.5
1,3-Dihydro-4(oder-5)-methyl-2H-benzimidazol-2-thion, Zinksalz (2:1)		61617-00-3	262-872-0	AO				CoRAP	100 - 1000	8.5
Ethylenbistetrabromophtalimide		32588-76-4	251-118-6	FM				CoRAP	100 - 1000	8.5
1-[(2-Chlor-4-nitrophenyl)azo]-2-naphthol		2814-77-9	220-562-2	P				CoRAP	100 - 1000	8.5
2-[(4-Chlor-2-nitrophenyl)azo]-N-(2-Chlorphenyl)-3-oxobutyramid		6486-23-3	229-355-1	P				CoRAP	100 - 1000	8.5
1-Phenylazo-2-naphthol		842-07-9	212-668-2	WM					0 - 10	8.5
N-Phenyl-1-naphthylamin		90-30-2	201-983-0	AO				CoRAP	100 - 1000	8.5
Oxybenzon		131-57-7	205-031-5	LS					100 - 1000	8.5

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
2,4-Dihydroxybenzophenon		131-56-6	205-029-4	LS				SIN	100 - 1000	8.5
Di-tert-amylperoxid	DTAP	10508-09-5	234-042-8	SI				CoRAP	100 - 1000	8.5
3,6,9-Triethyl-3,6,9-trimethyl-1,4,7-triperoxyan	EMPN	24748-23-0	429-320-2	SI				CoRAP	100 - 1000	8.5
Bleiarsenat; Arsenwasserstoff; Triethylarsenat	-	7784-40-9;7784-42-1;15606-95-8	232-064-2;232-066-3;427-700-2	BS						8
Chromsäure		7738-94-5	231-801-5	P, O				SVHC		8
Dichromsäure		13530-68-2	236-881-5	P, O				SVHC		8
Zinchromat		13530-65-9	236-878-9	P, O						8
	PY 36	37300-23-5	609-398-6	P, O						8
Di-Natriumtetraborat-Decahydrat	Borax	1303-96-4	215-540-4	OS, AS, FM, O	5			SVHC		8
Di-Natriumtetraborat-Pentahydrat	Borax	12179-04-3	215-540-4	OS, AS, FM, O	5			SVHC		8
Hydrazinhydrat		7803-57-8	616-584-0	I, O				*		8
Hydrazinhydrat		10217-52-4	600-285-7	I, O				*		8
Tetramethylblei		75-74-1	200-897-0	LS & HS, P				*		8
Blei(II)-stearat / Bleidistearat		1072-35-1	214-005-2	LS & HS, P				*		8
Blei(II)-carbonat		598-63-0	209-943-4	LS & HS, P				SVHC		8

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
Triphenylzinn-Hydroxid		76-87-9	200-990-6	O						8
Tributylzinnchlorid		1461-22-9	215-958-7	O				SIN		8
Hexamethylendiisocyanat		15166-06-0	206-397-9	O				SVHC		8
Benzo(e)pyren		192-97-2	205-892-7	I				SVHC		8
Benzo(b)fluoranthren		205-99-2	205-911-9	I				SVHC		8
Benzo(j)fluoranthren		205-82-3	205-910-3	I				SVHC		8
5-Chlor-2-(2,4-dichlorphenoxy)-phenol	Triclosan	3380-34-5	222-182-2	BS			0.3	CoRAP, PMT, SIN	0 - 10	8
Triphenylphosphat		115-86-6	204-112-2	WM, FM	2			CoRAP, SIN		8
1,2-Epoxy-4-Epoxyethylcyclohexan 4-Vinylcyclohexen diepoxid		106-87-6	203-437-7	FM				*		8
N-Phenyl-2-naphthylamin		135-88-6	205-223-9	FM				*		8
1,5-Naphthylendiamin		2243-62-1	218-817-8	FM				*		8
Mirex	MIREX	2385-85-5	219-196-6	FM				POP-Kandidat		8
N-(4-((2-Hydroxy-5-methylphenyl)azo)phenyl)acetamid		2832-40-8	220-600-8	FM				*		8
Imidazole		288-32-4	206-019-2	FM				CoRAP		8

Stoffname	Akronym	CAS	EC	Additivart	Konzentration (Gewichtsanteil) Typ	Konzentration Min	Konzentration Max	Nennung	Tonnage (t/a)	Punkte
1,1,2-Trichlorethan		79-00-5	201-166-9	WM				Annex XVII, PMT		8
2-(Benzotriazol-2-yl)-4,6-Diter-Butylphenol	UV-320		223-346-6	LS				SVHC		8
2,4-Diter-Butyl-6-(5-Chlorbenzotriazol-2-yl)phenol	UV-327		223-383-8	LS				SVHC		8
2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-4-(tert-butyl)-6-(sec-butyl)phenol	UV-350	36437-37-3	253-037-1	LS				SVHC		8
Pigment Yellow 150 Azo-Metallkomplex (Ni)	PY 150	68511-62-6	270-944-8	P				*		8
Tetrabromdiphenylether		40088-47-9	254-787-2	FM				POP		8
Hexabromdiphenylether		36483-60-0	253-058-6	FM				POP		8
Heptabromdiphenylether		32534-81-9						POP		8
Iso(C10-C14)alkyl (3,5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenyl)methylthioacetat		118832-72-7	404-800-4	AO				CoRAP	0 - 10	7.5
Tributylstannan		688-73-3	211-704-4	O				SIN		7
Dinatriummetasilikat		6834-92-0	229-912-9	O				CoRAP		7
1,1'-Iminodipropan-2-ol		110-97-4	203-820-9	OS				CoRAP		7

Quelle: (Ramboll)

4.3 Als relevant identifizierte Stoffe bezüglich Mengen und Relevanz der Polymere in wichtigen Recyclingprozessen

Wie mit dem BMU abgesprochen soll in diesem Schritt die Priorisierung anhand der Menge und der Relevanz des stoffenthaltenden Kunststoffs erfolgen. Folgende Polymertypen sind dabei betrachtet worden: PVC, EPS/XPS, PE, PP, PS und ABS.

Dementsprechend wurden alle gelisteten Stoffe auch anhand dieser Parameter sortiert. Im weiteren Verlauf sollen die Einträge für die jeweiligen Kunststoffpolymerarten gezeigt werden. Dies dient der Übersichtlichkeit. Die Excelliste ermöglicht es, die Einträge je nach Polymertyp (nicht nur die oben genannten) zu filtern.

Anhand Tabelle 10 des vorherigen Kapitels ist ersichtlich, dass eine Vielzahl (ca. 800) an Stoffen im Rahmen dieses Projektes identifiziert worden sind. In diesem Arbeitsschritt soll, mit dem Ziel einen besseren Überblick zu erhalten, eine Gruppierung der Stoffe vorgenommen werden. Diese Gruppierung wurde unter Berücksichtigung der chemischen Eigenschaften der jeweiligen Stoffe durchgeführt. Wichtig ist hervorzuheben, dass die Einteilung keine Aussage über die Funktion des Stoffes als Kunststoff-Additiv trifft. So werden z.B. verschiedene Metalle sowohl als Farbstoff (vor allem Chromate) und auch als Stabilisator (UV- bzw. Bio-) verwendet.

Dieses Konzept wird auch in anderer Anwendung von der ECHA angewendet²⁴ („Stoffgruppen- und Analogiekonzept“), wobei in dieser Anwendung die Vorhersage der Stoffeigenschaften durch Betrachtung von analogen Stoffen (Ausgangsstoffe) im Fokus steht.

In der nachfolgenden Tabelle 11 sind die verschiedenen Gruppen der projektrelevanten Stoffe gezeigt, die aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften zusammengefasst wurden. Dabei ist zu beachten, dass sowohl Obergruppen (z.B. Metalle, organische Stoffe) als auch Untergruppen (z.B. halogenierte organische Stoffe) gewählt wurden.

Tabelle 11: Chemische Obergruppen der projektrelevanten Stoffe

Gruppe	Metallische Stoffe (Salze)	Halb-metallische Stoffe	Organo-metallische Verbindungen	Organische Stoffe	Halogenierte organische Stoffe
Beispiele	Cd, Pb, Cr, Zn, Ti	Borate,	Organozinn-Stoffe und viele Pigmente	Phthalate etc.	SCCP & MCCP etc.

Quelle: (Ramboll)

In den folgenden Einzelkapiteln wird hauptsächlich auf die genannten Stoffgruppen in Form einer polymerspezifischen Tabelle eingegangen. Ergänzend dazu werden die Einzelstoffe auch in einer umfassenden Tabelle erfasst. Zudem werden auch grundlegende Informationen über den Kunststoff gegeben.

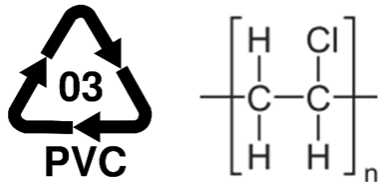
4.3.1 PVC

Das Polymer Polyvinylchlorid (PVC) wird durch radikalische oder ionische Polymerisation aus dem Monomer Vinylchlorid erzeugt. PVC ist ein amorpher thermoplastischer Kunststoff, der in seiner Grundstruktur weiß, hart und spröde ist. Es wird grundsätzlich unterschieden zwischen

²⁴ <https://echa.europa.eu/de/support/registration/how-to-avoid-unnecessary-testing-on-animals/grouping-of-substances-and-read-across>

Hart- und Weich-PVC, wobei davon unabhängig Eigenschaften wie Beständigkeit, schlechte Entflammbarkeit und gute elektrische Isolation erhalten bleiben. Um PVC formbar zu machen, werden als Weichmacher meist Phthalate verwendet. Durch Zugabe von anderen Additiven lässt sich der Stoff in seinen weiteren Eigenschaften (Farbe etc.) beeinflussen (PlasticsEurope, 2015b).

Abbildung 1: Recycling-Code und Strukturformel von PVC



Quelle: (Ramboll)

Im Rahmen des Projektes, wurden in diesem Teilschritt die Einträge auf eine Benutzung in PVC sortiert. Bei der Betrachtung der Daten fällt auf, dass dieser Polymertyp mit einer Vielzahl von Stoffen in Verbindung gebracht wird. So sind insgesamt 147 Stoffe identifiziert worden. Hier sind vor allem Phthalate zu nennen. Diese sind zum Teil bereits im Rahmen von REACH als besonders besorgniserregende Stoffe identifiziert worden. Ein anderer PVC-spezifischer Weichmacher (Tris(2-ethylhexyl)trimellitat) wird momentan im Rahmen des CoRAP-Verfahrens durch das österreichische Umweltbundesamt bewertet. In Tabelle 12 sind die in PVC enthaltenen projektrelevanten Stoffe gezeigt (sortiert nach chemischen Obergruppen). Dies wird ergänzt durch Tabelle 13, welche die Stoffe inklusive CAS und Wertung zeigt.

Tabelle 12: Chemische Obergruppen der projektrelevanten Stoffe im Polymer Polyvinylchlorid

Gruppe	Metallische Stoffe (Salze)	Halb-metallische Stoffe	Organo-metallische Verbindungen	Organische Stoffe	Halogenierte organische Stoffe
Stabilisator (Wärme)	Cd/Pb-Salze		Verbindungen mit Pb, Zn, Sn	Phosphonsäureester, Phenole (Nonyl-)	
Stabilisator (Licht)	Cd/Pb-Salze, Zinkoxid, Titandioxid		Verbindungen mit Pb, Zn, Sn	Ruß, 1-Isopropyl-2,2-dimethyltrimethylendiisobutyrat, Octabenzon, 2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-p-kresol, Bumetrizol, UV-328	
Stabilisator (Andere)	Kalziumoxid	Borax	Zn-Verbindungen	Phenole (Nonyl-)	
Antistatikum	Zinkoxid	Borax		Ruß, Sulfonsäuren, C14-17-sec-Alkan-, Natriumsalz	
AO				BPA, Phenole (Octyl-, Nonyl-), Propionate	
Weichmacher (P)				Phthalate (u.A. DINP, DIDP, DEHP, DBP), weitere Einzelsubstanzen (u.a. BPA, Tris(2-ethylhexyl)-trimellitat)	Chlorierte Paraffine (SCCP, MCCP,)
Flammschutzmittel (FM)	Zinkoxid, Molybdän(VI)-oxid	Borax, Antimontrioxid		Ver. Einzelsubstanzen (u.A. 2-Ethylhexansäure)	Chlorierte Paraffine (SCCP, MCCP), Chlorierte Paraffinwachs und Kohlenwasserstoffwachs
Nukleierungsmittel	Fettsäuren, C8-10, Zinksalze				

Gruppe	Metallische Stoffe (Salze)	Halbmetallische Stoffe	Organometallische Verbindungen	Organische Stoffe	Halogenierte organische Stoffe
Pigmente (P)	Ver. Co/Cr/Cd/Ni/Pb-Verbindungen, Zinkoxid, Titandioxid			Ruß, mehrere organische Pigmente (Azoverbindungen)	
Intermediat				N,N-Dimethylformamid	Trichlorethylen
Stabilisator (Bio-)		As			Triclosan

Quelle: (Ramboll)

In der nachfolgenden Tabelle 13 sind die Stoffe mit CAS/EC-Nummer und der jeweiligen Punktebewertung aus der Priorisierung (Kapitel 4.2.3) gezeigt.

Tabelle 13: Prioritäre Stoffe, die als PVC-Additiv genannt werden

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
519.02	Diisononylphthalat	DINP	28553-12-0	14
523.00	Diisodecylphthalat	DIDP	68515-49-1	14
11.00	Bis(2-ethylhexyl)phthalat	DEHP	117-81-7	13.5
491.00	Ruß		1333-86-4	13
53.00	Dibutylphthalat	DBP	84-74-2	13
521.00	Bis(2-propylheptyl)phthalat		53306-54-0	13
49.00	Zinkkaliumchromat		11103-86-9	12.5
56.02	Di-Natriumtetraborat	Borax	1330-43-4	12.5
232.00	Zinkoxid		1314-13-2	12.5
272.00	Tris(2-ethylhexyl)trimellitat		3319-31-1	12.5
505.00	Bis(2-ethylhexyl)adipat		103-23-1	12.5
533.00	1,2-Bis(pentabromphenyl)ethan		84852-53-9	12.5
492.00	Titan(IV)-oxid		13463-67-7	12
84.00	Mittelkettige chlorierte Paraffine	MCCP	85535-85-9	12
155.00	Blei(II)-sulfat		12202-17-4	12
503.00	Triethylcitrat		77-93-0	12
511.00	Diallylphthalat		131-17-9	12
517.00	Diisotridecyladipat		26401-35-4	12

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
522.00	1,2 Benzoldicarbonsäure, di-C11-14- verzweigte Alkylester, C13-reichhaltig		68515-47-9	12
10.00	Benzylbutylphthalat	BBP	85-68-7	11.5
230.00	Dimethylzinnbis(2-ethylhexylmercaptoacetat)		57583-35-4	11.5
12.00	Bisphenol A	BPA	80-05-7	11.5
32.01	"Chromtrioxid	PG 17	1333-82-0	11.5
38.00	Strontiumchromat		7789-06-2	11.5
32.02	"Chromtrioxid	PG 17	1308-38-9	11.5
40.00	Pigment Red 104	PR 104	12656-85-8	11.5
41.00	Pigment Yellow 34	PY 34	1344-37-2	11.5
55.00	Diisobutylphthalat	DIBP	84-69-5	11.5
130.00	Tris(2-chlorethyl)phosphat	TCEP	115-96-8	11.5
154.00	Pentalead Tetraoxidsulfat		12065-90-6	11.5
263.00	Glycerintriacetat		102-76-1	11.5
267.00	1,1'-(Isopropyliden)bis[3,5-Dibrom-4-(2,3- Dibrom-2-methylpropoxy)benzol]]		97416-84-7	11.5
8.00	1,2-Benzoldicarbonsäure, Di-C6-8-verzweigte Alkylester, C7-reich	DIHP	71888-89-6	11
9.00	1,2-Benzoldicarbonsäure, Di-C7-11- verzweigte und lineare Alkylester	DHNUP	68515-42-4	11
2.00	Kurzkettige Chlorparaffine	SCCP	85535-84-8	11
13.00	Bis(2-methoxy-ethyl)phthalat	DMEP	117-82-8	11
21.00	Cadmium (pyrophor)	Cd	7440-43-9	11
22.00	Cadmium (nicht-pyrophor)	Cd	7440-43-9	11
29.00	Cadmiumoxid		1306-19-0	11
33.00	Kaliumdichromat		7778-50-9	11
35.00	Natriumdichromat		10588-01-9	11
274.00	Azodicarboxamid	ADC	123-77-3	11
257.00	Kieselsäure, Zirkoniumsalz, Cadmiumpigment- umhüllt		102184-95-2	11
156.00	Blei-Stearat dibasisch ; Dioxobis(stearato)triblei		12578-12-0	11
159.00	Diocetylzinnbis(2-ethylhexylthioglykolat)		15571-58-1	11
164.00	Methylzinntriis(2-ethylhexylthioglykolat)		57583-34-3	11
168.00	Fettsäuren, C16-18, Bleisalz		91031-62-8	11

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
226.00	Dibutylzinndilaurat		77-58-7	11
519.01	Phthalsäurediisononylester		68515-48-0	11
550.00	Molybdän(VI)-oxid		1313-27-5	10.5
39.00	Chrom(III)-chromat		24613-89-6	10.5
63.00	Orangemennige		1314-41-6	10.5
74.00	Bleiazid		13424-46-9	10.5
76.00	Blei-2,4,6-trinitro-m-phenylendioxid		15245-44-0	10.5
340.00	2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-4,6-di-tert-pentylphenol	UV-328	25973-55-1	10.5
473.00	Octabenzon		1843-05-6	10.5
127.00	Trichlorethylen	TRI	79-01-6	10.5
158.00	Dibutylzinnbis(methylmaleat)		15546-11-9	10.5
227.00	Triphenylphosphit		101-02-0	10.5
553.00	2-Ethylhexansäure		149-57-5	10.5
572.00	N,N-Dimethylformamid	DMF	68-12-2	10.5
5.00	Arsen(III)-oxid	-	1327-53-3	10
6.01	Arsen-Verbindungen	-	7778-39-4	10
31.00	Cadmiumsulfid		1306-23-6	10
183.00	Pigment Red 53 :1 Ba-Salz eines Monoazosäurefarbstoffs	PR 53: 1	5160-02-1	10
36.00	Kaliumchromat		7789-00-6	10
44.00	Natriumchromat		7775-11-3	10
61.00	Tetraethylblei		78-00-2	10
72.00	Blei(II)-chlorid		7758-95-4	10
73.00	Tribleidioxidphosphonat		12141-20-7	10
192.00	Pigment Yellow 74	PY 74	6358-31-2	10
162.00	Octylzintris(2-ethylhexyl)mercaptoacetat		27107-89-7	10
67.00	Bleiacetat, basisch		1335-32-6	9.5
71.00	Bleiphosphat		7446-27-7	9.5
81.00	Bleihexafluorsilikat		25808-74-6	9.5
23.00	Cadmiumchlorid	CdCl	10108-64-2	9.5
34.00	Ammoniumdichromat		7789-09-5	9.5
37.00	Calciumchromat		13765-19-0	9.5

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
43.00	Bleichromat		7758-97-6	9.5
50.00	Chrom(VI)-oxidchlorid		14977-61-8	9.5
66.00	Blei(II)-acetat		301-04-2; 6080-56-4	9.5
69.00	Bleidistearat		7428-48-0	9.5
70.00	Blei(II)-sulfat		7446-14-2	9.5
75.00	Phosphonsäure		13453-65-1	9.5
79.00	Blei(II)methansulfonat		17570-76-2	9.5
83.00	Naphtensäuren, Bleisalze		61790-14-5	9.5
132.00	Antimontrioxid	SbO3	1309-64-4	9.5
189.00	Pigment Red 57 :1 Ca-Salz eines Monoazosäurefarbstoffs	PR 57 : 1	5521-31-3	9.5
237.00	Pigment Yellow 35 ; Cadmiumzinksulfidgelb		8048-07-5	9.5
243.00	Pigment Red 108	PR 108	58339-34-7	9.5
534.00	2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-p-kresol		2440-22-4	9.5
165.00	Schweflige Säure, Bleisalz		62229-08-7	9.5
268.00	Reaktionsmasse aus Tris(2-Chlorpropyl)phosphat und Tris(2-Chlor-1-methylethyl)phosphat und Phosphorsäure, Bis(2-Chlor-1-methylethyl)2-Chlorpropylester und Phosphorsäure, 2-Chlor-1-methylethyl-bis(2-Chlorpropyl)ester		not listed	9.5
330.00	Chlorierte Paraffinwaxse und Kohlenwasserstoffwaxse		63449-39-8	9.5
682.00	Blei(II)-acetat		6080-56-4	9.5
795.00	Pigment Green 50 Spinell, Co, Ti, Ni, Zn-Oxid	PG 50	68186-85-6	9.5
7.01	Bleiarsenat	-	7784-40-9	9
7.02	Bleiarsenat; Arsenwasserstoff; Triethylarsenat	-	7784-42-1	9
7.03	Bleiarsenat	-	15606-95-8	9
24.00	Cadmiumcyanid	CdCN	542-83-6	9
25.00	Cadmiumfluorid	CdF	7790-79-6	9
26.00	Cadmiumformiat		4464-23-7	9
27.00	Cadmiumiodid		7790-80-9	9
28.00	Cadmiumhexafluorsilicat		17010-21-8	9
30.00	Cadmiumsulfat	CdSO4	10124-36-4	9

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
64.01	Bleihydroxidkarbonat		1319-46-6	9
65.00	Blei(II)-oxid (Bleioxid) ; Blei		1317-36-8;7439-92-1	9
65.01	Blei(II)-oxid		1317-36-8	9
65.02	Blei		7439-92-1	9
66.01	Blei(II)-acetat		301-04-2	9
66.02	Blei(II)-acetat		6080-56-4	9
98.00	"Nonylphenol, Isomere		25154-52-3;84852-15-3	9
98.01	Nonylphenol, Isomere	NP	25154-52-3	9
98.02	4-Nonylphenol, verzweigt	NP	84852-15-3	9
99.01	4-Nonylphenol, unverzweigt	NPEO	104-40-5	9
99.02	2-[2-[2-[2-(4-Nonylphenoxy)-ethoxy]ethoxy]ethoxy]-ethanol	NPEO	7311-27-5	9
99.09	Nonoxinol	NPEO	26027-38-3	9
99.10	NONOXYNOL-9	NPEO	26571-11-9	9
99.16	Isononylphenol, ethoxyliert	NPEO	37205-87-1	9
99.20	Nonylphenol, verzweigt, ethoxyliert	NPEO	68412-54-4	9
99.24	4-Nonylphenol, verzweigt, ethoxyliert	NPEO	127087-87-0	9
100.01	4-tert-Octylphenol	OP / OPEO	140-66-9	9
45.00	Bariumchromat		10294-40-3	9
170.00	Perylen-3,4:9,10-tetracarboxydiimid		81-33-4	9
32.00	"Chrom, Chromverbindungen / Pigment Green 17 Chromoxid, Cr2O3"	PG 17	1333-82-0; 1308-38-9	9
281.00	6,6'-Di-tert-butyl-4,4'-butylidendi-m-kresol		85-60-9	9
444.00	Diethylenglykoldibenzoat		120-55-8	9
451.00	Diisodecylazelat		28472-97-1	9
573.00	Dibutylzinndichlorid	DBTC	683-18-1	9
4.00	Arsen(V)-oxid	-	1303-28-2	8.5
6.02	Arsen-Verbindungen	-	58-36-6	8.5
3.00	Arsen	As	7440-38-2	8.5
78.00	Bleiphthalat		16183-12-3	8.5
109.00	Fentinacetat		900-95-8	8.5

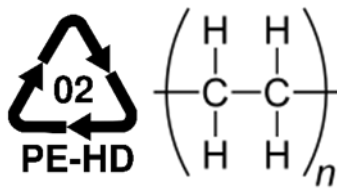
Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
7.00	Bleiarsenat; Arsenwasserstoff; Triethylarsenat	-	7784-40-9; 7784-42-1; 15606-95-8	8
56.00	Natriumtetraborat	Borax	1303-96-4; 1330-43-4; 12179-04-3	8
56.01	Di-Natriumtetraborat-Decahydrat	Borax	1303-96-4	8
56.03	Di-Natriumtetraborat-Pentahydrat	Borax	12179-04-3	8
62.00	Blei(II)-stearat / Bleidistearat		1072-35-1	8
64.00	Bleihydroxykarbonat ; Bleikarbonat		1319-46-6; 598-63-0	8
64.02	Blei(II)-carbonat		598-63-0	8
42.00	Chromsäure		7738-94-5	8
46.00	Dichromsäure		13530-68-2; 7738-94-5	8
129.00	5-Chlor-2-(2,4-dichlorphenoxy)-phenol	Triclosan	3380-34-5	8
46.01	Dichromsäure		13530-68-2	8
47.00	Zinccromat		13530-65-9	8
48.00	Kalium Zink Chromat Gelb	PY 36	37300-23-5	8
60.00	Tetramethylblei		75-74-1	8
102.00	Triphenylzinn-Hydroxid (= Fentinhydroxid)		76-87-9	8

Quelle: (Ramboll)

4.3.2 PE

Polyethylen (PE) ist ein durch Polymerisation von Ethylengas hergestellter, teilkristalliner, thermoplastischer Kunststoff, der in seiner Grundform milchig und matt ist. Seine Eigenschaften werden durch eine hohe chemische Beständigkeit und eine gute elektrische Isolation bestimmt. Die Hitzebeständigkeit ist schlechter als bei vielen anderen Polymeren. Die mechanischen, thermoplastischen und chemischen Eigenschaften von Polyethylen lassen sich durch Additive verändern. PE-Kunststoff wird in mehrere Arten unterteilt, die sich in dem Aufbau (Verzweigung) unterscheiden. Bei schwach verzweigten Polymerketten, und daher hoher Dichte spricht man von „HD“-PE, wobei HD für „high density“ steht. Bei geringer Dichte spricht man von „LD“PE, hier steht LD für „low density“ (PlasticsEurope, 2015b).

Abbildung 2: Recycling-Code und Strukturformel von Polyethylen



Quelle: Wikipedia, CC-BY-2.5

In diesem Teilschritt wurden die Einträge auf eine Benutzung in Polyethylen (PE) sortiert. Bei der Betrachtung der Daten fällt auf, dass in diesem Polymer vor allem Flammschutzmittel als relevant identifiziert wurden. In dieser Additivart wurden verschiedene Diphenylether, HBCDD, TBBPA und Dechloran Plus identifiziert. Weitere Stoffe gehören zu den Metallen. Hier sind Chromate als Pigment und Arsenate sowie Triclosan als Biostabilisator zu nennen.

Mögliche Prioritäre Stoffe in PE könnten dementsprechend die halogenierten organischen Stoffe DecaBDE (mit/ohne die anderen POP-BDE), HBCDD, Dechloran Plus, SCCP, TBBPA sein. Weitere prioritäre Stoffe könnten Chromate und Arsenate sein.

In Tabelle 14 sind die in Polyethylen enthaltenen projektrelevanten Stoffe gezeigt (sortiert nach chemischen Obergruppen). Dies wird ergänzt durch Tabelle 15 welche die Stoffe inklusive CAS und Wertung zeigt.

Tabelle 14: Chemische Obergruppen der projektrelevanten Stoffe im Polymer Polyethylen

Gruppe	Metallische Stoffe (Salze)	Halbmetallische Stoffe	Organometallische Verbindungen	Organische Stoffe	Halogenierte organische Stoffe
Weichmacher (P)	Keine identifiziert	Keine identifiziert	Keine identifiziert	Keine identifiziert	SCCP
Flammschutzmittel (FM)	Keine identifiziert	Keine identifiziert	Keine identifiziert	Keine identifiziert	SCCP POP-BDE HBCDD Dechloran Plus TBBPA
Pigmente (P)	Cr	PR 53: 1		PR 57 PY 150 Perylen-3,4:9,10-tetracarboxydiimid	
Stabilisator (Bio-)	As	Keine identifiziert	Keine identifiziert	Keine identifiziert	Triclosan

Quelle: (Ramboll)

Tabelle 15: Prioritäre Stoffe, die als PE-Additiv genannt werden

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
2.00	Kurzkettige Chlorparaffine	SCCP	85535-84-8	11
3.00	Arsen	As	7440-38-2	8.5

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
4.00	Arsen(V)-oxid	-	1303-28-2	8.5
5.00	Arsen(III)-oxid	-	1327-53-3	10
6.00	Arsen-Verbindungen	-	7778-39-4;58-36-6	0
6.01	Arsen-Verbindungen	-	7778-39-4	10
6.02	Arsen-Verbindungen	-	58-36-6	8.5
7.00	Bleiarsenat; Arsenwasserstoff; Triethylarsenat	-	7784-40-9;7784-42-1;15606-95-8	8
7.01	Bleiarsenat	-	7784-40-9	9
7.02	Bleiarsenat; Arsenwasserstoff; Triethylarsenat	-	7784-42-1	9
7.03	Bleiarsenat	-	15606-95-8	9
16.00	Pentabromdiphenylether	Penta-BDE, PeBDE	32534-81-9	11
17.00	Octabromdiphenylether	Octa-BDE, OBDE	32536-52-0	11
18.00	Decabromdiphenylether	Deca-BDE	1163-19-5	13
19.00	Hexabromcyclododecan	HBCDD	25637-99-4; 3194-55-6	13
19.01	Hexabromcyclododecan	HBCDD	25637-99-4	11
19.02	Hexabromcyclododecan	HBCDD	3194-55-6	11
20.00	Tetrabrombisphenol A	TBBPA	79-94-7	11
49.00	Zinkkaliumchromat		11103-86-9	12.5
32.01	"Chromtrioxid	PG 17	1333-82-0	11.5
32.02	"Chromtrioxid	PG 17	1308-38-9	11.5
38.00	Strontiumchromat		7789-06-2	11.5
40.00	Pigment Red 104	PR 104	12656-85-8	11.5
41.00	Pigment Yellow 34	PY 34	1344-37-2	11.5
33.00	Kaliumdichromat		7778-50-9	11
35.00	Natriumdichromat		10588-01-9	11
39.00	Chrom(III)-chromat		24613-89-6	10.5
36.00	Kaliumchromat		7789-00-6	10
44.00	Natriumchromat		7775-11-3	10

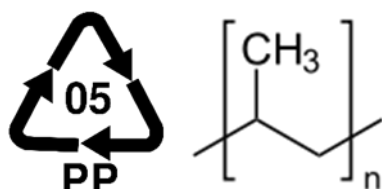
Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
183.00	Pigment Red 53 :1 Ba-Salz eines Monoazosäurefarbstoffs	PR 53: 1	5160-02-1	10
34.00	Ammoniumdichromat		7789-09-5	9.5
37.00	Calciumchromat		13765-19-0	9.5
43.00	Bleichromat		7758-97-6	9.5
50.00	Chrom(VI)-oxiddichlorid		14977-61-8	9.5
189.00	Pigment Red 57 :1 Ca-Salz eines Monoazosäurefarbstoffs	PR 57 : 1	5521-31-3	9.5
45.00	Bariumchromat		10294-40-3	9
170.00	Perylen-3,4:9,10- tetracarboxydiimid		81-33-4	9
42.00	Chromsäure		7738-94-5	8
46.00	Dichromsäure		13530-68-2;7738- 94-5	8

Quelle: (Ramboll)

4.3.3 PP

Polypropylen (PP) ist ein teilkristalliner, thermoplastischer Kunststoff, hergestellt durch Kettenpolymerisation von Propen. PP ist härter und wärmebeständiger als PE, ansonsten aber in seinen Eigenschaften ähnlich. PP besitzt Eigenschaften, wie elektrische Isolation und chemische Beständigkeit. Durch Additive lassen sich Parameter wie Steifigkeit, Formbarkeit und Entflammbarkeit verändern (PlasticsEurope, 2015b).

Abbildung 3: Recycling-Code und Strukturformel von Polypropylen



Quelle: Wikipedia, CC-BY-2.5

In diesem Teilschritt wurden die Einträge auf eine Benutzung in Polypropylen (PP) sortiert. Bei der Betrachtung der Daten fällt auf, dass in diesem Projekt verschiedene bromierte Diphenylether, HBCDD, TBBPA, Triclosan, Dechloran Plus und verschiedene PAHs als organische Schadstoffe identifiziert worden. Weitere Stoffe gehören zu den Metallen (vor allem Chromate). Die für Polypropylen relevanten Stoffe sind in Tabelle 16 gezeigt (sortiert nach chemischen Obergruppen). Dies wird ergänzt durch Tabelle 17, welche die Stoffe inklusive CAS und Wertung zeigt.

Tabelle 16: Chemische Obergruppen der projektrelevanten Stoffe im Polymer Polypropylen

Gruppe	Metallische Stoffe (Salze)	Halbmetallische Stoffe	Organometallische Verbindungen	Organische Stoffe	Halogenierte organische Stoffe
Stabilisator (Licht)				UV-328	
Flammschutzmittel (FM)					POP-BDE HBCDD Dechloran Plus TBBPA
Pigmente (P)	Cr			PY 150 PY 36 PR 57 : 1	
Stabilisator (Bio-)	As				Triclosan

Quelle: (Ramboll)

Tabelle 17: Prioritäre Stoffe, die als PP-Additiv genannt werden

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
18.00	Decabromdiphenylether	Deca-BDE	1163-19-5	13
19.00	Hexabromcyclododecan	HBCDD	25637-99-4; 3194-55-6	13
49.00	Zinkkaliumchromat		11103-86-9	12.5

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
32.01	Pigment Green 17 Chromoxid, Cr ₂ O ₃	PG 17	1333-82-0	11.5
32.02	Chromtrioxid	PG 17	1308-38-9	11.5
38.00	Strontiumchromat		7789-06-2	11.5
40.00	Pigment Red 104	PR 104	12656-85-8	11.5
41.00	Pigment Yellow 34	PY 34	1344-37-2	11.5
16.00	Pentabromdiphenylether	Penta-BDE, PeBDE	32534-81-9	11
17.00	Octabromdiphenylether	Octa-BDE, OBDE	32536-52-0	11
19.01	Hexabromcyclododecan	HBCDD	25637-99-4	11
19.02	Hexabromcyclododecan	HBCDD	3194-55-6	11
20.00	Tetrabrombisphenol A	TBBPA	79-94-7	11
33.00	Kaliumdichromat		7778-50-9	11
35.00	Natriumdichromat		10588-01-9	11
274.00	Azodicarboxamid	ADC	123-77-3	11
576.00	Chlormethan		74-87-3	11
225.01	Dechloran Plus	DP	13560-89-9	10.5
39.00	Chrom(III)-chromat		24613-89-6	10.5
340.00	2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-4,6-di-tert-pentylphenol	UV-328	25973-55-1	10.5
36.00	Kaliumchromat		7789-00-6	10
44.00	Natriumchromat		7775-11-3	10
34.00	Ammoniumdichromat		7789-09-5	9.5
37.00	Calciumchromat		13765-19-0	9.5
43.00	Bleichromat		7758-97-6	9.5
50.00	Chrom(VI)-oxidchlorid		14977-61-8	9.5
189.00	Pigment Red 57 : 1 Ca-Salz eines Monoazosäurefarbstoffs	PR 57 : 1	5521-31-3	9.5
32.00	Chrom,	PG 17	1333-82-0; 1308-38-9	9
45.00	Bariumchromat		10294-40-3	9
118.00	Benzo(k)fluoranthene	BkFA	207-08-9	8.5
119.00	Chrysen		218-01-9	8.5
42.00	Chromsäure		7738-94-5	8

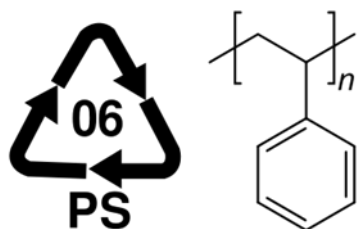
Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
46.00	Dichromsäure		13530-68-2;7738-94-5	8
46.01	Dichromsäure		13530-68-2	8
47.00	Zincchromat		13530-65-9	8
48.00	PY 36	PY 36	37300-23-5	8
114.00	Benzo(e)pyren		192-97-2	8
116.00	Benzo(b)fluoranthren		205-99-2	8
117.00	Benzo(j)fluoranthren		205-82-3	8
129.00	5-Chlor-2-(2,4-dichlorphenoxy)-phenol	Triclosan	3380-34-5	8
751.00	Pigment Yellow 150 Azo-Metallkomplex (Ni)	PY 150	68511-62-6	8
801.00	Tetrabromdiphenylether	40088-47-9	254-787-2	8
802.00	Hexabromdiphenylether	36483-60-0	253-058-6	8
803.00	Heptabromdiphenylether	68928-80-3	273-031-2	8

Quelle: (Ramboll)

4.3.4 PS

Polystyrol (PS) ist ein transparenter, amorpher, teilkristalliner Thermoplast und der Ausgangsstoff für EPS und XPS. PS wird entweder als thermoplastisch verarbeitbarer Werkstoff eingesetzt oder als Schaumstoff. In seinem Grundzustand ist PS steif, schlagempfindlich und hitzebeständig. In aufgeschäumter Form wurde für den Flammenschutz in der Regel das Additiv HBCDD eingesetzt. Mittlerweile wurde HBCDD bereits sowohl durch die REACH- als auch durch die POP-Verordnung reguliert. Daher wird aktuell in aufgeschäumten PS in der Regel das Flammenschutzmittel Poly-FR eingesetzt. Andere Eigenschaften, wie Formbarkeit, Steifigkeit oder chemische Beständigkeit lassen sich durch weitere Additive beeinflussen (PlasticsEurope, 2015).

Abbildung 4: Recycling-Code und Strukturformel von Polystyrol



Quelle: Wikipedia, CC-BY-2.5

Ähnlich wie bei EPS sind auch beim nicht expandierten Polystyrol (PS) eine im Vergleich geringere Anzahl an Stoffen als projektrelevant. Für PS sind vor allem HBCDD, Borsäure, und verschiedene Pigmente von Interesse. Chlormethan wird womöglich durch die hohe Tonnage in dem Punktesystem überbewertet. Die für Polystyrol relevanten Stoffe sind in Tabelle 18 gezeigt (sortiert nach chemischen Obergruppen). Dies wird ergänzt durch Tabelle 19, welche die Stoffe inklusive CAS und Wertung zeigt.

Tabelle 18: Chemische Obergruppen der projektrelevanten Stoffe im Polymer Polystyrol

Gruppe	Metallische Stoffe (Salze)	Halbmetallische Stoffe	Organometallische Verbindungen	Organische Stoffe	Halogenierte organische Stoffe
Flammenschutzmittel (FM)		Borsäure			HBCDD
Pigmente (P)			PR 53 : 1 PR 57 : 1	Ruß	

Quelle: (Ramboll)

Tabelle 19: Prioritäre Stoffe, die als PS-Additiv genannt werden

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
19.00	Hexabromcyclododecan	HBCDD	25637-99-4; 3194-55-6	13
491.00	Ruß		1333-86-4	13
15.01	Borsäure	H3BO3	10043-35-3	12.5
19.01	Hexabromcyclododecan	HBCDD	25637-99-4	11
19.02	Hexabromcyclododecan	HBCDD	3194-55-6	11

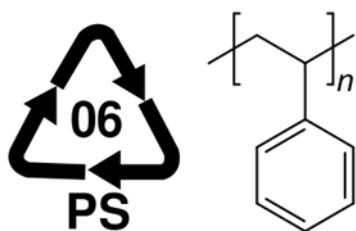
Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
576.00	Chlormethan		74-87-3	11
183.00	Pigment Red 53 : 1 Ba-Salz eines Monoazosäurefarbstoffs	PR 53: 1	5160-02-1	10
15.00	Borsäure	H3BO3	10043-35-3; 11113-50-1	9.5
15.02	Borsäure	H3BO3	11113-50-1	9.5
189.00	Pigment Red 57 : 1 Ca-Salz eines Monoazosäurefarbstoffs	PR 57 : 1	5521-31-3	9.5
111	Benzo(a)pyren	B[a]P	50-32-8	8.5

Quelle: (Ramboll)

4.3.5 EPS/XPS

Expandiertes Polystyrol (EPS) und extrudiertes Polystyrol (XPS) bestehen aus Polystyrol, was ein transparenter -geschäumt weißer- amorpher und teilkristalliner Thermoplast ist. EPS wird erzeugt, indem PS in eine Form gefüllt, durch Erhitzung und Wasserdampf vorgeschäumt wird und sich dadurch um etwa das 20-50 fache seines ursprünglichen Volumens aufbläht. Je nach Herstellungsart ist der Stoff als Endprodukt wasser- und luftdurchlässig, die einzelnen Granulat Körner sichtbar und einzeln abtrennbar. EPS wird Vorzugsweise als Dämmmaterial benutzt. XPS wird unter Hitze und der Zuhilfenahme eines Treibmittels z.B. Kohlendioxid kontinuierlich aufgeschäumt und durch eine definierte Öffnung gepresst, wodurch ein feinporiger, homogener Hartschaum entsteht, der meist luft- und wasserundurchlässig ist. Aufgeschäumtes Polystyrol hat eine geringe Wärmeleitfähigkeit und eine geringe Dichte. Als Additiv wurde meist HBCDD verwendet, um die Entflammbarkeit von EPS und XPS zu senken (PlasticsEurope, 2015).

Abbildung 5: Recycling-Code und Strukturformel von Polystyrol



Quelle: Wikipedia, CC-BY-2.5

Daher macht es Sinn, dass in diesem Projekt neben Ruß auch HBCDD als relevant identifiziert wurde. Dies ist in Tabelle 20 gezeigt. Diese Stoffe sollten demnach auf jeden Fall in den folgenden Arbeitspaketen berücksichtigt werden.

Tabelle 20: Prioritäre Stoffe, die als EPS/XPS-Additiv genannt werden.

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
19.00	Hexabromcyclododecan	HBCDD	25637-99-4; 3194-55-6	13
491.00	Ruß		1333-86-4	13
19.01	Hexabromcyclododecan	HBCDD	25637-99-4	11
19.02	Hexabromcyclododecan	HBCDD	3194-55-6	11
19.03	Beta-Hexabromcyclododecan	β-HBCD	134237-51-7	11
19.04	Gamma-Hexabromcyclododecan	γ-HBCD	134237-52-8	11

Quelle: (Ramboll)

4.3.6 ABS

Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) ist ein amorphes, thermoplastisches Polymer, das aus drei verschiedenen Monomeren hergestellt wird, nämlich Acrylnitril, 1,3-Butadien und Styrol. Die Konzentration der drei Monomere differiert, meist im Rahmen folgender Zusammensetzung, Butadien 5-30%, Acrylnitril 15-35% und Styrol 40-60%. ABS ähnelt in der Optik und seinen grundlegenden Eigenschaften Polystyrol, besitzt aber eine bessere chemische Beständigkeit, eine höhere Wärmeformbeständigkeit und ist Wettereinflüssen gegenüber resistenter. Um die Eigenschaften von ABS zu verändern werden Additive eingesetzt, meist um die Formbarkeit, Entflammbarkeit, oder mechanische Festigkeit zu beeinflussen (PlasticsEurope, 2015).

Abbildung 6: Recycling-Code für Acrylnitril-Butadien-Styrol (O für others = andere)



Quelle: Wikipedia, CC-BY-2.5

In diesem Teilschritt wurden die Einträge auf eine Benutzung in Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS) sortiert. Bei der Betrachtung der Daten fällt auf, dass in diesem Projekt verschiedene polybromierte Diphenylether, HBCDD, TBBPA, Dechloran Plus und verschiedene PAHs als organische Schadstoffe identifiziert wurden. Weitere Stoffe gehören zu den Metallen (vor allem Chromate). Auch Antimontrioxid wurde als ABS-Additiv identifiziert. Titan(IV)-oxid ist auch als Titanweiß bekannt und wird in einer Vielzahl von Polymeren als Pigment benutzt.

In Tabelle 21 sind die in ABS enthaltenden projektrelevanten Stoffe gezeigt (sortiert nach chemischen Obergruppen). Dies wird ergänzt durch Tabelle 22, welche die Stoffe inklusive CAS und Wertung zeigt.

Tabelle 21: Chemische Obergruppen der projektrelevanten Stoffe der Polymer Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer.

Gruppe	Metallische Stoffe (Salze)	Halbmetallische Stoffe	Organometallische Verbindungen	Organische Stoffe	Halogenierte organische Stoffe
Stabilisator (Licht)	Titan(IV)-oxid			Ruß UV-328 Octabenzon 2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-p-kresol	
Antistatikum	Zinkoxid	Borax		Ruß	
AO				2,2'-Methylenbis(4-methyl-6-tert-butylphenol)	
Weichmacher (P)				Bis(2-ethylhexyl)phthalat Triphenylphosphat	
Flammschutzmittel (FM)		Antimontrioxid		Triphenylphosphat	HBCDD POP-BDE TBBPA Dechloran Plus
Pigmente (P)	Titan(IV)-oxid PY 150 PG 17			Ruß Perylen-3,4:9,10-tetracarboxydiimid PR 108 PY 74 PY 34 PR 104	

Quelle: (Ramboll)

Tabelle 22: Prioritäre Stoffe, die als ABS-Additiv genannt werden.

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
19.00	Hexabromcyclododecan	HBCDD	25637-99-4; 3194-55-6	13
491.00	Ruß		1333-86-4	13
492.00	Titan(IV)-oxid		13463-67-7	12
32.01	Chromtrioxid	PG 17	1333-82-0	11.5
32.02	Chromtrioxid	PG 17	1308-38-9	11.5
40.00	Pigment Red 104	PR 104	12656-85-8	11.5
41.00	Pigment Yellow 34	PY 34	1344-37-2	11.5
16.00	Pentabromdiphenylether	Penta-BDE, PeBDE	32534-81-9	11

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
17.00	Octabromdiphenylether	Octa-BDE, OBDE	32536-52-0	11
19.01	Hexabromcyclododecan	HBCDD	25637-99-4	11
19.02	Hexabromcyclododecan	HBCDD	3194-55-6	11
20.00	Tetrabrombisphenol A	TBBPA	79-94-7	11
274.00	Azodicarboxamid	ADC	123-77-3	11
257.00	Kieselsäure, Zirkoniumsalz, Cadmiumpigment-umhüllt		102184-95-2	11
536.00	Styrol		100-42-5	11
543.00	Acrylonitrile		107-13-1	11
225.01	Dechloran plus	Dechloran plus	13560-89-9	10.5
340.00	2-(2H-Benzotriazol-2-yl)- 4,6-di-tert-pentylphenol	UV-328	25973-55-1	10.5
473.00	Octabenzon		1843-05-6	10.5
192.00	Pigment Yellow 74	PY 74	6358-31-2	10
132.00	Antimontrioxid	SbO ₃	1309-64-4	9.5
189.00	Pigment Red 57 :1 Ca-Salz eines Monoazosäurefarbstoffs	PR 57 : 1	5521-31-3	9.5
237.00	Pigment Yellow 35 ; Cadmiumzinksulfidgelb		8048-07-5	9.5
243.00	Pigment Red 108	PR 108	58339-34-7	9.5
282.00	2,2'-Methylenbis(4-methyl- 6-tert-butylphenol)		119-47-1	9.5
534.00	2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-p- kresol		2440-22-4	9.5
32.00	Pigment Green 17 Chromoxid, Cr ₂ O ₃	PG 17	1333-82-0; 1308-38-9	9
170.00	Perylen-3,4:9,10- tetracarboxydiimid		81-33-4	9
225.02	Dechloran plus	Dechloran plus	135821-03-3	9
111.00	Benzo(a)pyren	B[a]P	50-32-8	8.5
112.00	Benz(a)anthracen	BaA	56-55-3	8.5
118.00	Benzo(k)fluoranthene	BkFA	207-08-9	8.5
119.00	Chrysen		218-01-9	8.5

Stoff-ID	Stoffname	Akronym	CAS	Punkte
114.00	Benzo(e)pyren		192-97-2	8
116.00	Benzo(b)fluoranthen		205-99-2	8
117.00	Benzo(j)fluoranthen		205-82-3	8
751.00	Pigment Yellow 150 Azo-Metallkomplex (Ni)	PY 150	68511-62-6	8
225.00	Triphenylphosphat		115-86-6	8
801.00	Tetrabromdiphenylether	40088-47-9	254-787-2	8
802.00	Hexabromdiphenylether	36483-60-0	253-058-6	8
803.00	Heptabromdiphenylether	68928-80-3	273-031-2	8

Quelle: (Ramboll)

4.3.7 Zusammenfassende Betrachtung

Abbildung 7 stellt eine Visualisierung der zusammenfassenden Betrachtung verschiedener Kunststoffarten und der jeweiligen Additivarten bzw. Stoffe dar. Diese soll die einzelnen Kunststoffarten in erster Annäherung qualitativ bzw. auch quantitativ vergleichen. Dabei sind die einzelnen chemischen Obergruppen (Metalle, Halbmetalle, Organometalle, Organische Stoffe und halogenierte organische Stoffe) gegen die einzelnen Polymerarten aufgetragen.

Abbildung 7: Visualisierung der zusammenfassenden Betrachtung verschiedener Kunststoffarten und den jeweiligen Additivarten bzw. Stoffen

	PVC	EPS/ XPS	PE	PP	PS	ABS
Metalle (Salze/Säuren/Oxide)	Ti, Zn, Pb, Ni, Cr, Mo, Cd, Co		Cr	Cr		Ti, Zn
Halbmetalle (Salze/Säure/Oxide)	As, B, Sb		As	As	B	B, Sb
Organometalle	Zn, Pb, Sn					
Organische Stoffe	Phthalate, Phenole, Pigmente, Ver. Einzelstoffe u.a. BPA	Ruß	Pigmente	UV 328, Pigmente	Ruß, Pigmente	Ruß, Pigmente, Ver. Einzelstoffe u.a. BPA
Halogenierte organische Stoffe	S/MCCP, TCS, Deca BDE	HBCDD	HBCDD, POP-BDE, TBBPA, SCCP, DP+, TCS	HBCDD, POP-BDE, TBBPA, DP+, TCS	HBCDD	HBCDD, POP-BDE, TBBPA, DP+, TCS

Quelle: (Ramboll)

Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass PVC mit den meisten projektrelevanten Additiven in Verbindung gebracht wird. Schwerpunkte liegen hierbei bei den Metallen, die in diversen Anwendungen eingesetzt werden, z.B. als Pigmente, Weichmacher und Flammenschutzmittel. Auch werden bzw. wurden viele organische Schadstoffe in PVC eingesetzt, hierbei sind verschiedene Phthalate und Phenole zu nennen, die als Weichmacher gebraucht werden. Auch viele weitere organische Schadstoffe werden in diversen Anwendungen in PVC verwendet. Projektrelevante halogenierte Schadstoffe wurden, im Vergleich zu den anderen Polymerarten für PVC, mengenmäßig weniger identifiziert. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass PVC mit einer Vielzahl von Schadstoffen in Verbindung gebracht wurde.

Polyethylen und Polypropylen zeigen eine sehr ähnliche Schadstoffbelastung, die bei den Metallen durch Chrom und Arsen gekennzeichnet ist. Organische Schadstoffe sind in beiden Kunststoffarten vor allem durch eine Vielzahl von Pigmenten gekennzeichnet. Dies wird ergänzt durch eine Vielzahl an halogenierten organischen Schadstoffen, die vor allem als Flammenschutzmittel eingesetzt werden und wurden.

Polystyrol und seine expandierte Form als EPS sind in ähnlicher Weise mit Schadstoffen belastet, hier sind vor allem Ruß (eingesetzt als Pigment und UV-Stabilisator), Pigmente und HBCDD zu nennen.

Im nachfolgenden Kapitel (Arbeitspaket 2 der Studie) wurde untersucht, inwieweit die betrachteten schadstoffbelasteten Polymere in Erzeugnissen und entsprechenden Abfallströmen z.B. aus dem Bau-, Altfahrzeug-, und EAG-Bereich relevant sind und wie sich die Situation bezüglich der Behandlung und des Recyclings dieser Abfallströme darstellt.

5 Betroffene Abfallströme und Abschätzung der Risiken für Mensch und Umwelt

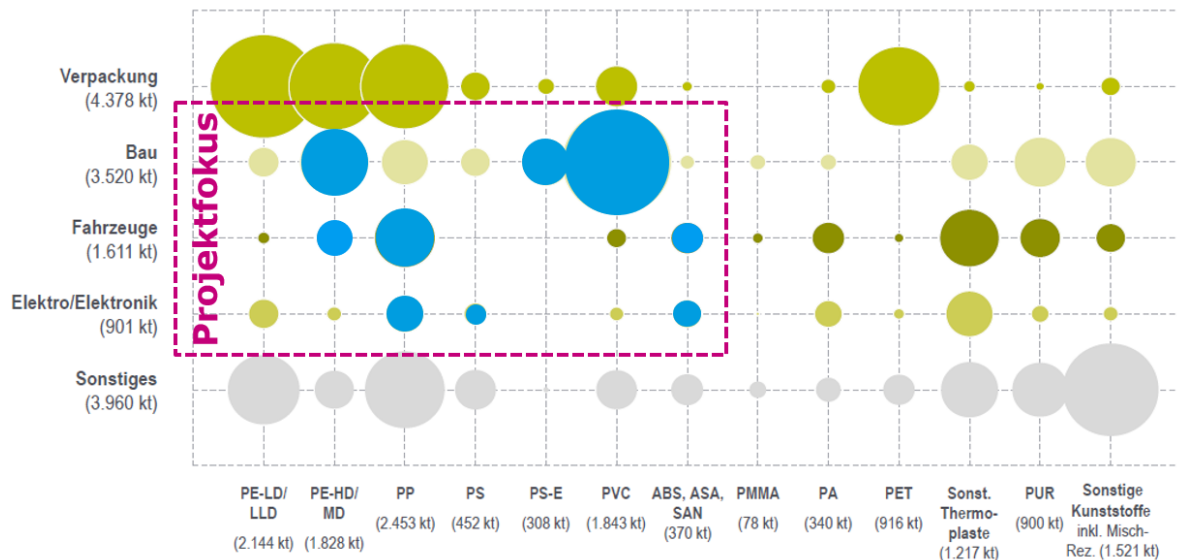
5.1 Auswahl relevanter Kunststoffpolymere

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wurden aus den im Projektfokus stehenden Bereichen Bau, Automobil sowie Elektro/Elektronik insgesamt neun Kunststoffpolymere zur näheren Betrachtung ausgewählt (siehe Hervorhebungen in blauer Farbe in Abbildung 8):

- ▶ Baubereich: PVC, PE-HD/MD, EPS (PS-E)
- ▶ Automobilbereich: PP, PE-HD/MD, ABS
- ▶ Elektro/Elektronikbereich: PP, PS, ABS

Abbildung 8: Überblick über in verschiedenen Branchen verarbeitete Kunststoffpolymere und Darstellung des Projektfokus

Struktur der verarbeiteten Kunststoffe (inkl. Neuware und Rezyklat) innerhalb der Branchen: Überblick



Quelle: (Ramboll verändert nach Conversio (2018a))

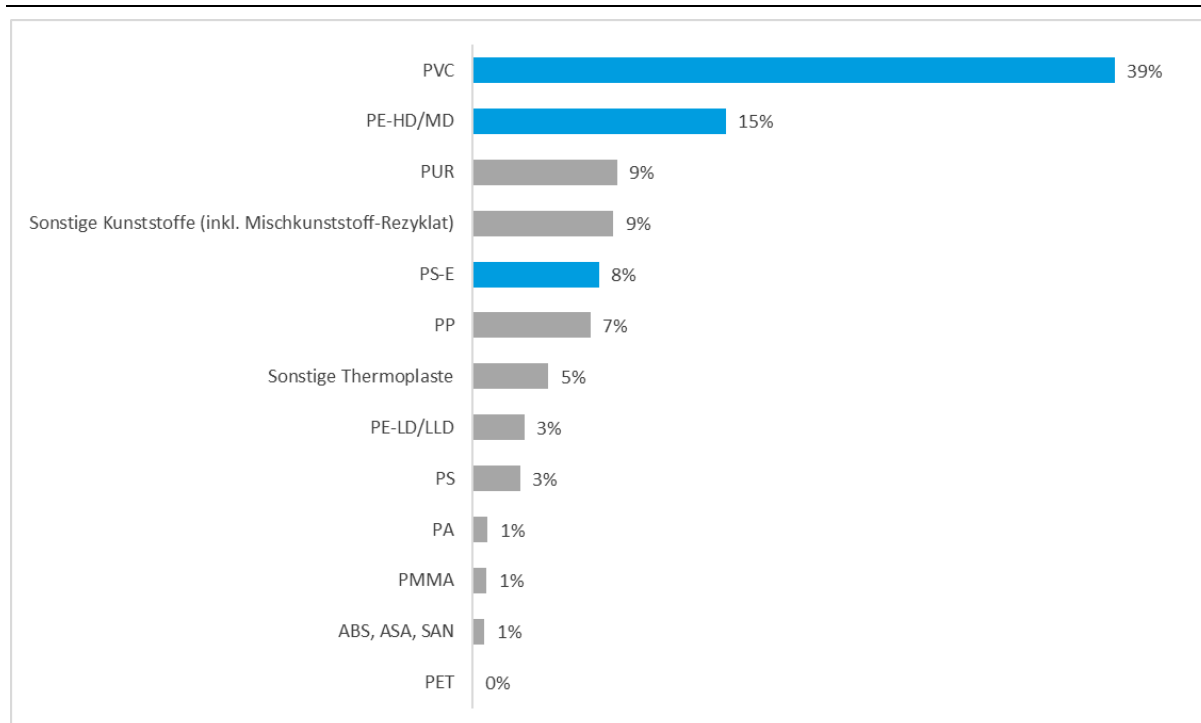
5.2 Baubereich

5.2.1 Kunststoffeinsatz im Überblick

Pro Jahr entfällt etwa ein Viertel der in Deutschland verarbeiteten Kunststoffmenge auf die Baubranche. Mit einer Verarbeitungsmenge von 3,52 Mio. t im Jahr 2017 ist die Baubranche, nach der Verpackungsindustrie, somit der Bereich mit der zweithöchsten Kunststoffverarbeitungsmenge in Deutschland. Der Rezyklat-Anteil an der verarbeiteten Gesamtmenge lag bei etwa 22 %, wobei etwa jeweils die Hälfte aus Produktions- und Verarbeitungsresten sowie Post-Consumer-Abfällen stammte.

Abbildung 9 zeigt, dass im Baubereich eine Vielzahl unterschiedlicher Kunststoffarten eingesetzt werden (Hervorhebung in blauer Farbe: im Projektfokus stehende Kunststoffarten). Die im Jahr 2017 verarbeitete Menge von 3,52 Mio. t verteilte sich auf insgesamt 13 verschiedene Kunststoffarten (einschl. als Gemisch / Sonstige ausgewiesene Kunststoffe). Die im Projektfokus stehenden Kunststoffarten sind in der Abbildung 9 in blau hervorgehoben.

Abbildung 9: Überblick über Verteilung der im Baubereich in Deutschland im Jahr 2017 verarbeiteten Kunststoffarten (in %)



Quelle: (Ramboll verändert nach Conversio (2018a))

Die verarbeiteten Kunststoffe wurden dabei in folgenden typischen Anwendungen eingesetzt:

- ▶ Rohre: 27 %
- ▶ Dämmung / Isolierung: 26,5 %
- ▶ Profile: 33,5 %
- ▶ Sonstiges (u.a. Hülsen, Spulen): 13 %

Kunststoffprodukte im Baubereich weisen eine sehr lange Lebens- bzw. Gebrauchsdauer auf (Fußböden beispielsweise ca. 25-30 Jahre, Fenster ca. 40-50 Jahre, Kunststoffrohre mehr als 80 Jahre). Dies, sowie die Tatsache, dass Kunststoffe im Baubereich erst seit ca. 40 Jahren verstärkt eingesetzt werden, führt zu deutlichen Unterschieden der jährlichen Verbrauchs- und Abfallmengen. Einem Kunststoffverbrauch von rund 2,65 Mio. t im Jahr 2017 stand eine Abfallmenge von 0,5 Mio. t gegenüber (~ 19 %). Insgesamt nimmt das Aufkommen von Abfällen aus langlebigen Kunststoffbauprodukten wie beispielsweise Fenster, Rohre und Fußböden weiterhin zu (etwa auf Grund verstärkter Sanierungen).

5.2.2 Relevante Erzeugnisse und darin enthaltene Schadstoffe

5.2.2.1 PVC

Die vielfältigen Einsatz- und Verarbeitungsmöglichkeiten haben PVC zu einem der wichtigsten Kunststoffe im Baubereich gemacht. Mehr als 70 % des in Deutschland im Jahr 2017 insgesamt verarbeiteten PVCs wurden im Baubereich eingesetzt. Auch innerhalb des Baubereichs war PVC mit einem Anteil von 39 % an allen verarbeiteten Kunststoffarten stark dominierend (wie auch in Abbildung 9 oben dargestellt) (Conversio, 2018a).

Durch die hohe Witterungsbeständigkeit und Langlebigkeit des PVC-Polymers wird es häufig in Produkten mit langer Lebensdauer verarbeitet. Etwa 70 % des gesamten PVC-Verbrauchs entfällt auf Produkte mit einer Nutzungsdauer von mindestens zehn Jahren (AGPU, 2016).

Betrachtet man die PVC-Verarbeitung nach Produktgruppen in Deutschland 2013 (~ 1.5 Mio t.), so ergibt sich folgende Verteilung: Fensterprofile 28 %, Andere PVC-Profile 14 %, Fußboden 3 %, Dach-/Dichtungsbahnen 2 %, Kabel 3 %, Verpackungen 12 %, Unterbodenschutz 2 %, Weichfolien 4 %, Sonstige PVC-Produkte (inkl. Planen, Schläuche etc.) 17 %, Rohre 15 % (AGPU, 2016)

Für die Zwecke dieses Vorhabens wurden die folgenden Erzeugnisse aus PVC im Baubereich als relevant identifiziert und hinsichtlich enthaltener Schadstoffe näher betrachtet:

- ▶ Hart-PVC:
- ▶ Fensterrahmen (Cd, Pb)
- ▶ Rohre (Cd, Pb)
- ▶ Weich-PVC
- ▶ Dach- und Dichtungsbahnen (DEHP und andere Phthalate)
- ▶ Boden- und Wandbeläge (DEHP und andere Phthalate)
- ▶ Kabelummantelungen (DEHP und andere Phthalate, POP-BDEs)

Die genannten PVC-Erzeugnisse müssen je nach Einsatzzweck gewisse physikalische (Weich- bzw. Hart-PVC) und auch produktspezifische (z.B. Flammschutz) Erfordernisse erfüllen, die durch Additive erreicht werden. Des Weiteren gibt es auch unter REACH und anderen Regulierungen (RoHS, EU-POP-VO etc.) Prozesse bzw. Grenzwerte, die direkte Erfordernisse für Erzeugnisse und mögliche vorhandene Schadstoffe beinhalten. Daher wurden auch diese Informationen zusammengetragen.

Weiches PVC wird z.B. in PVC-Bodenbelägen, -Dichtungsbahnen und -Kabelummantelungen verwendet. Um die gewünschte Elastizität zu erreichen werden diesen Erzeugnissen Weichmacher hinzugefügt. Die in Kapitel 4 identifizierten Weichmacher sind:

- ▶ Verschiedene Phthalate
- ▶ Niedermolekulare (DEHP, DBP, DIHP u. a.)
- ▶ Höhermolekulare (DINP, DIDP, DPHP u. a.)
- ▶ Bisphenol A
- ▶ Tris(2-ethylhexyl)-trimellitat)
- ▶ Chlorierte Paraffine (SCCP, MCCP)
- ▶ Adipate: Bis(2-ethylhexyl)adipat

Im Weiteren liegt der Fokus auf jenen Substanzen, die nach dem heutigen Stand (Anfang 2020) abschließend als SVHC bewertet sind. Das betrifft vor allem die niedermolekularen Phthalate, BPA und die chlorierten Paraffine. Die verbleibenden Stoffe werden momentan im Rahmen des CORAP-Verfahrens bewertet.

Phthalate müssen in relativ hohen Konzentrationen von bis zu 30 % w/w eingesetzt werden. Auch die chlorierten Paraffine (kurze und mittellange) wurden in Konzentrationen von 10-15 % w/w eingesetzt. Für BPA sind vergleichsweise geringere Konzentrationen von 0,2 % w/w für PVC verwendet worden. Für die niedermolekularen Phthalate ist eine REACH-Beschränkung (Annex XVII, Eintrag 51²⁵) aktiv, so dürfen Phthalate nicht als Stoffe oder in Gemischen, einzeln oder in irgendeiner Kombination in einer Konzentration von 0,1 % w/w oder mehr in Spielzeug- und Babyartikeln verwendet werden. Ab Juli 2020 wird diese Beschränkung auch auf andere Kunststoff-Erzeugnisse ausgedehnt (mit ver. Ausnahmen). Des Weiteren ist die Verwendung von DEHP auch durch eine Zulassung beschränkt. Hier gibt es eine recyclingspezifische Ausnahme²⁶.

PVC ist aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung (hoher Chlorgehalt), im Gegensatz zu anderen Kunststoffen, schwer entflammbar. Allerdings entsteht bei einer Verbrennung, Chlorwasserstoff, Dioxine und Aromaten. Trotz der schweren Entflammbarkeit können PVC-Kabelummantelungen neben Weichmachern auch Flammschutzmittel enthalten, so gibt es z.B. bestimmte Anforderungen an das Brennverhalten z.B. nach EN 60332-1-2 für Kabel aus dem Energie- und Elektrotechnik-Bereich ²⁷. Auch eine mögliche Belastung mit Flammschutzmitteln von PVC-Altkabeln aus dem Bauchbereich ist wahrscheinlich (Thurner, 2017). In Kapitel 4 wurden chlorierte Paraffine (SCCP, MCCP), chlorierte Paraffinwachse und Kohlenwasserstoffwachse identifiziert.

Hart-PVC, das im Baubereich vor allem in Fenstern und Rohren verwendet wird, kommt ohne Weichmacher aus. Jedoch werden verschiedene Stabilisatoren (z.B. gegen Wärme und Licht) eingesetzt. Häufig verwendete Stoffe, die im Rahmen dieses Projektes als prioritär betrachtet werden, sind verschiedene organische Verbindungen und Salze der Metalle Cadmium und Blei.

²⁵ <https://echa.europa.eu/documents/10162/aaa92146-a005-1dc2-debe-93c80b57c5ee>

²⁶ https://echa.europa.eu/de/applications-for-authorization-previous-consultations?diss=true&search_criteria_ecnumber=204-211-0&search_criteria_casnumber=117-81-7&search_criteria_name=Bis%282-ethylhexyl%29+phthalate

²⁷ Flammtests für elektrische Kabel und Leitungen (inkl. Datenleitungen)

Wenn im Weiteren auf Cadmium oder Blei verwiesen wird, sind immer auch die entsprechenden Salze gemeint.

Cadmium ist unter REACH durch eine Beschränkung reguliert (Annex XVII, Eintrag 23²⁸) und darf in Kunststoffen in einer maximalen Konzentration von 0,01 % w/w vorkommen. Ausgenommen ist hierbei rezykliertes PVC in bestimmten Erzeugnissen (u.a. Fensterrahmen), welche eine maximale Cd-Konzentration von 0,01 % beinhalten kann. Gleiches gilt für PVC-Rohre, die nicht für den Transport von Trinkwasser genutzt werden. Dabei muss allerdings das rezyklierte PVC durch eine Schicht von neu produzierten PVC abgedeckt sein. Eine gleichartige Recycling Ausnahme war auch für Blei geplant (Annex XVII, Eintrag 33²⁹) und, die im in Form einer Recycling-Ausnahme in die existierende REACH-Beschränkung mit aufgenommen werden sollte. Ein entsprechender Antrag ist aber vor kurzem (Februar 2020) im EU-Parlament gescheitert.

5.2.2.2 PE-HD/MD

Nach Conversio (2018a) wurden in Deutschland im Jahr 2017 rund 1,8 Mio. t PE-HD/MD verarbeitet. Rund 15 % davon entfielen auf den Baubereich.

Bauprodukte aus PE-HD/MD sind Baustoffe mit einer hohen Dichte, welche jedoch wenig flexibel sind. Folgende Produkte aus PE-HD/MD wurden als relevant identifiziert:

- ▶ PE-HD-Rohre
- ▶ Abwasser-, Kaltwasser-Rohre
- ▶ Elektro-Installationsrohre
- ▶ Bodenbeläge (v.a. Bodenplatten im Außenbereich)
- ▶ Heizöltanks
- ▶ Bauplatten und Dämmelemente

Nach Linder (2019) sind Rohre das wichtigste Bauprodukt aus PE-HD/MD. Laut einer Studie des UBA (2019b) wurden im Jahr 2014 26 Ma.-% des PE-HD als Spritzgutteile und Rohre im Bausektor verarbeitet und 16 Ma.-% als Sonstige Produkte, z.B. Folien.

Polyethylen benötigt keine weitere Zugabe von Weichmachern und weiteren Stabilisatoren, daher wurden im Rahmen von Kapitel 4 vor allem Flammschutzmittel, Pigment und Biostabilisator als prioritäre Stoffe identifiziert. Bei den Flammschutzmitteln handelt es sich teilweise um POP-Stoffe (SCCP, POP-BDE, HBCDD) bzw. POP-Kandidaten (Dechloran Plus). Tetrabromobisphenol A wird momentan auf eine mögliche Listung als SVHC bewertet (betrachtet werden PBT- und EDC-Kriterien). In Bezug auf die als relevant identifizierten Bauprodukte sollte daher zuerst geprüft werden, ob ein Flammschutzmittel zum Einsatz gekommen ist. So ist bekannt, dass bestimmte PE-Rohre, wenn sie als Lüftungsrohre verwendet werden mit Flammschutzmitteln behandelt werden, damit sie der DIN V 4102-21³⁰ entsprechen. Für die anderen Erzeugnisse wurde keine Angabe gefunden, ob eine Zugabe von Flammschutzmitteln nötig ist.

²⁸ <https://echa.europa.eu/documents/10162/3bfef8a3-8c97-4d85-ae0b-ac6827de49a9>

²⁹ <https://echa.europa.eu/documents/10162/3f17bafa-d554-4825-b9d5-abe853c2fda2>

³⁰ Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 21: Beurteilung des Brandverhaltens von feuerwiderstandsfähigen Lüftungsleitungen

Weitere mögliche andere Stoffe werden als Pigmente eingesetzt, hierzu zählen verschiedene Chromverbindungen und andere Pigmente. Perylen-3,4:9,10-tetracarboxydiimid wird aufgrund von vermuteten PBT/vPvB-Kriterien bewertet³¹. Pigmente werden meist mit einer Konzentration von bis zu 2 % w/w in Kunststoffen eingesetzt.³² Die Zugabe von Pigmenten ist in Hinblick auf Bauprodukte schwer zu beurteilen. Dies liegt zum Einem daran, dass die genannten Chrom-Verbindungen eine Vielzahl an verschiedenen Farben abdecken und zum anderen, dass die Pigmente lediglich als optische Komponente hinzugefügt werden.

Verschiedene Arsen-Verbindungen wurden in der Vergangenheit als Biostabilisator mit einer Konzentration von bis zu 0,05 % w/w eingesetzt. Den gleichen Einsatz findet auch Triclosan, ein Stoff der momentan durch die ECHA aufgrund auf einer möglichen Listung als SVHC bewertet (betrachtet werden PBT- und EDC-Kriterien). Triclosan wird mit einer Konzentration von bis zu 0,05 % w/w eingesetzt. Es gibt keinen Hinweis, dass die oben identifizierten Bauprodukte mit Biostabilisatoren versetzt werden. Jedoch ist bekannt, dass z.B. Kunststoff-Schneidebretter Triclosan enthalten.

5.2.2.3 EPS

Nach Conversio (2018a) wurden in Deutschland im Jahr 2017 308.000 t EPS verarbeitet. Mit rund 271.000 t hatte der Baubereich den weitaus größten Anteil (88 %).

Für die Zwecke dieses Vorhabens wurden die folgenden Erzeugnisse aus EPS im Baubereich als relevant identifiziert und hinsichtlich enthaltener Schadstoffe näher betrachtet:

► Wärmedämmplatten

Da EPS im Baubereich überwiegend in Form von Platten zur Wärmedämmung verbaut wird, spielen Flammschutzmittel, welche die Produktsicherheit der Dämmplatten erhöhen, bei EPS die wichtigste Rolle unter den Additiven.

Im Rahmen des Projektes wurden HBCDD und Ruß als relevant identifiziert (siehe Kapitel 4.3.5). Im Weiteren wird nur HBCDD betrachtet, da davon ausgegangen werden kann, dass Ruß in der EPS-Polymermatrix gebunden vorliegt und daher keine Risiken bestehen. Die Priorisierung von Ruß wurde unter der Annahme getätigt, dass Ruß innerhalb von REACH als CMR- und PBT-Substanz klassifiziert ist. Jedoch beschränkt sich, zumindest die CMR-Klassifizierung, auf eine bestimmte physikalische Zustandsform (feste Bulk Güter, Puder bzw. granuläre Paste)³³.

Besonders HBCDD wurde bei EPS-Dämmmaterialien, bis zu seinem Verbot im Jahr 2015, häufig als Flammschutzmittel mit einem Gewichtsanteil von bis zu 0,7% bei der Produktion von Wärmedämmplatten zugesetzt. UBA (2015) gibt ein rechnerisches HBCDD-Depot in verbaulichem EPS von etwa 42.800 t für den Zeitraum 1966 bis 2016 an.

³¹ <https://echa.europa.eu/de/information-on-chemicals/evaluation/community-rolling-action-plan/corap-table/-/dislist/details/0b0236e182f8e6e4>

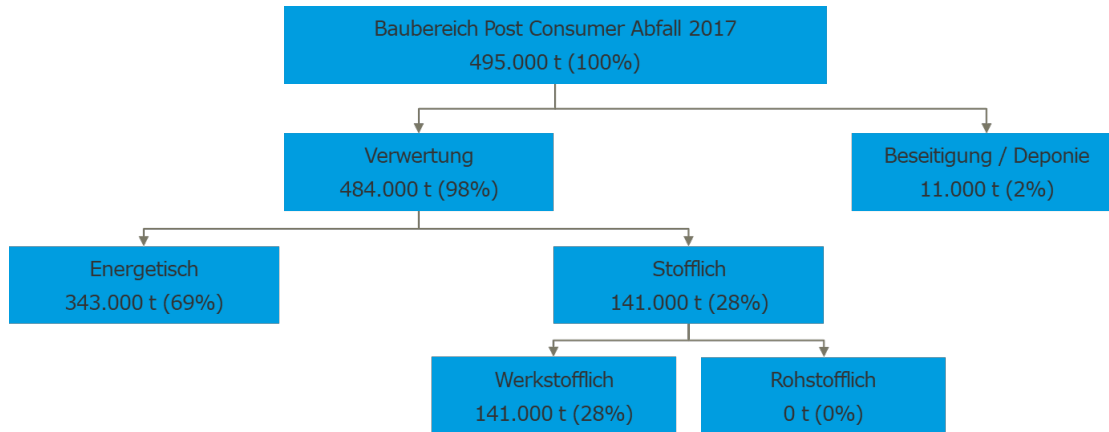
³² <https://echa.europa.eu/de/mapping-exercise-plastic-additives-initiative>

³³ <https://echa.europa.eu/de/information-on-chemicals/cl-inventory-database/-/discli/details/122825> Status der

5.2.3 Abfallströme und Entsorgungswege

Betrachtet man alle Post-Consumer-Kunststoffabfälle aus dem Baubereich (rund 495.000 t in 2017), ergeben sich folgende Entsorgungswege (Abbildung 10):

Abbildung 10: Überblick über Entsorgungswege von Post-Consumer Kunststoffabfällen aus dem Baubereich in Deutschland im Jahr 2017



Quelle: (Ramboll verändert nach Conversio (2018a))

Im Folgenden werden Abfallströme und Entsorgungswege der ausgewählten Kunststoffpolymere und Erzeugnisse näher beschrieben. Sofern keine spezifischen Informationen zu Entsorgungswegen identifiziert wurden, wurde entsprechend auf die Gesamtstatistik zur Entsorgung von Post-Consumer Kunststoffabfällen aus dem Baubereich bzw. Gesamtstatistik zur Entsorgung von Post-Consumer PVC-Kunststoffabfällen aus dem Baubereich verwiesen.

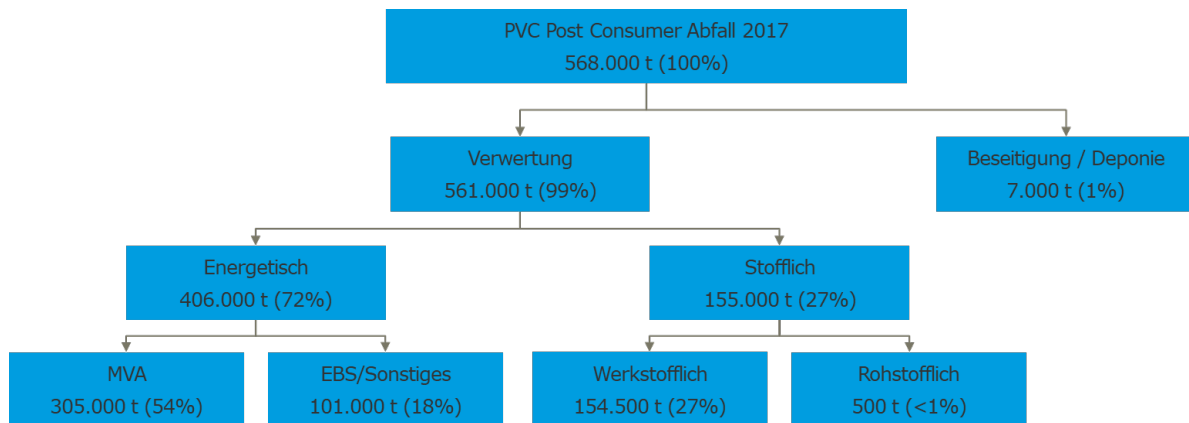
5.2.3.1 PVC

Post-Consumer Abfälle - Gesamt

Nach Conversio (2018b) fielen im Jahr 2017 insgesamt 0,57 Mio. t PVC Post-Consumer Abfälle an. Nachstehende Abbildung 11 gibt eine Übersicht über die Entsorgungswege aller PVC Post-Consumer Abfälle. Es wird deutlich, dass die energetische Verwertung mit rund 72 % den bedeutendsten Entsorgungsweg darstellt. Die werkstoffliche Verwertung lag bei etwa 27 %. Mit rund 1 % spielt die Beseitigung kaum eine Rolle.

Im Baubereich lag die Abfallmenge bei etwa 0,25 Mio. t Informationen zu Entsorgungswegen der speziell im Baubereich angefallenen PVC Abfälle liegen nicht vor.

Abbildung 11: Überblick über Entsorgungswege von PVC Post-Consumer Abfällen in Deutschland im Jahr 2017



Quelle: (Conversio, 2018b)

PVC Altfenster

PVC Fensterrahmen werden üblicherweise wie folgt gesammelt:

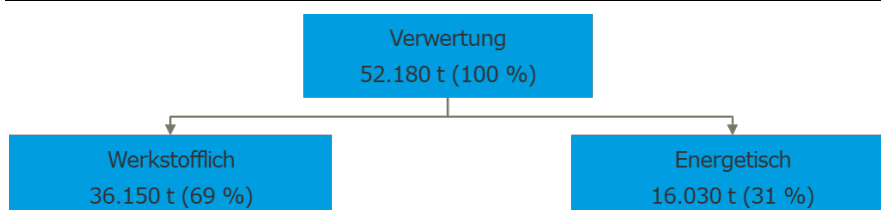
- ▶ Getrennterfassung in Containern an der Baustelle
- ▶ Rücknahme überwiegend über Rewindo (Recycling-Initiative der deutschen Kunststoffprofilhersteller für ausgebaute Fenster, Rollläden und Türen aus Kunststoff)

Die anschließende Behandlung lässt sich nach der Webseite von (Rewindo) wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Behandlung in Wiederaufbereitungsanlagen
- ▶ Trennung von Kunststoff, Glasresten, Metall und Gummi durch Schreddern und weiteres Zerkleinern
- ▶ PVC-Aufbereitung und Gewinnung von sortenreinem Granulat
- ▶ Energetische Verwertung

Nachstehende Abbildung 12 zeigt nach Conversio (2019), wie Altfenster und verwandte Produkte (z.B. Rollläden, Türrahmen, etc.) im Jahr 2018 entsorgt wurden. Demnach lag das Abfallaufkommen (bezogen auf das PVC-Polymer) bei etwas mehr als 52.000 Tonnen. Die Quote für das werkstoffliche Recycling lag bei ca. 70 %. Die restlichen rund 30 % wurden energetisch verwertet.

Abbildung 12: Überblick über Entsorgungswege von PVC Altfenstern und verwandten Produkten in Deutschland im Jahr 2018



Quelle: (Ramboll verändert nach Conversio (2019))

Die aus dem Recyclingprozess hervorgehenden Rezyklate können nach (Rewindo Best Practice) wie folgt genutzt werden:

- ▶ Wiedereinsatz der Altmaterialien in der ursprünglichen Anwendung als Fenster- und Bauprofil (Rezyklatkern)
- ▶ Recyclingprozess lässt sich theoretisch mindestens siebenmal wiederholen, ohne dass die bauphysikalischen Vorteile des PVC beeinträchtigt werden

PVC Rohre

PVC Rohre werden üblicherweise wie folgt gesammelt:

- ▶ Zum Teil Getrennterfassung in Gitterboxen über Sammel- und Wiederverwertungssystem des Kunststoff-rohrverbands (KRV)
- ▶ Zum Teil keine Getrennterfassung, sondern Sammlung zusammen mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruchabfälle)

Hinweis: nachfolgende Informationen beziehen sich nicht explizit auf PVC-Kunststoffrohre im Baubereich, sondern auf Kunststoffrohre im Allgemeinen.

Die anschließende Behandlung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ **Behandlung getrennt erfasster Abfälle nach KRV (2019) und KRV Webseite:** über KRV System getrennt erfasste Kunststoffrohrabfälle werden einem werkstofflichen Recycling zugeführt (PVC, PE, PP). Jährlich werden rund 5.000 Tonnen Kunststoffrohrabfälle in Deutschland recycelt (die Gesamtmenge, der seitens der Kunststoffrohrhersteller in Deutschland insgesamt wiederverwerteten Altware liegt bei jährlich rund 40.000 Tonnen -> neben Altrohren und Verarbeitungsresten fließen auch Baustellenabfälle, Fensterprofile, Verpackungen sowie Schraubverschlusskappen aus Kunststoff in die Wiederverwertung ein).
- ▶ **Behandlung gemischt erfasster Abfälle nach BBSR (2017):** Kunststoffproduktabfälle, für die keine Getrennterfassung erfolgt, gelangen in der Regel als Bestandteile der Fraktionen Baustellenabfälle und als Fremdstoffe im Bauschutt zur Entsorgung. Beschritten wird die Verwertung dann insbesondere über thermische Prozesse, bei denen die Materialien als Brennstoff beziehungsweise zur Energieerzeugung genutzt werden. Dazu werden im Bauschutt verbliebene Kunststoffe im Zuge der Bauschuttaufbereitung als Verunreinigungen des mineralischen Materials von diesem abgetrennt (Negativsortierung) oder bei der Aufbereitung beziehungsweise Sortierung von Baustellenabfällen oft zusammen mit weiteren brennbaren Materialien (u. a. Holz, Papier) zu einer heizwertreichen Fraktion zusammengeführt.

Hinsichtlich des Entsorgungsweges lässt sich zusammenfassen, dass getrennt erfasste (PVC-) Kunststoffrohre in der Regel werkstofflich recycelt und gemischt erfasste PVC-Kunststoffrohre überwiegend energetisch verwertet werden. Gemischt erfasste Abfälle werden teilweise auch noch aus dem Gemisch aussortiert und anschließend werkstofflich verwertet. Da keine spezifischen Informationen bezüglich der Mengenteile an bestimmten Entsorgungswegen

vorliegen, wird angenommen, dass PVC-Rohre wie PVC Post-Consumer Abfälle insgesamt entsorgt werden, nach Conversio (2018a):

- ▶ Energetische Verwertung: 72 % (54 % in MVA, 18 % in EBS / Sonstige)
- ▶ Werkstoffliche Verwertung: 27 %
- ▶ Deponierung: 1 %

Die aus Recyclingprozessen hervorgehenden Rezyklate können nach KVR (2019) wie folgt genutzt werden:

Für Rohre aus recycelten Materialien finden sich – unter Berücksichtigung bestehender Qualitätsstandards - eine Vielzahl von Verwendungsmöglichkeiten. Diese liegen insbesondere im Bereich der Abwasserentsorgung, des Regenwassermanagements sowie des Kabelschutzes. So dürfen bei Vollwand-Rohren und Formstücken, die zum Bau druckloser Abwasserkanäle verwendet werden, zehn bis fünfzehn Prozent Rezyklat zugegeben werden. Bei mehrschichtigem Rohrwandaufbau darf die Mittelschicht sogar bis zu einhundert Prozent aus Rezyklaten bestehen. Kunststoffrohre aus Recyclingware kommen auch beim Sammeln und Ableiten von Oberflächen- und Sickerwasser, etwa im Verkehrswege- und Tiefbau, zum Einsatz. Rohre und Formstücke für den Kabelschutz, etwa bei erdverlegten Breitband- oder Stromübertragungsleitungen, dürfen ebenfalls aus Rezyklaten hergestellt werden. Im Bereich der Trinkwasser- und Gasversorgung hingegen wird aus Gründen der Hygiene und des Gesundheitsschutzes, der Sicherheit und des Umweltschutzes ausschließlich Neuware verbaut. Auch die aus Sekundärware hergestellten Rohre werden nach Nutzungsende gesammelt, sortiert und nochmals wiederverwertet. Naturgemäß kommen die daraus gefertigten Rohre nur für Anwendungen mit niedrigerem Qualitätsanspruch in Frage.

PVC Dach- und Dichtungsbahnen

PVC Dach- und Dichtungsbahnen werden üblicherweise wie folgt gesammelt:

- ▶ Zum Teil **Getrennterfassung** über Rücknahme- und Recyclingsystem für Kunststoff-Dach- und Dichtungsbahnen ROOFCOLLECT & Entsorgungspartner über Big Bags oder Container bei Großbaustellen
- ▶ Zum Teil **keine Getrennterfassung**, sondern Sammlung zusammen mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruchabfälle)

Die anschließende Behandlung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Über ROOFCOLLECT getrennt erfasste Dach- und Dichtungsbahnen: in Deutschland werden nahezu 100 % jener gebrauchten Dachbahnen recycelt, die sammel- und verfügbar sind (Roofcollect Webseite)
- ▶ Behandlung gemischt erfasster Abfälle nach BBSR (2017): siehe Beschreibung zu Rohren weiter oben im Kapitel

Da keine spezifischen Informationen bezüglich der Mengenanteile an bestimmten Entsorgungswegen vorliegen, wird angenommen, dass PVC-Dach- und Dichtungsbahnen wie PVC Post-Consumer Abfälle insgesamt entsorgt werden, nach Conversio (2018a):

- ▶ Energetische Verwertung: 72 % (54 % in MVA, 18 % in EBS / Sonstige)

- ▶ Werkstoffliche Verwertung: 27 %
- ▶ Deponierung: 1 %

Die aus Recyclingprozessen hervorgehenden Rezyklate können nach der Webseite von (Roofcollect) sowie der Webseite von (FG Kunststoffmatten GmbH) wie folgt genutzt werden:

- ▶ ROOFCOLLECT arbeitet mit mehreren Recyclinganlagen zusammen. Diese verwerten die Bahnen vollständig und stellen daraus neue Produkte wie z.B. Kunststoffmatten her. Oder sie vermahlen das gebrauchte Material für neue Anwendungen.
- ▶ Herstellung von Matten für den Reitsport, Veranstaltungen, Garten-, Landschafts- und Wegebau

PVC Boden- und Wandbeläge

PVC Bodenbeläge werden üblicherweise wie folgt gesammelt:

- ▶ Zum Teil **Getrennterfassung** und Weiterleitung zu Annahmestellen für Alt-PVC-Fußbodenbeläge des bundesweiten Rücknahmesystems der AgPR (Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling)
- ▶ Zum Teil **keine Getrennterfassung**, sondern Sammlung zusammen mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruchabfälle)

Die anschließende Behandlung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Behandlung getrennt erfasster und sortierter Fußbodenbeläge in AgPR-Recyclinganlage Troisdorf (~ 2.500 t pro Jahr) und Herstellung von PVC-Rezyklat in mehreren Schritten: die sortierten Alt-PVC-Bodenbeläge werden zuerst zu Chips von höchstens 30 Millimetern zerkleinert. Nach einer magnetischen Metallabscheidung befreit eine Hammermühle die Chips von anhaftenden Estrich- und Kleberresten, die dann abgesiebt werden. Zur anschließenden Feinmahlung wird das PVC-Material mit flüssigem Stickstoff auf eine Temperatur von minus 40 °C gekühlt. Durch die Abkühlung verspröden die PVC-Chips kurzzeitig und können so in der Feinmühle zu Partikeln mit einem Durchmesser von maximal 0,4 Millimetern zermahlen werden. Abgefüllt in Big Bags wird das Material u. a. an die Gesellschafter der AgPR geliefert
- ▶ Behandlung gemischt erfasster Abfälle nach BBSR (2017): siehe Beschreibung zu Rohren weiter oben im Kapitel

Da keine spezifischen Informationen bezüglich der Mengenanteile an bestimmten Entsorgungswegen vorliegen, wird angenommen, dass PVC-Bodenbeläge wie PVC Post-Consumer Abfälle insgesamt entsorgt werden, nach Conversio (2018a):

- ▶ Energetische Verwertung: 72 % (54 % in MVA, 18 % in EBS / Sonstige)
- ▶ Werkstoffliche Verwertung: 27 %
- ▶ Deponierung: 1 %

Die aus Recyclingprozessen hervorgehenden Rezyklate können nach AgPR (2020) wie folgt genutzt werden:

- ▶ AgPR-Recyclinganlage: bei Eignung unter anderem Einsatz für die Produktion neuer Fußbodenbeläge

PVC Kabelummantelungen

Kabelummantelungen aus PVC werden üblicherweise wie folgt gesammelt:

- ▶ Zum Teil **Getrennterfassung** an Baustellen oder an Recyclingstellen und Weiterleitung zu Annahmestellen für Kabelrecycling. Im Falle einer Entsorgung als Elektroschrott werden die Kabel in der Regel ebenfalls aussortiert und an eine Annahmestelle für Kabelrecycling weitergeleitet.
- ▶ Zum Teil **keine Getrennterfassung**, sondern Sammlung zusammen mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruchabfälle) oder Entsorgung über den Restmüll.

Die anschließende Behandlung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Die Behandlung getrennt erfasster Kabel in Kabelrecycling-Betrieben zur Herstellung von PVC-Rezyklat erfolgt nach Kettler (2009) in mehreren Schritten. In einem ersten Schritt werden meist händisch Fremdstoffe entfernt. Anschließend werden die Kabel zerkleinert und die Kunststoffanteile von der metallischen Fraktion getrennt. Die Trennung erfolgt zunächst über ein Windsichtungsverfahren. Die verbliebene metallische Fraktion kann über einen Magnetscheider abgetrennt werden. Nicht-metallische Anteile werden anschließend über Wirbelstromscheidung oder Dichtentrennung entfernt. Das übriggebliebene PVC wird zu Granulat aufbereitet. Als mögliche Einsatzbereiche werden Bakenfüße zur Straßensicherung, Leit- und Temposchwellen, Lübecker Hütchen und Schwerlastmatten angegeben
- ▶ Behandlung gemischt erfasster Abfälle nach BBSR (2017): siehe Beschreibung zu Rohren weiter oben im Kapitel

Hinsichtlich des Entsorgungsweges wird angenommen, dass Kabel aufgrund ihres hohen Kupferanteils meist einer getrennten Erfassung zugeführt werden. Beim Recycling von PVC-Kabeln steht der metallische Anteil meist im Vordergrund. Spezifische Informationen bezüglich des Recyclings von Kabelummantelungen konnten nicht identifiziert werden.

5.2.3.2 PE-HD/MD

PE-HD/MD - Gesamt

Nach UBA (2019c) fielen im Jahr 2015 im Post-Consumer Bereich 0,98 Mio. t PE-HD Abfälle an. Davon wurden etwa 32 % einer stofflichen Verwertung zugeführt, 67 % einer energetischen Verwertung / thermischen Behandlung zugeführt, und rund 1,5 % deponiert.

Die stoffliche Verwertung von PE-HD findet zu einem Großteil im Ausland statt. Für das Jahr 2015 lässt sich feststellen, dass von 416.000 t PE-HD (Post-Consumer und Post-Industrial Abfälle) rund 276.000 t für eine stoffliche Verwertung ins Ausland exportiert wurden und nur 140.000 t im Inland verwertet wurden. PE ist somit das einzige der untersuchten Polymere, bei

welchem sich eine relevante Exportmenge im Rahmen der stofflichen Verwertung feststellen ließ (UBA, 2019c). Aus der im Inland recycelten PE-HD Menge von 140.000 t konnten 111.000 t PE-HD Granulat gewonnen werden. Dehoust (2012) geht davon aus, dass am Ende des Recyclings von Post-Consumer Abfällen eine Granulatausbeute von 72% zu erwarten ist. Der nicht-recyclebare Anteil wird einer energetischen Verwertung zugeführt.

PE-HD-Rohre

PE-HD Rohre werden üblicherweise wie folgt gesammelt:

- ▶ Zum Teil **Getrennterfassung** in Gitterboxen über Sammel- und Wiederverwertungssystem des Kunststoffrohrverbands (KRV)
- ▶ Zum Teil **keine Getrennterfassung**, sondern Sammlung zusammen mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruchabfälle)

Die anschließende Behandlung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ **Behandlung getrennt erfasster Abfälle nach KRV (2019) und KRV Webseite:** siehe Beschreibung zu Rohren weiter oben im Kapitel
- ▶ **Behandlung gemischt erfasster Abfälle nach BBSR (2017):** siehe Beschreibung zu Rohren weiter oben im Kapitel

Da keine spezifischen Informationen bezüglich der Mengenanteile an bestimmten Entsorgungswegen vorliegen, wird angenommen, dass PE-HD Rohre wie PE-HD Post-Consumer Abfälle insgesamt entsorgt werden, nach UBA (2019c):

- ▶ Energetische Verwertung: 67 %
- ▶ Werkstoffliche Verwertung: 32 %
- ▶ Deponierung: 1 %

Die aus Recyclingprozessen hervorgehenden Rezyklate können nach KVR (2019) wie folgt genutzt werden: siehe Beschreibung zu Rohren weiter oben im Kapitel.

Bodenbeläge (v.a. Bodenplatten im Außenbereich)

PE-HD Bodenbeläge werden üblicherweise wie folgt gesammelt:

- ▶ Zum Teil **Getrennterfassung** in Containern an Baustellen
- ▶ Zum Teil **keine Getrennterfassung**, sondern Sammlung zusammen mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruchabfälle)

Da keine spezifischen Informationen bezüglich der Mengenanteile an bestimmten Entsorgungswegen vorliegen, wird angenommen, dass PE-HD Bodenbeläge wie PE-HD Post-Consumer Abfälle insgesamt entsorgt werden, nach UBA (2019c):

- ▶ Energetische Verwertung: 67 %
- ▶ Werkstoffliche Verwertung: 32 %
- ▶ Deponierung: 1 %

Heizöltanks

Heizöltanks aus PE-HD werden üblicherweise wie folgt gesammelt:

- ▶ Zum Teil **Getrennterfassung** an Baustellen oder bei Rückbau durch Entsorgungsbetriebe. Heizöltanks müssen nach den Vorschriften des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG § 19 I) durch einen zertifizierten Fachbetrieb stillgelegt werden, welche die Entsorgung oft mit übernehmen. Je nach Bundesland gibt es unterschiedliche Grenzwerte für Tankvolumina, ab welchen Heizöltanks von einem Fachbetrieb zu entsorgen sind. Die Behördliche Zuständigkeit liegt bei der unteren Wasserbehörde. Gereinigte und demontierte Heizöltanks aus Kunststoff werden in der Regel an einer Abfallannahmestelle gesammelt.
- ▶ Zum Teil **keine Getrennterfassung**, sondern Sammlung zusammen mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruchabfälle).

Da keine spezifischen Informationen bezüglich der Mengenanteile an bestimmten Entsorgungswegen vorliegen, wird angenommen, dass PE-HD Heizöltanks wie PE-HD Post-Consumer Abfälle insgesamt entsorgt werden, nach UBA (2019c):

- ▶ Energetische Verwertung: 67 %
- ▶ Werkstoffliche Verwertung: 32 %
- ▶ Deponierung: 1 %

Das Eindringen von Mineralölen in den Werkstoff erschwert die werkstoffliche Verwertung von PE-HD aus Heizöltanks (Hirth & Woidasky, 2004). Möglichkeiten der Wiederverwertung von PE-HD aus Heizöltanks wurden auch vom Fraunhofer ICT (Webseite Fraunhofer ICT) untersucht. Mithilfe von überkritischem Kohlendioxid konnten eindiffundierte Kohlenwasserstoffe aus dem Kunststoff entfernt werden. Die Rezyklierbarkeit von PE-HD aus Heizöltanks ist aus technischer Sicht also möglich, eine mengenrelevante Anwendung der Technologie findet in Deutschland aktuell jedoch nicht statt.

Bauplatten und Dämmelemente

Bauplatten und Dämmelemente aus PE-HD werden üblicherweise wie folgt gesammelt:

- ▶ Zum Teil **Getrennterfassung** in Containern an Baustellen
- ▶ Zum Teil **keine Getrennterfassung**, sondern Sammlung zusammen mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruchabfälle)

Da keine spezifischen Informationen bezüglich der Mengenanteile an bestimmten Entsorgungswegen vorliegen, wird angenommen, dass Bauplatten und Dämmelemente aus PE-HD wie PE-HD Post-Consumer Abfälle insgesamt entsorgt werden, nach UBA (2019c):

- ▶ Energetische Verwertung: 67 %
- ▶ Werkstoffliche Verwertung: 32 %
- ▶ Deponierung: 1 %

5.2.3.3 EPS

Die überwiegende Menge des im Baubereich verwendeten HBCDDs ist noch im Umlauf und wird erst in Zukunft in die Abfallströme gelangen. Insbesondere gilt das für EPS-Schäume: einerseits aufgrund ihrer hohen Lebensdauer (50 +/- 25 Jahre) und andererseits aufgrund der hohen Verwendungsmengen von HBCDD für diesen Bereich.

Nach Conversio (2018a) fielen im Jahr 2017 in Deutschland rund 125.000 Tonnen EPS Abfall an (Post-Consumer Abfall 100.000 t, Abfälle aus Produktion und Verarbeitung 25.000 t). Es wird angenommen, dass diese Abfälle überwiegend in Form von Dämmplatten aus dem Baubereich angefallen sind.

UBA (2015) schätzt, dass EPS-Abfälle aus dem Baubereich bei Abbruch und Sanierung zu mehr als 95 % vom Bauschutt getrennt und direkt einer energetischen Verwertung zugeführt werden.

Für Abfälle, welche nicht bereits bei Abbruch und Sanierung abgetrennt werden (< 5 %), werden Beseitigungs- und Verwertungsquoten für Post-Consumer Kunststoffabfälle aus dem Baubereich zugrunde gelegt. Folgt man diesem Ansatz, so ergeben sich nach Conversio (2018a) für das Jahr 2017 für alle nicht abgetrennten EPS-Dämmmaterialien folgende Entsorgungswege: 69 % energetische Verwertung, 28 % werkstoffliche Verwertung sowie 2 % Deponierung.

Gründe für die fehlende Abtrennung sind vielfältig. Eine saubere Abtrennung ist beispielsweise wegen der Anhaftung an mineralischen Anteilen (Beton, Ziegel, Putz, etc.) in der Praxis nur schwer möglich. Dadurch gelangen Störstoffe in mineralische Anteile. Ein nicht quantifizierbarer Anteil des EPS Abfalls wird daher gemeinsam mit dem mineralischen Bauschuttanteil verwertet bzw. deponiert.

Ein weiterer nicht quantifizierbarer Anteil wird zusammen mit anderen nicht mineralischen Kunststoffabfällen aus dem Baubereich stofflich verwertet. Durch den Eintrag dieser Abfallmengen in die mit HBCDD unbelastete Kunststoffabfallfraktion aus dem Baubereich berechnet UBA (2015) für das Jahr 2012 eine theoretische HBCDD Konzentration von 29 ppm in allen Kunststoffabfällen aus dem Baubereich.

Ein unbekannter Anteil der EPS Produkte verbleibt nach UBA (2015) auch in der Umwelt z.B., wenn Fundamentisolierungen oder Isolierungen gegen Frostschäden im Straßen- und Schienenbau beim Abriss nicht vollständig entfernt werden.

Nachstehende Tabelle 23 fasst die Entsorgungswege der als relevant identifizierten Erzeugnisse im Baubereich, einschließlich ausgewählter Schadstoffe, zusammen.

Tabelle 23: Zusammenfassung zu Schadstoffen und Entsorgungswegen der als relevant identifizierten Erzeugnisse im Baubereich

Kunststoffart	Erzeugnis	Schadstoffe	Sammlung	Behandlung und Entsorgung	Bei Recycling: Beispiele für weitere Nutzung der Rezyklate
PVC	Fensterrahmen	Cd, Pb	Getrennterfassung	Werkstoffliche Verwertung: 69 % (36.000 t) Energetische Verwertung: 31 % (16.000 t)	Wiedereinsatz der Altmaterialien in der ursprünglichen Anwendung als Fenster- und Bauprofil (Rezyklatkern)
PVC	Rohre	Cd, Pb	Getrennterfassung oder gemischt mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruch-abfälle)	Allgemeine Statistik zu PVC-Kunststoffabfällen im Baubereich: Energetische Verwertung: 72 % (54 % in MVA, 18 % in EBS / Sonstige) (406.000 t) Werkstoffliche Verwertung: 27 % (154.500 t) Deponierung: 1 % (7.000 t)	Diverse Anwendungen, u.a. im Bereich der Abwasserentsorgung, des Regenwassermanagements sowie des Kabelschutzes
PVC	Dach- und Dichtungsbahnen	Niedermolekulare Phthalate, BPA und SCCPs	Getrennterfassung oder gemischt mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruch-abfälle)	Allgemeine Statistik zu PVC-Kunststoffabfällen im Baubereich: Energetische Verwertung: 72 % (54 % in MVA, 18 % in EBS / Sonstige) (406.000 t) Werkstoffliche Verwertung: 27 % (154.500 t) Deponierung: 1 % (7.000 t)	Herstellung von Matten für den Reitsport, Veranstaltungen, Garten-, Landschafts- und Wegebau
PVC	Boden- und Wandbeläge	Niedermolekulare Phthalate, BPA und SCCPs	Getrennterfassung oder gemischt mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruch-abfälle)	Allgemeine Statistik zu PVC-Kunststoffabfällen im Baubereich: Energetische Verwertung: 72 % (54 % in MVA, 18 % in EBS / Sonstige) (406.000 t) Werkstoffliche Verwertung: 27 % (154.000 t)	AgPR-Recyclinganlage: bei Eignung unter anderem Einsatz für die Produktion neuer Fußbodenbeläge

Kunststoffart	Erzeugnis	Schadstoffe	Sammlung	Behandlung und Entsorgung	Bei Recycling: Beispiele für weitere Nutzung der Rezyklate
				Deponierung: 1 % (7.000 t)	
PVC	Kabelummantelungen	Niedermolekulare Phthalate, BPA und SCCPs	Erfassung über Restmüll, gemischt mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruch-abfälle), oder über die Sammlung von EAG	Allgemeine Statistik zu PVC-Kunststoffabfällen im Baubereich: Energetische Verwertung: 72 % (54 % in MVA, 18 % in EBS / Sonstige) (406.000 t) Werkstoffliche Verwertung: 27 % (154.500 t) Deponierung: 1 % (7.000 t)	Bakenfüße zur Straßensicherung, Leit- und Temposchwellen, Lübecker Hütchen, Schwerlastmatten
PE-HD/MD	Heizöltanks		Getrennterfassung oder gemischt mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruch-abfälle)	Allgemeine Statistik zu PE-HD-Kunststoffabfällen: Energetische Verwertung: 67 % (655.000 t) Werkstoffliche Verwertung: 32 % (311.000 t) Deponierung: 1 % (15.000 t)	Durch eindiffundierte Kohlenwasserstoffe nur eingeschränkt möglich
PE-HD/MD	Rohre		Siehe Eintrag zu „Heizöltanks“	Siehe Eintrag zu „Heizöltanks“	Diverse Anwendungen, u.a. im Bereich der Abwasserentsorgung, des Regenwassermanagements sowie des Kabelschutzes
PE-HD/MD	Bodenbeläge (v.a. Bodenplatten im Außenbereich)		Siehe Eintrag zu „Heizöltanks“	Siehe Eintrag zu „Heizöltanks“	Keine Information
PE-HD/MD	Bauplatten und Dämmelemente		Siehe Eintrag zu „Heizöltanks“	Siehe Eintrag zu „Heizöltanks“	Keine Information

Kunststoffart	Erzeugnis	Schadstoffe	Sammlung	Behandlung und Entsorgung	Bei Recycling: Beispiele für weitere Nutzung der Rezyklate
EPS	Wärmedämmplatten	HBCDD	Getrennterfassung oder mit Bauschutt oder mit anderen Baustellenabfällen (gemischte Bau- und Abbruchabfälle)	Getrennt erfasste Abfälle (> 95 %): Energetische Verwertung: 100 % (95.000 t) Gemischt erfasste Abfälle (< 5 %): Energetische Verwertung: 69 % (3.450 t) Werkstoffliche Verwertung: 28 % (1.400 t) Deponierung: 2 % (100 t)	HBCDD-freies PS-E kann werkstofflich recycelt und als Polystyrol-„Re-Granulat“ verwendet werden (Konzentrationsgrenzwert 100 mg/kg)

Quelle: (Ramboll)

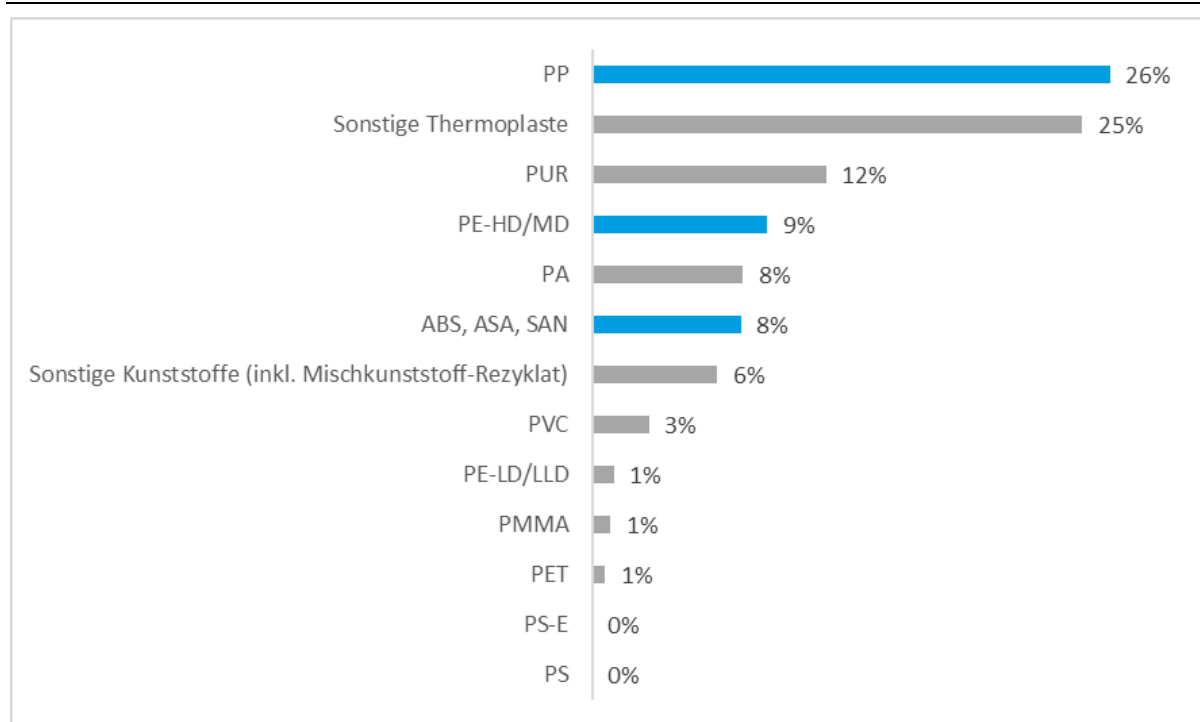
5.3 Automobilbereich

5.3.1 Kunststoffeinsatz im Überblick

Im Automobilbereich ersetzen Kunststoffe zunehmend Bauteile, welche früher aus Metall gefertigt wurden. Als Folge ist die Automobilindustrie in Deutschland mit einer Verarbeitungsmenge von rund 1,6 Mio. t im Jahr 2017 inzwischen zum drittgrößten Verbraucher von Kunststoffen geworden. Die Verarbeitung von Kunststoffrezyklaten im Automobilbereich ist mit einem Anteil von 4,8 % an der gesamten Verarbeitungsmenge bisher gering (66 % aus Produktions- und Verarbeitungsresten, 34 % aus Post-Consumer-Abfällen) (Conversio, 2018a).

Abbildung 13 zeigt, dass in der Automobilbranche eine Vielzahl unterschiedlicher Kunststoffarten zum Einsatz kommt (Hervorhebung in blauer Farbe: im Projektfokus stehende Kunststoffarten). Die im Jahr 2017 verarbeitete Kunststoffmenge von rund 1,6 Mio. t verteilte sich auf die folgenden 11 Kunststoffarten (einschl. als Gemisch / Sonstige ausgewiesene Kunststoffe).

Abbildung 13: Überblick über Verteilung der im Automobilbereich in Deutschland im Jahr 2017 verarbeiteten Kunststoffarten (in %)



Quelle: (Ramboll verändert nach Conversio (2018a))

Die verarbeiteten Kunststoffe wurden dabei in folgenden typischen Anwendungen eingesetzt:

- ▶ Interieur (u.a. Verkleidungen und Armaturentafeln): 53,5 %
- ▶ Exterieur (u.a. Stoßfänger): 17,5 %
- ▶ Under the hood (u.a. Motorenauskleidung, Kapselungen, Tank): 15 %
- ▶ Elektrik / Licht: 14 %

Der in Deutschland insgesamt verarbeiteten Menge von 1,6 Mio. t stand ein inländischer Verbrauch von 1,1 Mio. t und ein Abfallaufkommen von rund 0,23 Mio. t gegenüber Conversio (2018a). Eine relative hohe Exportquote und die langen Lebenszyklen im Automobilbereich sind die Hauptgründe für den signifikanten Unterschied zwischen der Kunststoffverarbeitung und der jährlich in Deutschland anfallenden Abfallmenge.

5.3.2 Relevante Erzeugnisse und darin enthaltene Schadstoffe

5.3.2.1 PP

Mit einer Verarbeitungsmenge von rund 2,4 Mio. t im Jahr 2017 ist PP der meistverarbeitete Kunststoff in Deutschland (Conversio, 2018a). Davon wurden etwa 0,4 Mio. t im Automobilbereich verbraucht, was einem Anteil von 17,3 % am Gesamtverbrauch entspricht.

Damit ist Polypropylen auch das am meisten verbaute Kunststoffpolymer in Fahrzeugen. Angaben zum Anteil von PP an Kunststoffen in Fahrzeugen variieren je nach Quelle zwischen 26-45 % (Schönmayr, 2017), (PlasticsEurope, 2013), (SPI, 2016). Die Hauptanwendungen von PP liegen im Innenraum sowie im Außenbereich, ein geringerer Teil entfällt jeweils auf elektronische Anwendungen sowie den Motorraum (PlasticsEurope, 2013).

Einzelne Fahrzeugkomponenten aus PP, welche als relevant eingestuft wurden, sind:

- ▶ Stoßfänger
- ▶ Scheinwerfer- und Heckleuchtegehäuse
- ▶ Radhausschalen
- ▶ Armaturenbretter
- ▶ Innen-Verkleidungen
- ▶ Kabelisolierungen

Ähnlich wie PE, benötigt auch PP keine Weichmacher, daher lässt sich sicher ausschließen, dass PP-Erzeugnisse aus dem Automobilbereich mit den entsprechenden Stoffen belastet sind. Auch hier wurden in Kapitel 4 hauptsächlich Flammschutzmittel, Pigmente und Biostabilisatoren identifiziert. Auch für den Automobilbereich und die oben aufgeführten Komponenten ist nicht bekannt, dass ein Biostabilisator für eine antimikrobielle Wirkung benötigt wird. Auch Pigmente sind nicht als zwingend relevant anzusehen, da hier erneut viele verschiedene Farben abgedeckt werden. Des Weiteren sind die genannten Erzeugnisse aus dem Automobilbereich häufig in schwarzer Farbe eingefärbt. Daher stellt sich erneut die Frage, ob die genannten Erzeugnisse flammgeschützt sein müssen oder nicht. Sander et al. (2017) gibt an, dass etwa die Hälfte des gesamten Kunststoffverbrauchs im Innenraum verbaut wird und dort mit erhöhter Wahrscheinlichkeit mit Flammschutzmitteln versehen ist. Betroffen von dieser Annahme wären demnach Armaturenbretter, die verschiedenen Teile der Innenverkleidung und Kabelisolierungen. Anhand der Ergebnisse aus Kapitel 4 sind die folgenden Flammschutzmittel als prioritär einzustufen: POP-BDE, HBCDD, Dechloran Plus und TBBPA. Inwieweit die genannten Stoffe tatsächlich in den jeweiligen Erzeugnissen vorkommen, lässt sich nur unzureichend klären.

Andere Quellen verweisen allerdings auch darauf, dass auch Stoßstangen mit POP-BDE belastet sein können (Mehlhart et al., 2018).

5.3.2.2 PE-HD/MD

Knapp 9 % der in Deutschland im Jahr 2017 insgesamt verarbeiteten PE-HD/MD Menge wurde im Automobilbereich eingesetzt (Conversio, 2018a).

Kunststoffe aus PE mit einer hohen oder mittleren Dichte werden im Automobilsektor überwiegend als Ausgangsstoff für Kraftstofftanks verwendet. Hintergrund ist die mit der Dichte ansteigende Chemikalienresistenz. Um die Gasundurchlässigkeit der Kraftstofftanks zu erhöhen, wird das PE-HD Polymer oft in Verbindung mit dem Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH) als Mehrschichttank verbaut. In einigen Fällen werden auch untere Motorraumabdeckungen, Wasserbehälter und Bremsflüssigkeitsbehälter aus PE-HD verbaut. Der Anteil von PE-HD an der Gesamtkunststoffmenge, welche in einem durchschnittlichen Fahrzeug verbaut wird, beträgt zwischen 7-9,7 % (Schönmeyr, 2017), (PlasticsEurope, 2013).

Analog zu PE aus dem Baubereich ist für dieses Kunststoffpolymer vor allem die Frage wichtig, ob die relevanten Erzeugnisse mit Flammschutzmitteln versetzt sind. Eine entsprechende Beschreibung ist in Kapitel 5.2.2.2 enthalten.

5.3.2.3 ABS

Kunststoffe aus ABS finden im Automobilbereich vielfältigen Einsatz. Durch die hohe Wärmeformbeständigkeit und Wetterresistenz können Komponenten aus ABS sowohl im Innen- als auch Außenbereich von Fahrzeugen verbaut werden. Angaben zum Massenanteil schwanken zwischen 4,7-7 % (Schönmayr, 2017), (PlasticsEurope, 2018). Conversio (2018a) gibt für das Jahr 2017 an, dass rund 122.000 t ABS (inklusive ASA und SAN) im Automobilsektor verbaut wurden. Dies entspricht einem Anteil von etwa 7,6 % am Kunststoffverbrauch im Automobilsektor.

Als relevante Erzeugnisse aus ABS wurden folgende Fahrzeugkomponenten identifiziert:

- ▶ Bauteile von Lüftungsanlagen
- ▶ Innen- und Außenraumverkleidungen
- ▶ Armaturenbretter
- ▶ Stoßfänger
- ▶ Kühlergrill

Im Gegensatz zu den anderen relevanten Kunststoffarten im Automobilbereich ist ABS der einzige Kunststoff, der metallisiert werden kann. Dies umfasst auch die im Automobilbereich beliebte Verchromung z.B. des Kühlergrills. Chrom selbst ist jedoch kein Kunststoffadditiv und wurde demnach auch nicht durch die Recherche in Kapitel 4 erfasst.

ABS ist ohne weitere Zugabe von entsprechenden Additiven weniger UV- bzw. witterungsbeständig als andere Kunststoffarten. Dementsprechend finden sich bei den prioritären Stoffen in Kapitel 4 eine Vielzahl an Stabilisatoren. Darunter sind mehrere UV-Stabilisatoren (UV-328, Octabenzon, 2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-p-kresol), Antistatika (Zinkoxid, Borax) und Antioxidantien (2,2'-Methylenbis(4-methyl-6-tert-butylphenol)). Auch Weichmacher werden in ABS eingesetzt, wenn eine Elastizität des eigentlichen rigiden Kunststoffes gewünscht ist. In Kapitel 4 wurden in diesem Zusammenhang DEHP (Bis(2-ethylhexyl)phthalat) und Triphenylphosphat identifiziert. Wenn die ABS-Erzeugnisse auch flammgeschützt sein sollen, können auch in ABS die entsprechenden Additive gefunden werden (Antimontrioxid,

Triphenylphosphat, HBCDD, POP-BDE, TBBPA, Dechloran Plus). Auch ABS kann eingefärbt werden, so dass auch hier entsprechende Pigmente gefunden werden können.

5.3.3 Abfallströme und Entsorgungswege

Im Folgenden werden zunächst mögliche Entsorgungswege von Altfahrzeugen beschrieben. Im Anschluss wird dargestellt, in welche Abfallströme relevante Erzeugnisse der ausgewählten Kunststoffpolymere PP, PE-HD/MD sowie ABS gelangen.

Altfahrzeuge - Gesamt

Aus dem „Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2017“ geht hervor, dass aus dem Inland rund 506.000 Altfahrzeuge zur Behandlung angenommen wurden. Das durchschnittliche Fahrzeuggewicht lag bei 1.047 kg und das durchschnittliche Altfahrzeugalter bei 17 bis 18 Jahren (BMU und UBA, 2019). Es wird angenommen, dass der Anteil von Kunststoffen an einem Fahrzeug durchschnittlich bei etwa 120-150 kg liegt.

Kunststoffabfälle aus dem Automobilbereich werden entweder manuell demontiert (große Kunststoffteile) oder mit der Restkarosse in Schredderanlagen behandelt.

Die Demontage großer Kunststoffteile vor dem Schreddern spielt nur eine sehr untergeordnete Rolle. Nach BMU und UBA (2019) wurden in Deutschland im Jahr 2017 lediglich 1.018 t an großen Kunststoffteilen manuell demontiert (Wiederverwendung: 108 t, Recycling: 908 t, Beseitigung: 2 t). Setzt man die Menge der demontierten großen Kunststoffteile mit dem Gesamtgewicht der aus dem Inland zur Behandlung angenommenen Altfahrzeuge in Relation (rund 530.000 t), zeigt sich, dass pro Fahrzeug durchschnittlich nur 2 kg Kunststoffe demontiert wurden.

Der Großteil der in Fahrzeugen verarbeiteten Kunststoffe wird folglich Schredderanlagen mit Restkarossenbehandlung zugeführt. Der Input in 49 Restkarossen-Schredder in Deutschland betrug 2017 insgesamt rund 3,7 Millionen Tonnen. Der Anteil der Restkarossen am Input lag bei 13 %. Weitere wichtige Inputmaterialien waren Eisen und Stahl (54 %), Eisenmetalle (17 %), (gemischte) Metalle (4%) und gebrauchte elektrische und elektronische Geräte (5 %) (BMU und UBA, 2019).

Beim Schreddern entstehen sowohl metallische Fraktionen (Schredderschrott und Schredderschwerfraktion) als auch die Schredderleichtfraktion als nichtmetallischer Abfallstrom („kunststoffhaltige Mischfraktion“). Nach der Zerkleinerung in der Schredderanlage finden sich Kunststoffteile zu einem geringen Teil in der Schredderschwerfraktion (SSF) und überwiegend in der Schredderleichtfraktion (SLF) wieder. Genaue Aussagen sind grundsätzlich schwer zu treffen, da die stoffliche Zusammensetzung der Fraktionen stark von der Art des Ausgangsmaterials sowie von der Art der Windsichtung abhängig ist (UBA, 2016a). In UBA (2020) wurden Literaturquellen und Schredderoutputfraktionen (Gew.-%) zweier Schredderunternehmen verglichen, welche im Versuch ausschließlich Altfahrzeuge geschreddert haben. Der Anteil an Kunststoffen und Elastomeren in der SSF wurde mit Werten zwischen 3,62 % und 21,88 % angegeben. Für die SLF wurden Werte von rund 73 % für den Kunststoffanteil abgeleitet. UBA (2016a) fasst, basierend auf verschiedenen Quellen, zusammen, dass der Kunststoffanteil in der SLF zwischen 28-50 % liegt. Es wird angenommen, dass der große Unterschied zwischen den Werten auf unterschiedliche Ausgangsmaterialien zurückzuführen ist.

Die NE-Metallfraktion, auch **SSF** genannt, besteht u.a. aus Aluminium, Kupfer und Zink, legierten Stählen, Kabeln und isolierten Drähten. Der Rest sind nichtmetallische Reststoffe (z.B. Gummi, **Kunststoffe**, Glas oder Steine) (UBA, 2016a). Nach BMU und UBA (2019) fielen im Jahr 2017

43.110 Tonnen NE-Metallfraktion an, welche ausschließlich Recyclingprozessen zugeführt wurden. Nähere Informationen zu Verbleib der Kunststoffe und entsprechenden Recyclingprozessen liegen nicht vor.

Die **SLF** fällt als Mischfraktion an und kann nach UBA (2016a) folgende Bestandteile enthalten: Textilien (z.B. aus Sitzbezügen), Schaumstoffe (z.B. aus Sitzpolstern, Isolierungen), Kunststoffe und Kunststofffolien (z.B. aus Verkleidungen), mineralische Bestandteile (z.B. Anhaftungen, Glasbruch), Metallfolien (z.B. aus Isolierschichten), aber auch NE-Metallstücke wie Kabel, Aluminiumbleche und -folien sowie Lackreste / Rost, Holz und Elastomere. Nach BMU und UBA (2019) fielen im Jahr 2017 insgesamt rund 390.000 t SLF an. Der Anteil aus Restkarossen lag bei 25,4 % oder rund 98.800 t. Die SLF wurde wie folgt entsorgt: 54 % stoffliche Verwertung (überwiegend als mineralreiche Fraktion im Bergversatz und Deponiebau), 38 % energetische Verwertung (in Müllverbrennungsanlagen oder als Ersatzbrennstoff), 8 % Beseitigung.

Neben dem offiziellen „Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2017“ (vgl. BMU und UBA, 2019) enthält auch Conversio (2018a) Statistiken zur Entsorgung von Kunststoffabfällen aus dem Automobilbereich. Auf Basis der Conversio-Daten lässt sich festhalten, dass die rohstoffliche Verwertung von Post-Consumer-Kunststoffabfällen aus dem Automobilbereich mit einem Anteil von < 1 % derzeit keine Rolle spielt.

Nach UBA (2020) werden Kunststoffe aus dem Schredderprozess überwiegend einer energetischen Verwertung zugeführt. Mit Hilfe geeigneter Post-Schredder Technik könnten die Polymere teilweise getrennt werden, jedoch wird dies in Deutschland nur in geringem Umfang praktiziert. Derzeit wird hierbei auch keine Qualität erreicht, die eine Verwendung erlaubt, die der ursprünglichen vergleichbar ist. Siehe hierzu auch Ausführungen in Kapitel 6.

PP

Es lässt sich zusammenfassen, dass Fahrzeugkomponenten aus PP (u.a. Stoßfänger, Scheinwerfer- und Heckleuchtegehäuse, Radhausschalen, Armaturenbretter, Innen-Verkleidungen, Kabelisolierungen) in geringem Umfang demontiert (Stoßfänger), jedoch überwiegend mit der Restkarosse geschreddert werden. Als Abfallströme kommen dann sowohl die Schredderleichtfraktion als auch die Schredderschwerfraktion in Betracht. Nach Sander et al. (2017) sind die Hauptverbleibswegen für Fahrzeugkomponenten aus ABS, PA, PE, PET, PP sowie PUR jedoch die Schredderleichtfraktion.

PE-HD/MD

Nach Sander et al. (2017) ist der Hauptverbleibsweg für PE-Kraftstoffbehälter die Schredderleichtfraktion. Inwieweit in Deutschland eine manuelle Demontage stattfindet (wie etwa von Martens (2011) beschrieben), ist nicht klar. ADEME (2017) gibt für Frankreich beispielsweise eine Demontagerate für PE-HD Tanks von 22 % an. Da in Deutschland im Jahr 2017 nach BMU und UBA (2019) nur 1.018 t große Kunststoffteile entfernt wurden, ist jedoch anzunehmen, dass sich die Demontagerate von Tanks in Deutschland auf einem deutlich geringeren Niveau bewegt. Bei einem durchschnittlichen Tankgewicht von 8,41 kg je Altfahrzeug (ADEME, 2017) und einer Gesamtzahl an Altfahrzeugen von 506.531, wären in Deutschland im Jahr 2017 etwa 4.260 t PE-HD Tanks angefallen (hierbei wird angenommen, dass der Anteil von Elektrofahrzeugen ohne Kraftstofftank an allen Altfahrzeugen vernachlässigbar ist).

ABS

Nach Schlummer & Knappich (2016) werden ABS Kunststoffe bei der Verwendung als Kühlergrill meist galvanisiert. Galvanisierte Kunststoffe eignen sich nur bedingt für einen Recyclingprozess, da die zur Abtrennung der Galvanikschicht benötigten Säuren zu Schäden an der Polymerstruktur führen sodass es anschließend nur für minderwertige Anwendungen

eingesetzt werden kann. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der stofflichen Verwertung von galvanisiertem ABS kann davon ausgegangen werden, dass die Kunststofffraktion überwiegend einer energetischen Verwertung zugeführt wird.

Es lässt sich zusammenfassen, dass Fahrzeugkomponenten aus ABS (u.a. Stoßfänger, Kühlergrill, Bauteile von Lüftungsanlagen, Innen- und Außenraumverkleidungen, Armaturenbretter) in geringem Umfang demontiert (Stoßfänger, Kühlergrill,), jedoch überwiegend mit der Restkarosse geschreddert werden. Als Abfallströme kommen dann sowohl die Schredderleichtfraktion als auch die Schredderschwerfraktion in Betracht. Nach Sander et al. (2017) sind die Hauptverbleibswege für Fahrzeugkomponenten aus ABS, PA, PE, PET, PP sowie PUR jedoch die Schredderleichtfraktion.

Nachstehende Tabelle 24 fasst die Entsorgungswege der als relevant identifizierten Erzeugnisse im Automobilbereich, einschließlich ausgewählter Schadstoffe, zusammen.

Tabelle 24: Zusammenfassung zu Schadstoffen und Entsorgungswegen der als relevant identifizierten Erzeugnisse im Automobilbereich

Kunststoffart	Erzeugnis	Schadstoffe	Behandlung und Entsorgung	Bei Recycling: Beispiele für weitere Nutzung der Rezyklate
PP	Stoßfänger (bei Demontage)	Wenn flammgeschützt: POP-Stoffe (SCCP, POP-BDE, HBCDD), Dechloran Plus), TBBPA	Demontage großer Kunststoffteile: Wiederverwendung: 10,6 % (108 t) Recycling: 89,2 % (908 t) Deponierung: 0,2 % (2 t) mengenmäßig insgesamt wenig relevant	Keine Information
ABS	Stoßfänger, Kühlergrill (bei Demontage)		Siehe Eintrag „PP bei Demontage“	
PP	Stoßfänger, Scheinwerfer- und Heckleuchtegehäuse, Radhausschalen, Armaturenbretter Innen-Verkleidungen, Kabelisolierungen (bei Input in Schredderanlage)	Wenn flammgeschützt: POP-Stoffe (SCCP, POP-BDE, HBCDD), Dechloran Plus), TBBPA	Schredderschwerfraktion: Kunststoffanteil an SSF: 3,6-21,8 % (1.550-9.400 t) Recycling: 100 % (43.000 t) Schredderleichtfraktion: Kunststoffanteil an SLF: 28-50% (27.660-49.400 t) Stoffliche Verwertung (überwiegend als mineralreiche Fraktion im Bergversatz und Deponiebau, in geringen Teilen werkstoffliche Verwertung): 54 % (15.000-26.660 t) Energetische Verwertung (MVA / EBS): 38 % (10.500-18.770 t) Deponierung: 8 % (2.200-3.950 t)	Keine Information
PE-HD/MD	Kraftstofftank (bei Input in Schredderanlage)		Siehe Eintrag „PP bei Input in Schredderanlage“	
ABS	Stoßfänger, Kühlergrill, Bauteile von Lüftungsanlagen, Innen- und Außenraumverkleidungen,		Siehe Eintrag „PP bei Input in Schredderanlage“	

Kunststoffart	Erzeugnis	Schadstoffe	Behandlung und Entsorgung	Bei Recycling: Beispiele für weitere Nutzung der Rezyklate
	Armaturenbretter (bei Input in Schredderanlage)			

Quelle: (Ramboll) (siehe Text)

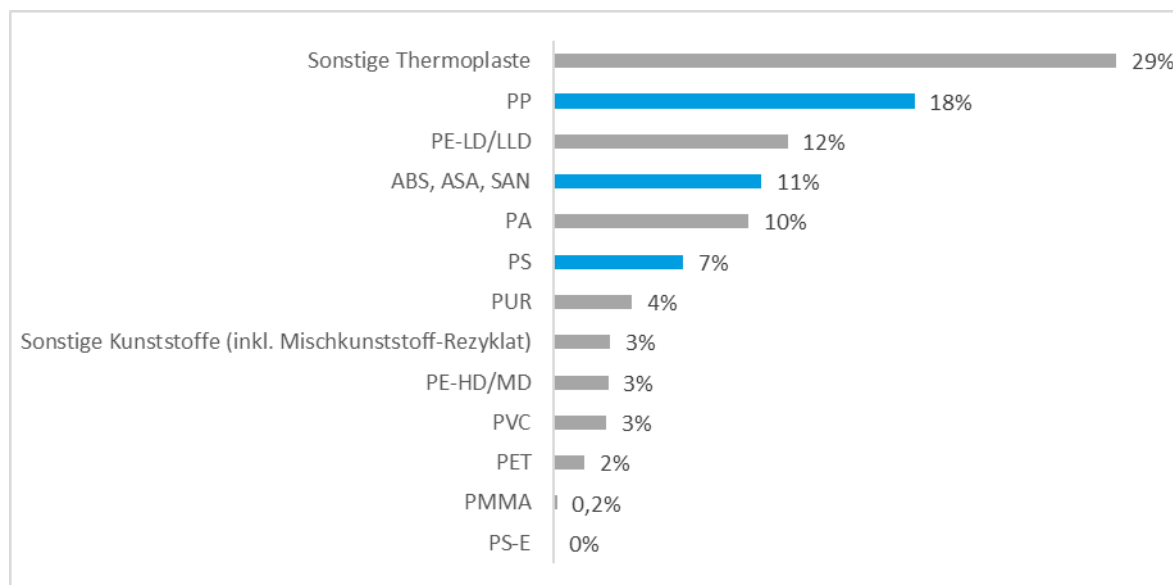
5.4 Elektro-/Elektronikbereich

5.4.1 Kunststoffeinsatz im Überblick

Nach Conversio (2018a) wurden in Deutschland im Jahr 2017 insgesamt 0,9 Mio. t Kunststoffe im Elektro- und Elektronikbereich verarbeitet. Dies entspricht einem Anteil von 6,3 % an der in allen Branchen in Deutschland insgesamt verarbeiteten Kunststoffmenge. Die Verarbeitung von Kunststoffzyklaten im Elektro-/Elektronikbereich ist mit einem Anteil von 3,2 % an der gesamten Verarbeitungsmenge bisher gering (66 % aus Produktions- und Verarbeitungsresten, 34 % aus Post-Consumer-Abfällen) (Conversio, 2018a).

Abbildung 14 zeigt, dass in der Elektro-/Elektronikbranche eine Vielzahl unterschiedlicher Kunststoffarten zum Einsatz kommt (Hervorhebung in blauer Farbe: im Projektfokus stehende Kunststoffarten). Die im Jahr 2017 verarbeitete Kunststoffmenge von rund 0,9 Mio. t verteilte sich auf die folgenden 12 Kunststoffarten (einschl. als Gemisch / Sonstige ausgewiesene Kunststoffe).

Abbildung 14: Überblick über Verteilung der im Elektro-/Elektronikbereich in Deutschland im Jahr 2017 verarbeiteten Kunststoffarten (in %)



Quelle: (Ramboll verändert nach Conversio (2018a))

Die verarbeiteten Kunststoffe wurden dabei in folgenden typischen Anwendungen eingesetzt:

- ▶ Kabel/Installationstechnik: 34 %
- ▶ Weiße Ware: 24 %
- ▶ IT / Telekommunikation: 10 %
- ▶ Braune Ware: 6,5 %
- ▶ Sonstiges: 25,5 %

5.4.2 Relevante Erzeugnisse und darin enthaltene Schadstoffe

5.4.2.1 PP

Polypropylen ist nach Conversio (2018a) das Polymer mit der höchsten Verarbeitungsmenge im Elektro- und Elektronikbereich. Im Jahr 2017 wurden 165.000 t PP verbaut, was einem Anteil am Gesamtkunststoffverbrauch der Branche von 18,3 % entspricht. Der Anteil von PP kann je nach Gerätekategorie stark variieren. Nach Baxter (2014) haben verschiedene EAG-Kategorien durchschnittlich folgende PP-Anteile, bemessen am Gesamtkunststoffanteil der jeweiligen Geräte:

- ▶ Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte: 48%
- ▶ Haushaltsgroßgeräte: 35%
- ▶ Haushaltskleingeräte: 35%
- ▶ Beleuchtungskörper: 15%
- ▶ Elektrische und elektronische Werkzeuge: 15%
- ▶ Medizinprodukte: 15%
- ▶ Überwachungs- und Kontrollinstrumente: 15%
- ▶ Automatische Ausgabegeräte: 15%
- ▶ Geräte der Unterhaltungselektronik und Photovoltaikmodule: 3%
- ▶ Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik: 0%

Im Bericht von CECED (2018) werden beispielhaft relevante Erzeugnisse in ihrer Materialzusammensetzung dargestellt. Demnach ergeben sich folgende PP-Anteile am Gesamtgewicht verschiedener EAG:

- ▶ Haushaltsgroßgeräte:
 - ▶ Wäschetrockner: 14,1 %
 - ▶ Geschirrspülmaschinen: 10,2 %
 - ▶ Waschmaschinen: 6,6 %
- ▶ Haushaltskleingeräte:
 - ▶ Lebensmittelverarbeitung: 6 %
 - ▶ Wasserkocher: 7,4 %
 - ▶ Staubsauger: 5,1 %

Insgesamt lässt sich feststellen, dass Literaturangaben zu in EAG eingesetzten Kunststoffarten je Gerätekategorie sowie entsprechenden Erzeugnissen schwanken (Hinweis: für die Zwecke dieses Vorhabens nicht von Bedeutung).

Als Schadstoffe sind insbesondere Flammschutzmittel relevant (POP-Stoffe: SCCP, POP-BDE, HBCDD; Dechloran Plus; TBBPA).

5.4.2.2 PS

Nach Conversio (2018a) wurden im Elektro- und Elektronikbereich im Jahr 2017 rund 59.000 t PS verbaut, was einem Anteil am Gesamtkunststoffverbrauch der Branche von 6,6 % entspricht. Der Anteil von PS kann je nach Gerätekategorie stark variieren. Nach Baxter (2014) haben verschiedene EAG-Kategorien durchschnittlich folgende PS-Anteile, bemessen am Gesamtkunststoffanteil der jeweiligen Geräte:

- ▶ Beleuchtungskörper: 50%
- ▶ Elektrische und elektronische Werkzeuge: 50%
- ▶ Medizinprodukte: 50%
- ▶ Überwachungs- und Kontrollinstrumente: 50%
- ▶ Automatische Ausgabegeräte: 50%
- ▶ Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik: 40%
- ▶ Geräte der Unterhaltungselektronik und Photovoltaikmodule: 35%
- ▶ Haushaltskleingeräte: 10%
- ▶ Haushaltsgroßgeräte: 0%
- ▶ Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte: 0%

Nach LAGA (2018) sind relevante Erzeugnisse im Elektro- und Elektronikbereich aus Polystyrol Monitore und TV-Geräte sowie Gehäuse von IT-Anwendungen und TV- Geräten.

Ein Bericht von CECED (2018), der sich auf Haushaltsgeräte konzentriert, gibt hohe PS-Anteile für Kühlschränke (13,4 % PS Anteil) und Gefrierschränke (12,7 % PS Anteil) an. Das Innere von Kühlgeräten besteht hauptsächlich aus PS. Da das Innere von Kühlgeräten mit Lebensmitteln in Kontakt kommt und damit frei von bromierten Flammschutzmitteln ist (DIN EN 50625), ist PS-Kunststoff aus Kühlgeräten besonders hochwertig und kann gut recycelt werden.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass Literaturangaben zu in EAG eingesetzten Kunststoffarten je Gerätekategorie sowie entsprechenden Erzeugnissen schwanken (Hinweis: für die Zwecke dieses Vorhabens nicht von Bedeutung).

Als Schadstoffe sind insbesondere Flammschutzmittel relevant (POP-Stoffe: SCCP, POP-BDE, HBCDD; Dechloran Plus; TBBPA).

5.4.2.3 ABS

Nach Conversio (2018a) wurden im Elektro- und Elektronikbereich im Jahr 2017 rund 95.000 t ABS, ASA, SAN verbaut, was einem Anteil am Gesamtkunststoffverbrauch der Branche von 10,5 % entspricht. Der Anteil von ABS kann je nach Gerätekategorie stark variieren. Nach Baxter (2014) haben verschiedene EAG-Kategorien durchschnittlich folgende ABS-Anteile, bemessen am Gesamtkunststoffanteil der jeweiligen Geräte:

- ▶ Geräte der Unterhaltungselektronik und Photovoltaikmodule: 42%

- ▶ Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte: 42%
- ▶ Haushaltsgroßgeräte: 40%
- ▶ Haushaltskleingeräte: 35%
- ▶ Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik: 15%
- ▶ Beleuchtungskörper: 15%
- ▶ Elektrische und elektronische Werkzeuge: 15%
- ▶ Medizinprodukte: 15%
- ▶ Überwachungs- und Kontrollinstrumente: 15%
- ▶ Automatische Ausgabegeräte: 15%

ABS sind nach CECED (2018) mit einem Gewichtsanteil zu 0,46 % in Küchenmaschinen enthalten sowie zu 2,9 % in Wasserkochern, zu 1,5 % in Mikrowellen, zu 3,2 % in Geräten der persönlichen Pflege (Föhn u.ä.), zu 10,8 % in Staubsaugern und zu 5,8 % in sonstigen kleinen Haushaltsgeräten (Toaster u.ä.).

JRC (2014) gibt an, dass ABS am häufigsten in Handyhüllen, Mikrowellen, Flatscreens und Monitoren sowie in Gehäusen und eingebauten Teilen der Informations- und Kommunikationstechnologie zu finden ist.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass Literaturangaben zu in EAG eingesetzten Kunststoffarten je Gerätekategorie sowie entsprechenden Erzeugnissen schwanken (Hinweis: für die Zwecke dieses Vorhabens nicht von Bedeutung).

Als Schadstoffe sind insbesondere Flammschutzmittel relevant (POP-Stoffe: SCCP, POP-BDE, HBCDD; Dechloran Plus; TBBPA; ansonsten UV-328).

5.4.3 Abfallströme und Entsorgungswege

Die getrennte Erfassung von EAG aus privaten Haushalten erfolgt in der Praxis üblicherweise über kommunale Sammelstellen der öRE oder über Rücknahmesysteme von Herstellern und Vertriebern. EAGs welche nicht getrennt erfasst, sondern über den Restmüll entsorgt werden, gelangen in der Regel direkt in die Müllverbrennungsanlage und werden energetisch verwertet.

Nach LAGA (2018) erfolgt die Behandlung separat erfasster Altgeräte i.d.R. durch eine manuelle Demontage oder durch eine teil- oder vollautomatisierte Behandlung:

- ▶ **Manuelle Demontage:** bei der manuellen Demontage werden die Altgeräte an dafür eingerichteten Arbeitsplätzen mit geeigneten Werkzeugen händisch bzw. teilautomatisiert unter Beachtung der Arbeitsschutzbestimmungen demontiert. Die Altgeräte werden geöffnet, Stoffe, Gemische und Bauteile werden entnommen und separiert. Die weitere Behandlung von teilentfrachteten Altgeräten, wie zum Beispiel von trockengelegten Kühlgeräten, darf ausschließlich in dafür geeigneten Anlagen erfolgen.
- ▶ **Maschinelle Verfahren:** die automatisierte Behandlung von Altgeräten kann mit verschiedenen Verfahrenstechniken, wie Rotorschere, Schredder, Querstromzerspaner, Prallmühle, Hammermühle, Smasher, Schneidmühle, erfolgen. Aus den so behandelten

Altgeräten werden Materialien, Schadstoffe und Bauteile in Abhängigkeit der nachgeschalteten Verwertungsverfahren und -wege separiert.

Ziele der Behandlung sind die Schadstoffentfrachtung, die Erzeugung von vermarktungsfähigen Stoffströmen sowie die ordnungsgemäße Beseitigung nicht verwertbarer Stoffe. Diese Ziele sind durch eine Kombination aus manuellen und maschinellen Verfahrenstechniken zu erreichen. Bei der Behandlung bzw. beim Aufschluss ist sicherzustellen, dass schadstoffhaltige Bauteile oder Stoffe nicht zerstört werden und Schadstoffe nicht in die zu verwertenden Materialströme eingetragen werden.

Vor der Zuführung zu einer zertifizierten Erstbehandlungsanlage ist zunächst zu prüfen, ob das Altgerät oder einzelne Bauteile einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden können. Im Rahmen der Erstbehandlung sind die Anforderungen an die selektive Behandlung nach Anlage 4 des ElektroG umzusetzen. Dabei sind verschiedene Stoffe, Gemische und Bauteile aus getrennt erfassten Altgeräten zu entfernen, unter anderem Kunststoffe, die bromierte Flammschutzmittel enthalten.

Das Schreddern (maschinelle Verfahren) erfolgt in großen Metallschreddern oder in speziellen Schreddern zur Behandlung einzelner Elektroschrottkategorien. Beispielsweise betrug der Input in 49 Restkarossen-Schredder in Deutschland nach BMU und UBA (2019) im Jahr 2017 insgesamt rund 3,7 Millionen Tonnen. Der Anteil gebrauchter elektrischer und elektronischer Geräte lag bei 5 %, was einer Menge von etwa 185.000 t entspricht.

Nach Destatis (2019) wurden im Jahr 2017 in Deutschland insgesamt rund 0,8 Mio. t Elektro- und Elektronikaltgeräte zur Erstbehandlung angenommen und wie folgt behandelt (siehe Abbildung 15):

- ▶ Vorbereitung zur Wiederverwendung: 3 %
- ▶ Recycling: 83 %
- ▶ Sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung: 11 %
- ▶ Beseitigung: 3 %

Abbildung 15: Zur Erstbehandlung angenommene Elektro- und Elektronikaltgeräte in Deutschland im Jahr 2017

Produktkategorie nach § 2 Abs. 1 ElektroG	Anlagen Insgesamt	Menge Insgesamt ¹	Darunter gewerbliche Altgeräte ²	Letztendliche Behandlung der angenommenen Geräte			
				Vorbereitung zur Wieder- verwendung ³	Recycling	Sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung	Beseitigung
				Anzahl	1000 t		
2017							
Insgesamt	331	836,9	82,2	23,9	693,9	93,6	25,5
01 Haushaltsgroßgeräte	246	360,3	39,4	2,1	308,6	38,6	11,0
02 Haushaltskleingeräte	190	144,8	8,0	5,8	113,3	21,3	4,4
03 Geräte der IT- und Telekommunikationstechnik	234	126,0	21,4	8,3	100,9	13,2	3,5
ex 04 Geräte der Unterhaltungselektronik							
ohne Photovoltaikmodule	164	135,1	3,6	5,8	113,0	12,1	4,3
ex 04 Photovoltaikmodule	18	3,6	2,6	0,3	3,1	0,2	0,0
ex 05 Beleuchtungskörper ohne Gasentladungslampen ...	106	10,8	1,0	0,4	8,9	1,2	0,4
ex 05 Gasentladungslampen	49	8,2	0,1	0,0	7,1	0,5	0,6
06 Elektrische und elektronische Werkzeuge	144	32,8	2,1	0,9	26,5	4,4	1,0
07 Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte	118	6,8	2,4	0,3	5,3	1,1	0,1
08 Medizinische Geräte	127	4,2	0,9	0,0	3,6	0,6	0,1
09 Überwachungs- und Kontrollinstrumente	114	3,1	0,6	.	2,6	.	0,1
10 Ausgabeautomaten	41	1,2	0,1	.	1,1	.	0,0

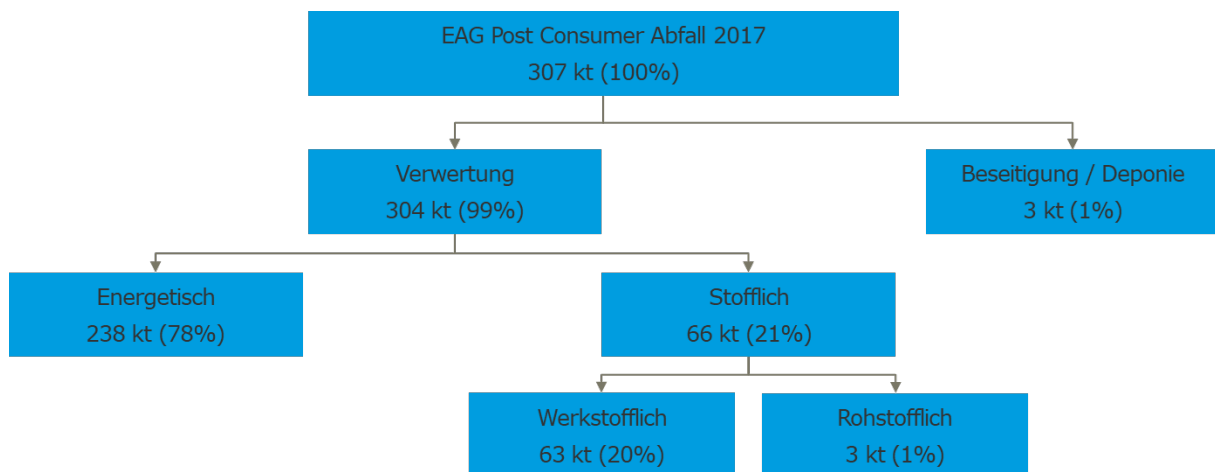
1 Angenommene unbehandelte Altgeräte insgesamt, inklusive ganzer Altgeräte sowie Bauteile, die zur Wiederverwendung vorbereitet werden.
 2 Geräte, die ausschließlich in anderen als privaten Haushalten genutzt werden oder die gewöhnlich nicht in privaten Haushalten genutzt werden.
 3 Vorbereitung zur Wiederverwendung ganzer Altgeräte sowie Vorbereitung zur Wiederverwendung von Bauteilen.

Quelle: (Destatis, 2019)

Destatis (2019) gibt eine Übersicht über insgesamt zur Erstbehandlung angenommene Geräte sowie Anteile einzelner Produktkategorien, trifft jedoch keine Aussagen über den Verbleib von in EAG enthaltenen Kunststoffteilen. Nach UBA (2016a) kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich der energetisch verwertete Teil der behandelten EAGs überwiegend aus der Kunststofffraktion zusammensetzt. Auch LAGA (2018) bestätigt, dass eine nennenswerte werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG nach wie vor nicht in nennenswerter Größenordnung stattfindet.

Zum Verbleib von Kunststoffen aus EAG können Daten von Conversio (2019a) herangezogen werden (Hinweis: die Erhebung schließt auch über den Restmüll entsorgte EAG mit ein). Betrachtet man nur Post-Consumer-Kunststoffabfälle aus dem Elektro- /Elektronikbereich (rund 0,32 Mio. t in 2017), ergeben sich folgende Entsorgungswege (Abbildung 16):

Abbildung 16: Überblick über Entsorgungswege von Post-Consumer Kunststoffabfällen aus dem Elektro-/Elektronikbereich in Deutschland im Jahr 2017



Quelle: (Ramboll verändert nach Conversio (2018a))

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass Entsorgungswege und resultierende Abfallströme stark von der Art der (Erst-)Behandlung sowie Gerätekategorie abhängen. Beschreibungen zu spezifischen Entsorgungswegen relevanter Erzeugnisse der ausgewählten Kunststoffpolymere PP, PS sowie ABS konnten nicht identifiziert werden. Es wird angenommen, dass diese wie EAG Post-Consumer Abfall insgesamt entsorgt werden (siehe Abbildung oben).

Für die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen aus EAG ist der Einsatz von Post-Schredder-Technik zunehmend von Bedeutung. Siehe hierzu auch Ausführungen in Kapitel 6.

Nachstehende Tabelle 25 fasst die Entsorgungswege der als relevant identifizierten Erzeugnisse im Elektro- und Elektronikbereich, einschließlich ausgewählter Schadstoffe, zusammen.

Tabelle 25: Zusammenfassung zu Schadstoffen und Entsorgungswegen der als relevant identifizierten Erzeugnisse im Elektrobereich

Kunststoffart	Erzeugnis	Schadstoffe	Sammlung	Behandlung und Entsorgung	Bei Recycling: Beispiele für weitere Nutzung der Rezyklate
PP, PS, ABS	Erzeugnisse in verschiedenen EAG-Kategorien mit unterschiedlichen Anteilen	Wenn flammgeschützt: POP-Stoffe (SCCP, POP-BDE, HBCDD), Dechloran Plus, TBBPA (Bei ABS. Ansonsten: UV-328)	Getrenntfassung über kommunale Sammelstellen der öRE oder über Rücknahmesysteme von Herstellern und Vertreibern; kleine Geräte zT auch über Restmüll	Energetische Verwertung: 78 % Werkstoffliche Verwertung: 20 % Rohstoffliche Verwertung: 1 % Deponierung: 1 %	Keine spezifische Information zu ausgewählten Polymeren

Quelle: (Ramboll)

5.5 Abschätzungen der Risiken für Mensch und Umwelt

In diesem Kapitel werden Abschätzungen der Risiken für Mensch und Umwelt durch als prioritär identifizierte Schadstoffe getroffen. Es wird dabei kurz auf die einzelnen Gefährdungspotentiale eingegangen (basierend auf CLP- und ECHA-Daten) und mögliche Emissionen aufgezeigt, die ein mögliches Risiko für Mensch und Umwelt darstellen können. Dabei wird ein Fokus auf die Nutzungsphase und verschiedene Entsorgungswege gelegt. Es werden die folgenden Fragen beantwortet:

- ▶ Führen die typischen Verwertungs- und Beseitigungsverfahren der als relevant identifizierten Abfallströme zu einer Zerstörung der Schadstoffe?
- ▶ Verursachen Verwertungs- oder Beseitigungsverfahren, bei denen die Schadstoffe nicht zerstört werden, möglicherweise eine Umwelt- oder Gesundheitsgefährdung?
- ▶ Verursacht die weitere Nutzung in aus Rezyklaten hergestellten Produkten möglicherweise eine Umwelt- oder Gesundheitsgefährdung?

5.5.1 DEHP und andere niedermolekulare Phthalate in PVC

Zufolge CLP-Klassifizierung kann DEHP die Fruchtbarkeit und das ungeborene Kind schädigen. Außerdem gilt er als endokriner Disruptor. Der Stoff kann demnach oral, dermal oder pulmonal aus der Umwelt aufgenommen werden, in unser Körpersystem gelangen und schädliche Effekte auf unser hormonelles System ausüben. Aufgrund dessen ist DEHP als SVHC identifiziert, das heißt auch seine Verwendung eine Genehmigung (nach REACH Annex XIV) verlangt. Momentan befindet sich nur ein Unternehmen im Zulassungsprozess, das eine Genehmigung für das Recycling von DEHP-enthaltenden PVC beantragt.

Es ist bekannt, dass während der gesamten Produktnutzungsphase es zu DEHP-Emissionen aus den Artikeln in die Luft oder andere Medien kommt, da Phthalat-Weichmacher nicht chemisch in die Polymermatrix von z.B. Vinylfußböden, Dachbahnen usw. gebunden sind (ECHA, 2017). Es wird daher ausgegangen, dass von DEHP-enthaltenden Erzeugnissen eine Gefahr für Mensch und Umwelt ausgeht. Hauptquellen für die Exposition gegenüber DEHP sind Erzeugnissen mit direktem Kontakt zu Haut oder Schleimhäuten. Daher ist der Gehalt an DEHP, DBP, BBP und DIBP in Erzeugnissen, die für die Innenraumumgebung bestimmt sind, und in Erzeugnissen, die einen direkten Kontakt mit der Haut oder den Schleimhäuten haben, nach REACH eingeschränkt, um die Exposition des Menschen gegenüber diesen Phthalaten auf ein akzeptables Niveau zu reduzieren (Eintrag 51, Annex XVII).

Der Hauptteil (72 %) an DEHP-enthaltenden PVC wird verbrannt. Leider sind dazugehörige Daten zu den Emissionen von DEHP bei Verbrennung kaum vorhanden. Es ist davon auszugehen, dass DEHP dabei stofflich zerstört wird. Ältere Studien aus dem Jahr 2008, besagen jedoch, dass die Verbrennung von DEHP-haltigen Produkten zu DEHP in der Abluft, in der Schlacke und in der Flugasche führt (ECHA, 2008). Der restliche Anteil wird teilweise werkstofflich wiederverwendet. Da hierbei auch Zermahlungsschritte eingesetzt werden, kann eine Emission beim Recyclen nicht ausgeschlossen werden. Auch hierzu gibt es keine Werte. Es ist davon auszugehen, dass DEHP in aus Rezyklate hergestellten Produkten dieselben Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen aufweist wie in neuen Produkten. Ebenso finden dieselben Vorschriften Anwendung (z.B. die Autorisierung und Beschränkung unter REACH).

5.5.2 Cd/Pb in PVC-Fenstern

Gemäß CLP-Klassifizierung ist Cadmium tödlich, wenn seine Stäube eingeatmet werden, sehr toxisch für Wasserlebewesen mit langanhaltenden Auswirkungen, kann Krebs verursachen und Organe durch längere oder wiederholte Exposition schädigen, wird verdächtigt, genetische Defekte zu verursachen, steht im Verdacht, die Fruchtbarkeit oder das ungeborene Kind zu schädigen und fängt spontan Feuer, wenn er der Luft ausgesetzt wird. Aufgrund der genannten Eigenschaften ist Cadmium inklusive seiner Salzverbindungen als SVHC identifiziert. Einige Verwendungen dieses Stoffes (oberhalb einer Konzentration von 0,01 % w/w) sind gemäß Annex XVII von REACH eingeschränkt, wobei hier eine recyclingspezifische Ausnahme gilt, die eine höhere max. Konzentration vorsieht.

Zufolge der CLP kann dieser Stoff die Fruchtbarkeit oder das ungeborene Kind und Organe, durch längere oder wiederholte Exposition, schädigen, zusätzlich ist Pb sehr giftig für Wasserorganismen mit langanhaltenden Auswirkungen. Blei ist krebserbringend und kann gestillten Kindern Schaden zufügen. Auch Blei ist damit ein SVHC-Stoff. Die Freisetzung dieses Stoffes in die Umwelt kann bei der industriellen Verwendung erfolgen, darunter die Herstellung des Stoffes, die Herstellung von Mischungen und die Verwendung in Materialien. Eine andere Möglichkeit der Freisetzung dieses Stoffes in die Umwelt kann durch Verwendung im Freien in langlebigen Materialien mit geringer Freisetzungsrates erfolgen. Beispielsweise in Metall-, Holz- und Kunststoffkonstruktionen und Baumaterialien. Auch für Blei war eine analoge Beschränkung nach Annex XVII von REACH geplant, die aber von dem Europäischen Parlament abgelehnt wurde.

PVC-Fenster werden zu ca. 70 % getrennt erfasst wobei nachfolgend eine werkstoffliche Verwertung stattfindet. Es konnten keine Daten gefunden werden, dass es dabei zu Cd-Emissionen kommt. PVC-Fensterrahmen, die mit rezyklierten PVC hergestellt werden, bestehen meist aus einer Art PVC-„Sandwich“, dabei wird für die Profilkern PVC-Rezyklat verwendet und die äußere Deckschicht besteht aus Neu-PVC. Dabei wird zu 70 % rezykliertes PVC eingesetzt (Prognos, 2008). Diese Maßnahme soll eine mögliche Exposition der Umwelt und des Menschen verhindern. Trotzdem verbleiben die Schadstoffe im Kreislauf. Dabei ist zu beachten, dass das Recycling von PVC-Fenstern die Cadmiumkonzentration in naher Zukunft nicht wesentlich ändert und erst ab ca. 2030 mit einem Effekt zu rechnen ist (Goovaerts, 2009). Diese Fensterprofile unterscheiden sich nicht nur teilweise in der Farbe haben aber die gleiche Qualität, d.h. solche PVC-Profile erfüllen problemlos die hohen Qualitätsanforderungen an Kunststofffenster (Wärme- und Schalldämmung).

Auch bei energetischer Verwertung werden Blei und Cadmium nicht zerstört und verbleiben in den Aschen, Schlacken und Stäuben. In Deutschland werden diese Verbrennungsreste in Salzbergwerken eingelagert. Die Verbrennungsschlacken mit den aufkonzentrierten Schadstoffen werden teilweise deponiert, jedoch häufiger als Füllmaterial in Salzstöcken und im Straßenbau verwendet. Dies geschieht aber erst nach Testung auf verschiedene Gefahrenpotentiale, wie z.B. Ökotoxizität.

5.5.3 BPA in PVC

BPA ist gemäß CLP Klassifizierung reproduktionstoxisch und kann somit die Fruchtbarkeit beeinträchtigen. Ferner kann es allergische Hautreaktionen hervorrufen, die Atemwege reizen und schwere Augenschäden verursachen. Aufgrund dieser Eigenschaften ist BPA ein SVHC Stoff und steht auf der Liste der für eine Zulassung in Frage kommenden besonders besorgniserregenden Stoffe. Annex XVII der REACH-Verordnung verbietet seit dem 2 Januar 2020 die Benutzung in Thermopapier in einer Konzentration größer oder gleich 0,02 %

Gewichtsprozent, für PVC gibt es hingegen keine Beschränkung. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es umfangreiche Recherchen über die Toxizität von Bisphenol A, auch in Bezug auf niedrige Dosen. Studien legen den Verdacht nahe, dass BPA mit einem erhöhten Risiko für zahlreiche Gesundheitsaspekte wie e.g. die Entwicklung des Fötus, Brust- und Prostatakrebs oder zumindest eine signifikante Veränderung des Brustgewebes einhergeht. Es gibt zudem stichhaltige Beweise dafür, dass eine große Mehrheit der menschlichen Bevölkerung BPA ausgesetzt ist, zahlreiche Humanbiomonitoring Daten sind verfügbar (HBM4EU, 2018).

EC (2008) kam jedoch zu dem Schluss, dass die Verwendung von Erzeugnissen aus PVC zu einem vernachlässigbaren Expositionspotenzial für die Verbraucher führt. Es wird angenommen, dass die Verwendung von BPA in der PVC-Herstellung schrittweise eingestellt wird (EC, 2008).

In den aktuellsten Dokumenten zur Stoffevaluierung, die maßgeblich von Deutschland ausgearbeitet wurden, wird zusammenfassend darauf hingewiesen, dass die Verwendung von Artikeln aus PVC und größeren Artikeln aus Polycarbonat für den Verbraucher nicht sicher erscheinen. Zahlreiche Informationen sind nicht in ausreichendem Maß verfügbar. Angesichts der Risiken, die im Hinblick auf die additive Verwendung von BPA in Erzeugnissen aus PVC durch die Verbraucher festgestellt wurden, unterstützte Deutschland als evaluierendes Mitgliedsland, die durch Frankreich vorgeschlagene und mittlerweile umgesetzte Identifizierung von Bisphenol als SVHC gemäß Artikel 57c der REACH-Verordnung. Es wird erwartet, dass für eine Zulassung von Bisphenol A die möglichen Risiken bei der Verwendung von Bisphenol A in Erzeugnissen aus PVC berücksichtigt werden. Eine weitere Beobachtung in Bezug auf die menschliche Gesundheit ist geplant. (EC, 2017)

Die European Food Safety Agency etablierte 2018 eine neue EFSA-Arbeitsgruppe aus wissenschaftlichen Experten, die sich derzeit mit einer erneuten Bewertung von BPA beschäftigen. Diese ist für 2020 geplant.

Der Großteil des PVCs wird einer energetischen Beseitigung zugeführt. Hierbei wird BPA zerstört (Arp et al., 2017). Lediglich ein geringer Teil wird werkstofflich wiederverwertet. Hierbei ist davon auszugehen, dass BPA nach wie vor in den Produkten nachzuweisen ist und von einer möglichen Umwelt- und Gesundheitsgefährdung für den Verbraucher wie oben beschrieben auszugehen ist.

5.5.4 HBCDD in EPS

Hexabromocyclododecan (HBCDD) war lange das wichtigste Flammschutzmittel, das in expandiertes Polystyrol (EPS) und extrudiertes Polystyrol (XPS)) verwendet wurde. Dabei wurde es mit einer Konzentration von 7000 mg/kg eingesetzt (Ramboll, 2019). Darüber hinaus wurde HBCDD in Textilien, in Verpackungsmaterial oder in hochschlagfestem Polystyrol (HIPS) für elektrische und elektronische Anwendungen eingesetzt.

Laut seiner CLP-Klassifizierung steht dieser Stoff im Verdacht, die Fruchtbarkeit, das ungeborene Kind und gestillte Kinder zu schädigen. Zusätzlich ist HBCDD persistent, das heißt es baut sich nur schwer in der Umwelt ab. Es reichert sich über die Nahrungskette in Lebewesen an, ist also bioakkumulierend. Eine Giftwirkung wurde für Wasserorganismen wie Krebstiere und Algen nachgewiesen. Im Jahr 2008 wurde HBCDD deshalb in die Liste von besonders besorgniserregenden Stoffen aufgenommen. Außerdem wurde der Stoff 2013 in das Stockholmer Übereinkommen über persistente organische Schadstoffe aufgenommen. Die EU hat dieses Verbot umgesetzt, indem sie HBCDD in die POP-Verordnung mit zeitlich begrenzten Ausnahmen für die Produktion und Verwendung in Schaumpolystyrol (EPS) und extrudierten Polystyrol (XPS) Isolierschäumen in Gebäuden aufgenommen hat: Die Herstellung, das

Inverkehrbringen und die Verwendung von HBCDD (außer unterhalb eines Grenzwertes für unbeabsichtigte Spurenkontaminationen von 100 mg/kg) ist verboten. HBCDD-haltige Abfälle mit einer Konzentration von über 1.000 mg/kg sind entsprechend der POP-Verordnung zu entsorgen (Zerstörung oder irreversible Umwandlung des POP-Gehalts).

Es wird angenommen, dass eine große Menge an HBCDD in EPS-Produkten noch in Verwendung ist und erst in der Zukunft (zwischen 2030 und 2060) als Abfall anfallen wird. Dies liegt zum einen an ihrer langen Lebensdauer (50 +/- 25 Jahre) und zum anderen an den hohen Verwendungsmengen von HBCDD in diesem Sektor (Verbrauchsspitze EU 2011: 6.500t) (BiPRO, 2015), (Fraunhofer IRB, 2015).

Am Ende seiner Gebrauchsdauer beinhaltet ein EPS Produkt noch etwa 99,99 % des HBCDD welches bei seiner Herstellung verbraucht wurde. Mögliche Emissionen während der Produktlebensdauer sind demnach zu vernachlässigen. Für die einzelnen Teilschritte der Abfallbehandlung sind nur bedingt Emissionsfaktoren verfügbar. Die angegebenen Emissionen aus dem Abriss von Gebäuden könnten jedoch ein zukünftiges Szenario sein, da viele Gebäude mit HBCDD-haltigem Dämmmaterial erst zukünftig abgerissen werden (Andersson, 2012).

Für die manuelle Entfernung von Dämmplatten beim Abbruch oder bei der Demontage sind 90 g EPS-Partikel/Tonne EPS im Risikobewertungsbericht, der im Rahmen der SVHC-Identifizierung angefertigt wurde, angegeben (ECHA, 2008b). Für andere Arten der Entfernung wird ein 10-fach höherer Emissionsfaktor von 0,1% (1 kg /Tonne) angenommen (ECHA, 2008b). Auch für ein mögliches Shreddern stehen keine Emissionsfaktoren zur Verfügung. Die Freisetzung von Partikeln beim Sägen von EPS-Platten beträgt 445 g Partikel pro Tonne EPS (0,0445 %). Es wird erwartet, dass die Freisetzung beim Schreddern viel höher ist, da die Platte in kleine Stücke zerlegt wird. Die tatsächliche Emission hängt vom Grad der Eindämmung des erzeugten Staubs in der Schredderanlage ab.

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, wird gesondert erfasstes HBCDD in EPS-Platten zu fast 100 % verbrannt. Eine mögliche Emission von HBCDD aus der Verbrennung ist unwahrscheinlich, soweit die Prozesse bei einer Temperatur von über 190°C durchgeführt werden. Die Verbrennung führt nur zu sehr geringen Mengen an Produkten wie bromierten Dioxinen. Aus einer Stoffflussanalyse für die Schweiz wurde geschätzt, dass die Emissionen aus der Verbrennung nur ca. 0,1 % der gesamten Freisetzungen von HBCDD ausmachen (Climate and Pollution Agency in Zusammenarbeit mit SWEREA IVF AB, 2011). Die Emissionen der gesamten BFR (PBB, PBDE, TBBPA, HBCDD) aus der Verbrennung von bromhaltigen Abfällen wurden gemessen wobei sich zeigte, dass nur 0,001 % des zugeführten BFR emittiert wurden (Borgnes & Rikheim, 2004).

5.5.5 Flammenschutzmittel in PE/PP/PS-Kunststoffen

Die Risiken für Mensch und Umwelt ausgehend von Erzeugnissen aus PE/PP/PS sind vor allem durch den Zusatz von Flammenschutzmitteln gegeben. Dies sind vor allem POP-Stoffe (SCCP, POP-BDE, HBCDD) bzw. POP-Kandidaten (Dechloran Plus, DP) und Tetrabromobisphenol A. Nachfolgend werden die einzelnen Schadstoffe nacheinander bearbeitet. HBCDD wird im Detail im nächsten Unterkapitel (5.5.4) als Zusatzstoff in EPS diskutiert und wird daher an dieser Stelle nicht nochmal für den Gebrauch in PE/PP/PS-Kunststoff diskutiert.

Zu allen genannten prioritären muss erwähnt werden dass, im Rahmen der Verbrennung von halogenierten Flammenschutzmitteln es bei zur Bildung von polychlorierten bzw. polybromierten Dioxinen und Furanen kommt, da diese bei hohen Temperaturen über 400 °C gebildet werden³⁴, wenn organische Brom- und Chlorverbindungen verbrannt werden (Froese & Hutzinger 1996) und (UBA, 2017). Allgemein sind Emissionen bei der Verbrennung von bromhaltigen Flammenschutzmitteln (BFR) sehr gering. So zeigte eine Studie, dass BFR-Emissionen (PBB, PBDE, TBBPA, HBCDD) nur 0,001 % des zugeführten BFR ausmachen (Borgnes & Rikheim, 2004).

Aufgrund der physikalisch-chemischen und ökotoxikologischen Eigenschaften sind kurzkettige chlorierte Paraffine (SCCP) als SVHC-Substanz nach REACH identifiziert. Kurzkettige CP sind zudem als mögliches Karzinogen für Menschen klassifiziert. In der Literatur sind wenig Daten zu Emissionen von SCCPs aus Kunststoffherzeugnissen während der Benutzungsphase bekannt, der Schwerpunkt liegt dabei fast ausschließlich auf der Exposition durch einen anderen Einsatz von SCCP (als Flüssigkeiten in der Metallbearbeitung) (US EPA, 2009). An Standorten, an denen das Recycling von SCCP-haltigen Kunststoffen stattfindet können SCCPs freigesetzt werden, was Prozesse wie Zerkleinern und Mahlen umfassen kann (Environment Canada, 2008).

POP-BDEs meinen im Rahmen dieses Projekts die in der EU-POP-Verordnung genannten Stoffe³⁵. Die Stoffe reichern sich in der Umwelt an und sind persistent & toxisch. Es wird zudem vermutet, dass sie auch endokrine Systeme stören. Alle kommerziellen PBDE-Produkte haben eine ausführliche Risikobewertung im Rahmen der EU-Altstoffverordnung 793/93/EWG durchlaufen. Als Resultat wurden PentaBDE und OctaBDE verboten, da sie sich in der Umwelt anreichern, persistent und toxisch sind. DecaBDE befindet sich als PBT- und vPvB-Stoff auf die SVHC-Stoffe und ist seit 2019 weitreichenden Beschränkungen unterworfen. Alle drei PBDE-Produkte wurden zudem in die Anlage A des Stockholmer Übereinkommens aufgenommen.

POP-BDEs sind Additive, die nicht chemisch an den Kunststoff gebunden sind, sondern sich physikalisch mit dem zu behandelnden Material verbinden und daher leichter in die Umwelt gelangen können. Diese Emissionen betreffen die Nutzungs- und in Arbeitern aus der Produktion und dem Recycling von elektrischen und elektronischen Geräten als auch in nicht exponierten Personen wurde PentaBDE gefunden (Sjodin, 2003). Kunststoffabfälle, die POP-BDEs über einer Konzentration von 1000 mg/kg enthalten, müssen unwiederbringlich zerstört werden.

Zukünftig relevante halogenierte Flammenschutzmittel sind das chlorierte Dechloran Plus, ein POP-Kandidat, und Tetrabromobisphenol A, welches aktuell als persistente, bioakkumulierende, toxische und endokrin wirksame Substanz beurteilt wird. Zu beiden Stoffen gibt es nur wenig Daten zu Emissionen, die zu Risiken für Mensch und Umwelt beitragen könnten. Für TBBPA ist bekannt, dass nur eine geringe Freisetzung dieses Stoffes in die Umwelt bei der Verwendung im Freien in langlebigen Materialien (z.B. Bau- und Konstruktionsmaterialien aus Metall, Holz und

³⁴ Die Vorläufersubstanzen, die Produkte von unvollständiger Verbrennung sind, werden bei hohen Temperaturen (>400 °C, am meisten bei 750 °C) und reagieren später weiter im unteren Temperaturbereich von die Brennkammer (Froese & Hutzinger 1996).

³⁵ Tetrabromdiphenylether, Pentabromdiphenylether, Hexabromdiphenylether, Heptabromdiphenylether, Bis(pentabromphenyl)ether (Decabromdiphenylether; DecaBDE)

Kunststoff) und in Innenräumen in langlebigen Materialien mit geringer Freisetzungsrage (z.B. Fußböden, Möbel, Spielzeug, Baumaterialien, Vorhänge, Schuhe, Lederprodukte, Papier- und Kartonprodukte, elektronische Geräte) stattfindet³⁶. Die geringe Freisetzung ist dadurch zu begründen, dass es kovalent in die Polymermatrix eingebunden ist (Kodavanti, 2014). Bezüglich der Emission bei einer Verbrennung von TBPPA-belasteten Kunststoffabfall lässt sich sagen, dass Emissionen bei der Verbrennung von bromhaltigen Flammschutzmitteln (BFR) sehr gering sind. So zeigte eine Studie, dass BFR-Emissionen (PBB, PBDE, TBBPA, HBCDD) nur 0,001 % des zugeführten BFR ausmachen (Borgnes & Rikheim, 2004). Für Dechlorane Plus ist bekannt, dass es während der Produktion, Verarbeitung und Verwendung sowie bei Entsorgung und Recyclingaktivitäten freigesetzt wird. DP wird weltweit an vielen Standorten nachgewiesen, von Produktions- und Recyclingstandorten bis hin zu städtischen, ländlichen und abgelegenen Bereiche, einschließlich Messungen in Luft, Wasser, Boden, Abwasser, Schlamm, Biofeststoffen, Deponiesickerwasser, Staub, Wildtiere, sowie beim Menschen.

³⁶ <https://www.echa.europa.eu/web/guest/substance-information/-/substanceinfo/100.001.125>

6 Identifizierung geeigneter Entsorgungswege

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens demonstrieren das umfassende Spektrum an Schadstoffen, welche in bestimmten technischen Kunststoffen verwendet werden oder wurden (siehe Kapitel 4). Somit stellen die Ergebnisse ein Instrument dar, welches der wissenschaftlichen Identifizierung schadstoffhaltiger Erzeugnisse und daraus resultierender Abfälle dienen kann.

Die verstärkte Verwendung von Kunststoffzyklen und ein höherer Recyclinganteil in Kunststoffprodukten könnten die Abhängigkeit von der Gewinnung fossiler Rohstoffe zur Kunststoffgewinnung sowie CO₂-Emissionen verringern.

Sowohl Ressourcenschonung als auch der Schutz von Mensch und Umwelt sind durch das KrWG als gleichrangig zu sehen. Ziel des KrWG ist es also, die Kreislaufwirtschaft zu fördern, um die natürlichen Ressourcen zu schonen und Mensch und Umwelt vor negativen Auswirkungen durch die Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen zu schützen. Dieses Ziel soll insbesondere dadurch erreicht werden, dass Erzeuger und Besitzer zur schadlosen und ordnungsgemäßen Verwertung ihrer Abfälle verpflichtet sind und dass keine Schadstoffe im Wertstoffkreislauf angereichert werden.

Geeignete Entsorgungswege sollen soweit möglich beiden Zielen gerecht werden, der Ressourcenschonung durch gesteigertes Recycling gleichermaßen wie der schadlosen und ordnungsgemäßen Entsorgung von Kunststoffabfällen.

Eine Steigerung des Recyclings von technischen Kunststoffabfällen ist teilweise durch deren Schadstoffgehalt begrenzt, insbesondere weil eine Verschleppung von Schadstoffen in neue Produkte und damit verbundene mögliche Risiken nicht erwünscht sind.

Für die schadlose und ordnungsgemäße Entsorgung schadstoffhaltiger Kunststoffe bestehen zwei in der aktuellen Praxis relevante Optionen (siehe auch Abbildung 17):

- ▶ Option A: Identifizierung und Abtrennung der Schadstoffe oder schadstoffhaltiger Fraktionen und deren schadlose Beseitigung durch geeignete Verfahren (z.B. durch geeignete Verbrennung und Beseitigung der Verbrennungsrückstände); Verwertung der schadstofffreien Fraktionen mit dem Ziel das Recycling zu steigern
- ▶ Option B: Beseitigung der schadstoffhaltigen Kunststoffe durch geeignete Verfahren.

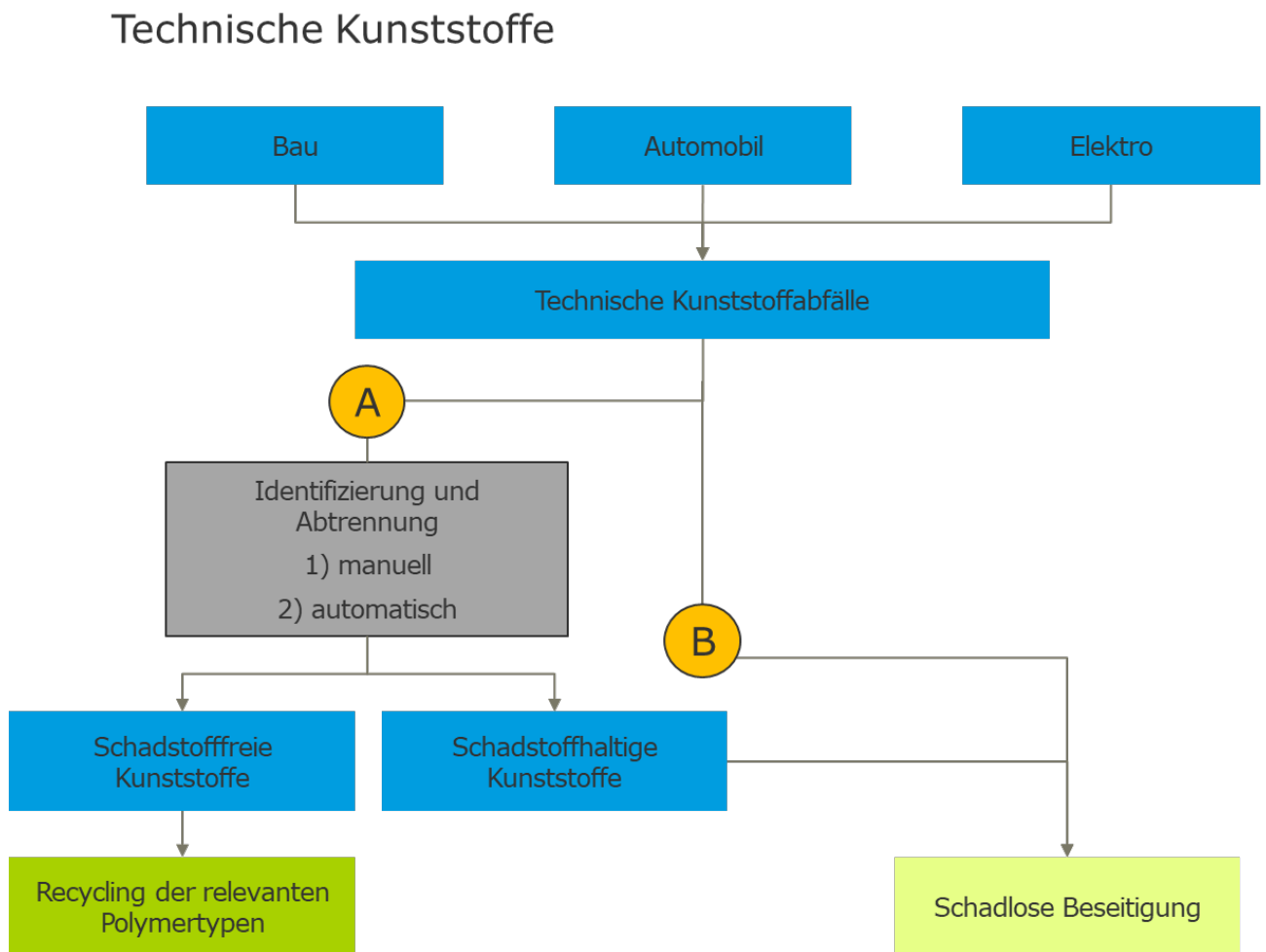
Wesentliche Ziele des aktuellen Vorhabens sind es einerseits das Recycling technischer Kunststoffe zu intensivieren und andererseits mögliche Vorgaben zur Ausschleusung von Schadstoffen aus dem Wertstoffkreislauf nach den einschlägigen abfallrechtlichen abzuleiten. Option A ist vor diesem Hintergrund die bevorzugte Option, weil diese nach der Abtrennung ausgeschleust werden können und der „schadstofffreie“ Teil der Kunststoffe grundsätzlich für das Recycling zur Verfügung steht. Der Begriff „schadstofffrei“ meint in diesem Zusammenhang, dass gegebenenfalls enthaltene Schadstoff unterhalb einschlägiger Konzentrationsgrenzwerte liegen, so dass die erzeugten Rezyklate für die Herstellung von Erzeugnissen und deren beabsichtigte Verwendung eingesetzt werden können. Die Konzentrationsgrenzen können also je nach Verwendungszweck unterschiedlich sein. Diese sind beispielsweise für die Verwendung in Kunststoffen, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen, andere, als für Kunststoffe, bei denen dies nicht der Fall ist.

Für die Identifizierung und Abtrennung schadstoffhaltiger Kunststofffraktionen bestehen ebenso zwei grundsätzliche Optionen:

- ▶ Option A1: Manuelle Demontage, Identifizierung und Abtrennung (potenziell) schadstoffhaltiger Kunststoffe auf Grundlage von Informationen zum Schadstoffgehalt bestimmter Kunststoffkomponenten (wissensbasiert)
- ▶ Option A2: Mechanische Zerkleinerung (Schreddern) und automatisierte Separation von schadstoffhaltigen Fraktionen und Polymertypen mittels geeigneter Sortiertechnik

Diese Optionen sind in Abbildung 17 grafisch dargestellt.

Abbildung 17: Optionen für die schadlose und ordnungsgemäße Entsorgung schadstoffhaltiger technischer Kunststoffe aus den Bereichen Bau, Automobil und Elektro-/Elektronik



Quelle: (Ramboll)

Für eine Steigerung des Recyclings ist es wichtig, dass qualitativ hochwertige Rezyklate erzeugt werden. Hierzu sollten unter anderem Polymersorten wie PP, PE, PS und PVC als möglichst sortenreine Fraktionen und möglichst schadstofffrei gewonnen werden.

Die Separierung in schadstofffreie und sortenreine Fraktionen kann wissensbasiert entweder manuell (Option A1) oder automatisiert mit moderner Sortiertechnik (Option A2) erfolgen. Jede dieser Optionen ist mit bestimmten Vor- und Nachteilen behaftet und beide werden derzeit in beschränktem Ausmaß in Deutschland angewendet.

Frühzeitige Abtrennung durch manuelle Demontage oder Getrennterfassung

Um einer Kontamination mit Schadstoffen sowie einer Erschwerung von Trennprozessen vorzubeugen und somit als Ergebnis eines werkstofflichen Recyclings möglichst sortenreines und schadstofffreies Rezyklat erhalten zu können, kann es sinnvoll sein, mit Schadstoffen belastete Kunststoffpolymere möglichst früh von anderen Materialien abzutrennen. Konkret bedeutet dies die Bevorzugung einer frühzeitigen manuellen Demontage bzw. Getrennterfassung von Kunststoffen gegenüber dem Eintrag in gemischte Abfall- und Materialströme.

So kann im Baubereich die getrennte Erfassung von (Kunststoff-)Abfällen bei Abbruch und Sanierung sehr sinnvoll sein. Wie in Kapitel 5.2.3 dargestellt, können beispielsweise getrennt erfasste PVC-Abfälle mit bestehenden Behandlungstechniken sehr gut werkstofflich recycelt werden, wohingegen Kunststoffabfälle, welche mit anderen Bau- und Abbruchabfälle gemischt erfasst werden, überwiegend energetisch verwertet werden. Eine verstärkte Getrennterfassung schadstoffbelasteter Kunststoffabfälle aus dem Baubereich könnte somit einen wichtigen Beitrag für mehr und qualitativ hochwertigeres Recycling leisten. Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Getrennterfassung ist, dass Schadstoffe nicht in Abfallgemische eingetragen werden und somit entsprechend besser kontrolliert werden können. Im Automobil- und Elektro-/Elektronikbereich kann eine manuelle Demontage bzw. Erstbehandlung vor dem Schreddern oder sonstigen weiteren Behandlungsschritten dahingehend sinnvoll sein. Für den Automobilbereich fordert das UBA in einem Bericht (vgl. UBA, 2016c) beispielsweise eine konsequente manuelle Abtrennung großer Kunststoffteile. Die manuelle Demontage von Kunststoffteilen ist jedoch sowohl von sowohl technischen als auch wirtschaftlichen Faktoren abhängig, z.B. ausreichend Platz in Vorbehandlungsstandorten für Demontage, Sortierung und Lagerung, Infrastruktur und Transport sowie die Marktsituation von demontierten Kunststoffteilen. Diese und andere erschwerende Rahmenbedingungen führen dazu, dass die manuelle Demontage im Automobilbereich in Deutschland wenig ausgeprägt ist (ACEA, 2019). Auch für den Elektrobereich kann es sinnvoll sein, schadstoffhaltige oder sortenreine Materialien abzutrennen. Dabei sind sowohl die jeweiligen ursprünglichen Verwendungsbereiche der Kunststoffe als auch der Anwendungsbereich der Rezyklate zu berücksichtigen (UBA, 2020). Besonders große Geräte könnten sich für die Abtrennung von Kunststoffteilen vor dem Schreddern eignen, da die Anzahl verschiedener Geräte überschaubar ist und klare Richtlinien zur Demontage vorgegeben werden können. Außerdem kann es bei der Demontage für das werkstoffliche Recycling aus dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit sinnvoll sein, Teile aus besonders hochwertigen Polymeren zu bevorzugen (UBA 2017). Die manuelle Demontage von Kunststoffteilen ist darüber hinaus abhängig von sowohl technischen als auch wirtschaftlichen Faktoren, z.B. ausreichend Platz der Vorbehandlungsstandorte für Demontage, Sortierung und Lagerung, Infrastruktur und Transport sowie die Marktsituation von demontierten Kunststoffteilen. Diese und andere erschwerende Rahmenbedingungen führen dazu, dass die manuelle Demontage in Deutschland wenig ausgeprägt ist (ACEA, 2019).

Aus verschiedenen Gründen kann es jedoch auch sinnvoll sein, auf eine entsprechende Abtrennung im Rahmen einer Demontage bzw. Erstbehandlung zu verzichten und gemischte Abfall- und Materialströme nach dem Schreddern mittels Post-Schredder-Technologie (PST) zu behandeln. Entsprechende Möglichkeiten werden in nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

Anwendung von Post-Shredder-Technologie

Für die automatisierte Abtrennung nach dem Schreddern mit moderner PST gibt es verschiedene Techniken, die entwickelt wurden, um Schredderrückstände nach unterschiedlichen Gesichtspunkten zu sortieren. Einige davon sind geeignet, um u.a. schadstoffhaltige Rückstände von anderen Materialien zu trennen. Ein Bericht des UBA (2017)

fasst, basierend auf verschiedenen Quellen, unterschiedliche Methoden zur Separierung von Kunststoffen nach ihren physikalischen Eigenschaften zusammen, die gegenwärtig im Bereich PST eingesetzt werden. Beispielhaft lassen sich die Trennung nach Dichteigenschaften und sogenannte Sensor-Sortiersysteme anführen.

UBA (2017) nennt als ein verbreitetes Verfahren der Separierung nach Dichte die Schwimm-Sink-Trennung. Kunststoffe mit verschiedenen Dichteigenschaften lassen sich mit dieser Technik voneinander trennen, indem Materialien mit höherer Dichte als andere in einem mit Trennflüssigkeit gefüllten Absetzbecken sedimentieren. Eine genauere Trennung lässt sich mittels Hydrozyklon oder Trennzentrifuge erzielen. Dabei wird die Fliehkraft genutzt, um Materialien nach Dichteunterschieden zu sortieren (UBA, 2017). Auf Grund der höheren Dichte von flammgeschützten Kunststoffen sind Dichtentrenungsverfahren zur Abtrennung solcher Materialien geeignet (Mehlhart et al., 2019).

Eine weitere Form von PST sind Sensor-Sortiersysteme. Dabei werden Systeme mit unterschiedlichen Sensoren und Sensorkombinationen eingesetzt, um Informationen über bestimmte Materialeigenschaften zu identifizieren und eine entsprechende Trennung der Materialien per Druckluftsortierung zu ermöglichen (Lindweiler, 2015).

Weitere Methoden der Sortierung von Post-Schredder-Rückständen trennen u.a. nach den Gesichtspunkten der elektrischem Aufladungsverhalten oder nach der Benetzbarkeit der Oberfläche (UBA, 2017).

Wie zuvor geschildert, sind verschiedene, auf fortschrittlicher Separationstechnologie basierende, Post-Schredder-Technologien verfügbar. Sie ermöglichen die Trennung von Kunststofffraktionen und spezifischen Polymeren und Schadstoffen bis zu einem bestimmten Ausmaß.

Der größte Anteil an EAG und Altfahrzeugen wird in Schreddern behandelt. Die Kunststoffanteile werden über PST, wie oben geschildert, sortiert und der Großteil anschließend energetisch verwertet (siehe Kapitel 1245.3.3 und 5.4.3).

Besonders bei EAG Sammelgruppen, die viele unterschiedliche Gerätearten beinhalten, v.a. Kleingeräte und kleine Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik, kann eine Post-Schredder-Trennung sinnvoll sein. Für Großgeräte hingegen, ist eine vorangehende manuelle Demontage zu empfehlen. Über die Anwendung von PST für gemischte Kunststoffabfälle aus dem Baubereich (nach Sortierung und Behandlung im Schredder) liegen keine Informationen vor. Grundsätzlich könnten hier aus rein technischer Sicht Potentiale vorhanden sein. Für belastbare Aussagen wären die genauen Entsorgungswege gemischter Bau- und Abbruchabfälle, welche Kunststoffe enthalten, jedoch näher zu untersuchen.

Allerdings haben sowohl die manuelle Demontage als auch die modernen PST ihre Grenzen. Hier seien nur einige genannt: weniger bedeutende Polymere werden in der Regel nicht abgetrennt, weil es sich nicht lohnt, die entsprechende Infrastruktur für geringe Massenströme einzurichten. Verbundmaterialien, Lamine und Kleber stören bei der Separation. Additive und Füllstoffe, die die Eigenschaften der Kunststoffe verändern, führen zu Fehlsortierungen.

Grundsätzlich sind auch noch andere als die in oben Abbildung 17 gezeigten Optionen zur Abtrennung und oder Zerstörung von Schadstoffen und zur Steigerung des Recyclings möglich. Diese sollten im Sinne einer Technologieoffenheit nicht außer Acht gelassen werden. Dazu gehören z.B. Verfahren des „rohstofflichen“ bzw. „chemischen“ Recyclings (Thermische Spaltung) oder die Aufspaltung der Kunststoffe mittels Lösemittel (Solvololyse).

Rohstoffliches Recycling

Das Potential des rohstofflichen Recycling ist derzeit schwer einzuschätzen. Trotz stetig ansteigender Kunststoffabfälle in Deutschland ist die Menge, welche einem rohstofflichen Recycling zugeführt werden, seit dem Jahr 2000 deutlich zurück gegangen (UBA, 2018). Nach Conversio (2018a) wurden im Jahr 2017 in Deutschland nur 49.000 t Kunststoffabfälle rohstofflich verwertet. Bei einer gesamten Kunststoffabfallmenge von 6,1 Mio. t entspricht dies einem Anteil von lediglich 0,8 %.

Nach Meinung der Autoren einer Publikation der Deutschen Gesellschaft für Abfallwirtschaft (DGAW, 2019) kann das chemische Recycling eine technische Möglichkeit werden, um die stoffliche Verwertung von Kunststoffen zu fördern. Methoden zur rohstofflichen Verwertung von Kunststoffen können Schadstoffe effektiv aus den Kunststoffen entfernen, die Anwendung im industriellen Maßstab findet bisher jedoch kaum statt. Fehlende Wirtschaftlichkeit, regulatorische Grenzen und fehlende Nachhaltigkeit, etwa durch hohen Energieeinsatz, werden als Hauptgründe für den geringen Einsatz aufgeführt. Chancen für die chemische Verwertung von Kunststoffen werden vor allem in der Möglichkeit gesehen, Misch- oder High-Tech Kunststoffe zu recyceln, für welche werkstoffliche Verfahren bisher gescheitert sind. An Pilotprojekten, die innovative Arten der thermischen Spaltung von Kunststoffen verwenden (meist abgewandelte Arten der Vergasung und Pyrolyse), arbeiten derzeit Unternehmen wie BASF, Borealis, oder LyondellBasell. Ziel ist die Herstellung von Rezyklat mit Neuwarequalität. Ob sich die Pilotprojekte im industriellen Maßstab anwenden lassen, bleibt aufgrund der erwähnten Hindernisse jedoch abzuwarten (DGAW, 2019).

In der Regel wird auch die Verwendung von Kunststoffabfällen als Reduktionsmittel im Hochofen als rohstoffliches Recycling gesehen. Dabei werden Schadstoffe durch die hohen Temperaturen (bis 2100°C) zerstört. Es handelt hierbei um eine Mischform zwischen chemischer und energetischer Verwertung, da nur ein Teil des Kunststoffes (50%) als Reduktionsmittel mit Eisenoxid reagiert. Die restlichen Teile tragen durch ihre Verbrennung zur Reaktionswärme bei (energetische Verwertung) (Martens, 2011). Einen Beitrag zur Erhöhung des Kunststoffrecyclings liefert die Verwendung als Reduktionsmittel im Hochofen jedoch nicht.

7 Quellenverzeichnis

- ADEME (2017): Annual Report of the End-of-life vehicle sector observatory. Verfügbar unter: <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/end-of-life-vehicle-201710-rapport.pdf>
- AgPR, (2020): Prospekt PVC-Bodenbelag Recycling. Verfügbar unter: <http://www.agpr.de/cms/website.php?id=/de/service/downloads.htm&nid=5&nidsub=3>
- AGPU (Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt e.V.) (2016): Alles über PVC von der Herstellung bis zum Recycling. Verfügbar unter: https://www.agpu.de/wp-content/uploads/2016/03/AGPU_AllesueberPVC_DE.pdf
- Albrecht, W., Schwitalla, C. (2015): Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS. Fraunhofer IRB Verlag
- Andersson, H. P.-C., Anna; Munthe, John; Brorström-Lundén, Eva; Wickman, Eva; Pettersson, Maria; Holmström, Katrin; Jamtrot, Arne; Parkman, Helena; Fischer, Stellan; Mehtonen, Jukka; Krupanek, Janusz; Zielonka, Urszula; Piasecka, Joanna; Pilch, Anna; Nielsen, Ulf; Menger-Krug, Eve. (2012). COHIBA WP4 background paper. Identification of sources and estimation of inputs to the Baltic Sea. *Helsinki: HELCOM Secretariat*(Version 2.0 2012), 445 pp.
- Arp H.P.H., Morin N.A.O., Hale S.E., Okkenhaug G., Breivik K., Sparrevik M. (2017) The mass flow and proposed management of bisphenol A in selected Norwegian waste streams, *Waste Manag.*, 60 (2017), pp. 775-785, 10.1016/j.wasman.2017.01.002
- Baxter, J., Wahlstrom, M., Zu Castell-Rüdenhausen, M., Fråne, A., Stare, M., Løkke, S., & Pizzol, M. (2014): Plastic value chains: Case: WEEE (Waste Electric and electronic equipment) in the Nordic region. Nordic Council of Ministers.
- BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (2017): Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. BBSR, Bonn (Zukunft Bauen: Forschung für die Praxis, Band 06).
- BiPRO (2011): BiPRO GmbH im Auftrag der Europäischen Kommission, Generaldirektion Umwelt (BiPRO als Teil des Konsortiums ESWI bestehend aus BiPRO GmbH Deutschland, Umweltbundesamt GmbH Österreich und Enviroplan S.A. Griechenland). Study on waste related issues of newly listed POPs and candidate POPs, Final Report, 13. April 2011. Verfügbar unter: ttp://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/POP_Waste_2011.pdf
- BiPRO. (2015). Ermittlung von potentiell POP-haltigen Abfällen und Recyclingstoffen - Ableitung von Grenzwerten In G. A. Fachgebiet III 1.5 Kommunale Abfallwirtschaft, Anlaufstelle Basler Übereinkommen, Dr. Georg Surkau, Mareike Walther (Ed.), *Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit* (Vol. 34/2015). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- BMU (2019): Daten über Elektro- und Elektronikgeräte in Deutschland aus dem Jahr 2017, wie sie an die EU-Kommission berichtet wurden. Abgerufen am 14.02.20 unter: <https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/elektro-und-elektronikaltgeraete/>
- Borgnes, D., & Rikheim, B. (2004). Decomposition of BFRs and emission of dioxins from co-incineration of MSW and electrical and electronic plastics waste. *Organohalogen Compounds*, 66, 890-898. CEDEC (European Committee of Domestic Equipment Manufacturers) (2017): Material Flows of the Home Appliance Industry. Verfügbar unter: <http://www.materialflows.eu/#p=30>
- CH_BAFU (2017): Stoffflüsse im Schweizer Elektronikschrott. Verfügbar unter: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/chemikalien/uz-umwelt-zustand/Stofffl%C3%BCsse%20im%20Schweizer%20Elektronikschrott.pdf.download.pdf/UZ-1717-D_2017-06-21.pdf

Climate and Pollution Agency in collaboration with SWEREA IVF AB. (2011). Exploration of managements options for Hexabromocyclododecane *Report to the 8th meeting of the UNECE Task Force on Persistent Organic Pollutants* (Vol. 2818/2011). Montreal: UNECE Task Force on Persistent Organic Pollutants.

Conversio (2018a): Kurzfassung Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017. Verfügbar unter: https://www.bvse.de/images/news/Kunststoff/2018/181011_Kurzfassung_Stoffstrombild_2017.pdf

Conversio (2018b): Analyse der PVC-Produktion, Verarbeitungs-, Abfall- und Verwertungsströme in Deutschland 2017. Verfügbar unter: https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/wp-content/uploads/2018/10/PVC_Analyse_D_2017_Kurzfassung.pdf

COWI (2013): Hazardous substances in plastic materials. Verfügbar unter: http://www.byggemiljo.no/wp-content/uploads/2014/10/72_ta3017.pdf

Creacycle (2016): PolyStyrene Loop. Verfügbar unter: <https://www.creacycle.de/de/creasolv-werke/polystyrene-loop-2016.html>

Dehoust, G. (2012): Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe. Bearbeitung Öko-Institut e.V. und HTP GmbH. Umweltforschungsplan des BMUB FKZ 3711 33 316. Texte 40/2012. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

DGAW (Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft) (2019): DGAW-Kunststoff-Newsletter Nr. 5 Chemisches Recycling – ein Lösungsweg für das Recycling von Mischkunststoffen?

Destatis (2019): Umwelt – Abfallentsorgung. Fachserie 19 Reihe 1.

EC (2008). 4,4'-Isopropylidenediphenol (bisphenol-A). Updated European Union Risk Assessment Report, 3rd priority list, Volume 37.

EC (2011): Plastic Waste in the Environment. European Commission DG ENV, Bio Intelligence Service.

EC (2017) (Substance Evaluation Conclusion document) <https://echa.europa.eu/documents/10162/7971ab80-03c9-4d87-e117-e4dbc9cc54d2>

EC (2019): Study to support the review of waste related issues in annexes IV and V of regulation (EC) 850/2004. Final report.

ECHA (2008) European Union Risk Assessment Report: bis(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP) *Existing Substances* (Vol. 80): Institute for Health and Consumer Protection.

ECHA. (2008b). Risk assessment report Hexabromocyclododecane.

ECHA Exercise (2019)

https://echa.europa.eu/documents/10162/13630/plastic_additives_supplementary_en.pdf/79bea2d6-8e45-f38c-a318-7d7e812890a1

EERA (European Electronics Recyclers Association) (2018a): European E-Waste Recyclers' position UTC POP content limit for Deca-BDE. An EERA position paper for member of the ENVI Committee.

EERA (European Electronics Recyclers Association) (2018b): Responsible recycling of WEEE plastics containing Brominated Flame Retardants- BFR's

Environment Canada (2008) Chlorinated Paraffins Follow-up Report on a PSL1 Assessment for Which Data Were Insufficient to Conclude Whether the Substances Were "Toxic" to the Environment and to the Human Health. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/canadian-environmental-protection-act-registry/publications/chlorinated-paraffins.html> Accessed 2 December, 2017.

FG Kunststoffmatten GmbH (Webseite): <https://kunststoffmatten.de/de/pvc-recycling>

Fraunhofer ICT (Webseite):

https://www.ict.fraunhofer.de/de/presse_mediathek/pressemitteilungen/2007/2007-05-21.html

Fraunhofer IRB. (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.

Froese K.L., Hutzinge O. (1996) Polychlorinated Benzene, Phenol, Dibenzo-p-dioxin, and Dibenzofuran in Heterogeneous Combustion Reactions of Acetylene, Environ. Sci. Technol. 1996, 30, 3, 998-1008, February 26, 1996, <https://doi.org/10.1021/es9504808>

Goovaerts L., Vanderreydt I., Van Hoof V., Vrancken K. (2009), FINAL REPORT, Study on the cadmium content of recycled PVC waste, Study commissioned by Vinyl2010. 2009/TEM/R/189

Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018): An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. Journal of Hazardous Materials, 344, 179-199. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>

Hammer, J., Kraak, M. H., & Parsons, J. R. (2012): Plastics in the marine environment: the dark side of a modern gift. Rev Environ Contam Toxicol, 220, 1-44. doi:10.1007/978-1-4614-3414-6_1

HBM4EU (2018) Scoping Document für priority substacnes, via https://www.hbm4eu.eu/wp-content/uploads/2017/03/Deliverable-4.2_-Scoping_documents_for_-2018_v3.1.pdf

Hirth, T., Woidasky, J. (2004): Kreislaufführung von Flüssigkeitstragender Polymerbauteile. Im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. https://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/01RC0009_-_Abschlussbericht.pdf

Jandric, A., Part, F., Fink, N., Huber-Humer, M., Salhofer, S., & Zafiu, C. (2019): Bromierte Flammschutzmittel in Elektroaltgeräten: Untersuchung der Brom-Konzentration nach Kunststofftypen und Gerätekategorien mittels Röntgenfluoreszenzanalyse. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 1-9.

Kettler, H.: (2009). Vortrag zu Altkabelzerlegung. http://www.hdk-dresden.de/dokumente/kunststoffrecycling_2009/08_Kettler.pdf

Kodavanti P.R.S., Loganathan B.G. (2014) in Biomarkers in Toxicology, Polychlorinated biphenyls, polybrominated biphenyls, and brominated flame retardants via <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/tetrabromobisphenol-a>

KRV (2019): KRV-Impulse Mai 2019. Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffrohr-Industrie. Verfügbar unter: https://www.krv.de/system/files/downloads/krv-impulse-web_210519.pdf

KRV (Webseite): <https://www.krv.de>

LAGA (2018): Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 31 B „Umsetzung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes“ „Technische Anforderungen an die Behandlung und Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten“ Stand 18.04.2018. Verfügbar unter: https://www.laga-online.de/documents/m-31b-18-04-2018-neu_1527151713.pdf

Linder, C. (2019): Stoffstrombild in Deutschland 2017 In Thiel, S., Holm, O. Thomé-Kozmiensky, E., Goldmann, D., Friedrich, B. (2019): Recycling und Rohstoffe Band 12. Neuruppin

Lindweiler (2015): Sensortechnik für Kunststoffrecycling. In Recycling und Rohstoffe band #. Thomé-Kozmiensky Verlag.

Lithner, D., Larsson, Å., & Dave, G. (2011): Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. Science of The Total Environment, 409(18), 3309-3324. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.038>

- Maier, R.-D., & Schiller, M. (2016): Handbuch Kunststoff Additive.
- Martens, H. (2011): Recycling Fachbuch für Lehre und Praxis. Heidelberg: Spektrum
- Mehlhart G., Möck A., Goldmann D. (2018): Effects on ELV waste management as a consequence of the decisions from the Stockholm Convention on decaBDE; via <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/ACEA-DecaBDE-final-report.pdf>
- Mehlhart G., Möck A., Goldmann D. (2019): Auswirkungen neuer Anwendungsverbote für Flammschutzmittel auf das Altfahrzeuerecycling. In Recycling und Rohstoffe Band 12. Thomé-Kozmiensky Verlag
- Moreta, C., & Tena, M. T. (2015): Determination of plastic additives in packaging by liquid chromatography coupled to high resolution mass spectrometry. J Chromatogr A, 1414, 77-87. doi:10.1016/j.chroma.2015.08.030
- NC. (2017): Hazardous substances in plastics – ways to increase recycling. Verfügbar unter: <https://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1070548/FULLTEXT01.pdf>
- Ökopol (2017): Märkte, Mengenströme und Einsatzgebiete der Rezyklate. AG Kunststoffe. Institut für Ökologie und Politik GmbH.
- PlasticsEurope (2012): Plastics Architects of modern and sustainable buildings. Verfügbar unter: https://www.plasticseurope.org/application/files/3915/1714/0577/bc_brochure_111212.pdf
- PlasticsEurope (2013): PlasticsEurope: Automotive - The world moves with plastics. Verfügbar unter: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/104-automotive-world-moves-plastics-brochure>
- PlasticsEurope (2015a): Verwertung von PolystyrolSchaumstoffabfällen mit HBCD
- PlasticsEurope (2015b): Plastics – the Facts 2014/2015. Verfügbar unter: https://www.plasticseurope.org/application/files/5515/1689/9220/2014plastics_the_facts_PubFeb2015.pdf
- PlasticsEurope (2019): Plastics – the Facts 2019. An analysis of European plastics production, demand and waste data
- Prognos (2000): Mechanical Recycling of PVC Waste: Study for DG XI of European Commission. (B4-3040/98/000821/MAR/E3).
- Ramboll (2019): Study to support the review of waste related issues in annexes IV and V of regulation (EC) 850/2004. Verfügbar unter: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8ea39ec6-4479-11e9-a8ed-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF>
- Rani, M., Shim, W. J., Han, G. M., Jang, M., Al-Odaini, N. A., Song, Y. K., & Hong, S. H. (2015): Qualitative Analysis of Additives in Plastic Marine Debris and Its New Products. Arch Environ Contam Toxicol, 69(3), 352-366. doi:10.1007/s00244-015-0224-x
- Rewindo Best Practice: Best Practice für die Umwelt. Werkstoffliches Recycling von PVC-Bauprodukten. Verfügbar unter: <https://rewindo.de/infomaterial>
- RIVM (2016): Plastics that contain hazardous substances: recycle or incinerate? Verfügbar unter: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0025.pdf>
- RIVM (2017): Substances of very high concern and the transition to a circular economy. Verfügbar unter: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2017-0071.pdf>
- RIVM_Ramboll (2019): Clean material recycling project – Study” RIVM Ramboll Clear 2019. Verfügbar unter: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/26e22c04-5b62-11e9-9c52-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF>
- Roofcollect (Webseite): <https://www.roofcollect.com>

- Sander, K., Kohlmeyer, R., Rödig, L., & Wagner, L. (2017). Altfahrzeuge–Verwertungsquoten 2015 und Hochwertigkeit der Verwertung. *Recycling und Rohstoffe*, 10, 305-325.
- Schlummer, M., Vogelsang, J., Fiedler, D., Gruber, L., & Wolz, G. (2015). Rapid identification of PS foam wastes containing HBCDD or its alternative PolyFR by X-ray fluorescence spectroscopy (XRF). *Waste Manag. Res.*
- Schlummer, M. Knappich, F. (2016): Recycling von Metall-Kunststoffverbunden und Hybridwerkstoffen. Freising. Verfügbar unter:
https://www.stmuv.bayern.de/themen/ressourcenschutz/forschung_entwicklung/doc/abschlussberichte/tp6.pdf
- Schonmayr, D. (2017) *Automotive Recycling, Plastics, and Sustainability*. Springer
- Sjödín A., Patterson Jr D.G., Bergman A. (2003) A review on human exposure to brominated flame retardants particularly polybrominated diphenyl ethers, *Environment International*, Volume 29, Issue 6, September 2003, Pages 829-839, [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00108-9)
- SPI (The Plastics Industry Trade Association) (2016). Plastic Market Watch. Automotive. Verfügbar unter:
<https://access.plasticsindustry.org/ItemDetail?iProductCode=PMW005&Category=PUBLICATION>
- Sprengard, C., Treml, S. und Holm, A. H. (2013): Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe. Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen. FIW München. Bericht FO 12/12. Verfügbar unter: http://www.fiw-muenchen.de/media/pdf/metastudie_waermedaemmstoffe.pdf. Aufgerufen am 15.12.2017
- Swerea IVF AB: Decabromodiphenyl ether and other flame retardants in plastic waste destined for recycling M-973, Martin Strååt and Camilla Nilsson, 2018. Available at:
<http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/2018/Mars-2018/Decabromodiphenyl-ether-and-other-flame-retardants-in-plastic-waste-destined-for-recycling>
- Swerea. (2018): Decabromodiphenyl ether and other flame retardants in plastic waste destined for recycling. Verfügbar unter: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M973/M973.pdf>
- Talsness, C. E. (2008): Overview of toxicological aspects of polybrominated diphenyl ethers: a flame-retardant additive in several consumer products. *Environ Res*, 108(2), 158-167. doi:10.1016/j.envres.2008.08.008
- Turner, C., Figl, H. (2017) Flammenschutzmittel in Bauprodukten, IBO Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, <https://www.wecobis.de/service/sonderthemen-info/svhc-fsm-info.html>
- UBA (2014): Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen – mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe. UBA-FB 002343
- UBA (2015): Ermittlung von potentiell POP-haltigen Abfällen und Recyclingstoffen – Ableitung von Grenzwerten. (UBA-FB 002097)
- UBA (2016a): Evaluation der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen des Wegfalls der Heizwertregelung des § 8 Abs. 3 Satz 1 KrWG. Umweltbundesamt
- UBA (2016b): Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen: mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe.
- UBA (2016c): Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes
- UBA (2017): Anforderungen an die Behandlung spezifischer Elektroaltgeräte unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten. Julia Wolf, Ralf Brüning, Lisa Nellesen, Jochen Schiemann. 2017
- UBA (2018). Kunststoffabfälle. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#kunststoffe-produktion-verwendung-und-verwertung>

UBA (2019a): The criteria for identifying Persistent, Mobile, and Toxic (PMT) substances and very Persistent, and very Mobile (vPvM) substances under EU REACH Regulation (EC) No 1907/2006.

UBA (2019b): Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität (UBA-FB 002704)

UBA (2019c): Hinweise zum Recycling – Kunststoffe. Verfügbar unter:
<https://www.umweltbundesamt.de/kunststoffe#hinweise-zum-recycling>

UBA (2019d): Elektroaltgeräte. Link: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/elektroaltgeraete#elektronikaltgeraete-in-deutschland>

UBA (2019e): Untersuchung von Abfällen auf das Vorkommen nicht-technischer PCB-Kongeneren und Deca-BDE

UBA (2020): Evaluierung und Fortschreibung der Methodik zur Ermittlung der Altfahrzeugverwertungsquoten durch Schredderversuche unter der EG-Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG

UBA und BMU (2017): Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2017 nach Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG KOM-Tabellen und Qualitätsbericht (Beschreibung der verwendeten Daten) nach Artikel 1 und 3 der Kommissions-Entscheidung 2005/293/EG über Altfahrzeuge sowie nach dem Leitfaden der Kommission „How to report on ELVs according to Commission Decision 2005/293/EC“

US EPA (2009) via https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/sccps_ap_2009_1230_final.pdf

VDK (Verband Kunststoffherstellende Industrie (2003): Kunststoffe in Elektro- und Elektronikgeräten

Zimmermann, L., Dierkes, G., Ternes, T. A., Völker, C., & Wagner, M. (2019): Benchmarking the in Vitro Toxicity and Chemical Composition of Plastic Consumer Products. *Environmental Science & Technology*, 53(19), 11467-11477. doi: 10.1021/acs.est.9b02293