

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR UMWELT-, SICHERHEITS- UND ENERGIETECHNIK UMSICHT
ÖKOPOL – INSTITUT FÜR ÖKOLOGIE UND POLITIK GMBH

KUNSTSTOFFE IN DER UMWELT: EMISSIONEN IN LANDWIRTSCHAFTLICH GENUTZTE BÖDEN

IM AUFTRAG DES NABU (NATURSCHUTZBUND DEUTSCHLAND) E. V.



BERICHT

OBERHAUSEN/HAMBURG | MAI 2021

Kunststoffe in der Umwelt: Emissionen in landwirtschaftlich genutzte Böden

- Autoren:** Jürgen Bertling*, Till Zimmermann**, Lisa Rödiger
*Korrespondenzautor für Gesamtbericht, Quellenanalysen und Mengenabschätzung,
**Korrespondenzautor für regulatorische Aspekte
- Kontakte:** **Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT**
Osterfelder Str. 3, 46047 Oberhausen
www.umsicht.fraunhofer.de
Jürgen Bertling juergen.bertling@umsicht.fraunhofer.de
Ökopool – Institut für Ökologie und Politik GmbH
Nernstweg 32-34, 22765 Hamburg
www.oekopol.de
Till Zimmermann zimmermann@oekopol.de
- Mitarbeitende:** Sandra Naumann, Alina Farrenkopf, Fynn Hauschke, Torsten Weber, Simone Krause
- Titelfoto:** Katharina Istel (2021)
- Auftraggeber:** **NABU (Naturschutzbund Deutschland) e. V.**
Charitéstraße 3, 10117 Berlin
Zuständig:
Katharina Istel, Michael Jedelhauser
- Ausgabe:** 07. Mai 2021
- Im Internet verfügbar:** publica.fraunhofer.de
DOI: [10.24406/umsicht-n-633611](https://doi.org/10.24406/umsicht-n-633611)
- Nutzungsbedingung:** CC-BY
- Zitierweise:** Bertling, Jürgen; Zimmermann, Till; Rödiger, Lisa: Kunststoffe in der Umwelt: Emissionen in landwirtschaftlich genutzte Böden, Oberhausen, Fraunhofer UMSICHT (2021) 220 Seiten
- Weiteres Material:** Weitere Informationen zu Kunststoffen in der Umwelt und Mikroplastik finden Sie hier: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/forschung-fuer-den-markt/kunststoffe-in-der-umwelt.html>

Inhalt

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | Vorbemerkung | 5 |
| 1.1 | Erklärung zu Finanzierung, Verantwortlichkeiten und Nutzungsbedingungen | 6 |
| 2 | Verzeichnisse | 7 |
| 2.1 | Abbildungen | 7 |
| 2.2 | Tabellen | 8 |
| 2.3 | Abkürzungen | 11 |
| 3 | Zusammenfassung | 14 |
| 4 | Beschreibung und Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes | 18 |
| 4.1 | Motivation, Aufgabenstellung und Validität der Ergebnisse | 18 |
| 4.2 | Systemgrenzen | 18 |
| 4.3 | Kunststoffe und Kunststoffemissionen | 20 |
| 4.4 | Landwirtschaft und landwirtschaftlich genutzte Böden | 20 |
| 5 | Gesamtbetrachtung | 23 |
| 5.1 | Kunststoffeinsatz in der Landwirtschaft | 23 |
| 5.2 | Übersicht zu landwirtschaftlichen Kunststoffemissionen in Deutschland | 27 |
| 5.3 | Kunststoffeinträge in landwirtschaftliche Böden | 34 |
| 5.4 | Kunststoffgehalte in Böden (Literaturübersicht) | 37 |
| 5.5 | Wirkung von Kunststoffen in Böden (Literaturübersicht) | 42 |
| 5.6 | Ökonomische Entwertung landwirtschaftlicher Böden durch Kunststoffeinträge | 49 |
| 6 | Maßnahmenvorschläge | 52 |
| 7 | Kunststoffemissionen nach Quellen | 59 |
| 7.1 | Folien, Vliese, Netze, Garne und Beschichtungen | 59 |
| 7.2 | Bewässerungssysteme, Pflanztöpfe, Pflanzhilfen | 80 |
| 7.3 | Saatgut, Düngemittel, Bodenverbesserer und Pflanzenschutzmittel | 98 |
| 7.4 | Klärschlamm und Komposte | 118 |
| 8 | Exkurs: Littering und Landwirtschaft | 139 |
| 8.1 | Littering | 139 |
| 8.2 | Kunststoff-Litter-Einträge in die Siedlungswasserwirtschaft | 144 |
| 8.3 | Kunststoff-Litter-Einträge in und durch die Landwirtschaft (dient nur zum Vergleich) | 145 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 9 | Anhang I: Daten und Berechnungen | 148 |
| 9.1 | Emissionsmengen (nicht-logarithmisch) | 148 |
| 9.2 | Abschätzung der Verbrauchsmengen für Agrarkunststoffe nach Anwendungsgebieten in Deutschland | 149 |
| 9.3 | Futtermittelproduktion und energetische Biomassenutzung | 150 |
| 9.4 | Folien, Netze und Garne in der Pflanzenproduktion | 155 |
| 9.5 | Umhülltes Saatgut | 161 |
| 10 | Anhang II: Datenqualität | 162 |
| 10.1 | Pedigree-Matrix | 162 |
| 10.2 | Bewertung der für eigene Berechnungen verwendeten Datenquellen | 164 |
| 11 | Anhang III: Allgemeine Rechtsakte | 174 |
| 11.1 | Kreislaufwirtschaftsrecht | 174 |
| 11.2 | Bodenschutzrecht | 177 |
| 11.3 | Chemikalienrecht | 181 |
| 11.4 | Freiwillige Standards | 187 |
| 12 | Anhang IV: Biologische Abbaubarkeit | 189 |
| 12.1 | Nachweis der biologischen Abbaubarkeit | 189 |
| 12.2 | Zersetzung von biologisch abbaubaren Kunststoffen unter realen Bedingungen | 197 |
| 12.3 | Oxo-abbaubare bzw. oxo-fragmentierbare Kunststoffe | 201 |
| 13 | Einbindung von Expertenmeinungen | 203 |
| 14 | Literatur | 205 |

1 Vorbemerkung

Fraunhofer UMSICHT und das Ökopol – Institut für Ökologie und Politik arbeiten seit einigen Jahren daran, den Erkenntnisstand rund um die Thematik der Kunststoffemissionen zu verbessern. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf den Quellen, den Freisetzungsmechanismen, den Emissionsmengen und den Eintragspfaden in die Umwelt sowie auf der Entwicklung von Strategien und Technologien zur Verringerung, Vermeidung oder Rückhaltung der Emissionen.

In der Veröffentlichung »Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik – Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen« von Juni 2018 wurde die Problematik von Kunststoffeinträgen in die Umwelt und die Größenordnung der Kunststoffemissionen für Deutschland dargestellt.¹ Insgesamt wurden ca. 70 Quellen für Mikroplastikemissionen identifiziert. Die (primären) Mikroplastikemissionen in Deutschland wurden auf 330 000 Tonnen pro Jahr geschätzt. Die Schätzungen zur Emission von Makroplastik (»Plastic Litter«) betragen 115 000 Tonnen pro Jahr. Die Menge an Mikroplastik in der Umwelt übersteigt somit die vielerorts sichtbare Menge an Makroplastik.

Die vorliegende Veröffentlichung hat zum Ziel, die Ergebnisse aus dem Jahr 2018 für den Bereich der **Kunststoffemissionen in landwirtschaftlichen Böden** fortzuschreiben, zu vertiefen und den aktuellen Wissensstand darzustellen. Dabei sollen bestehende Wissenslücken aufgezeigt und der Bedarf für insbesondere empirische Untersuchungen benannt werden. Soweit möglich werden Handlungsmaßnahmen abgeleitet.

In vielen Fällen greifen die Autor*innen auf Expertenmeinungen oder eigene Annahmen und Schätzungen zurück. Der vorliegende Bericht kann somit nur einen ersten, nicht endgültigen Überblick über die Kunststoffemission in landwirtschaftlich genutzte Böden geben. Um der Unsicherheit Rechnung zu tragen, wurden Spannbreiten angegeben. Diese sind nicht empirischer Art, sondern stellen selbst eine Einschätzung auf Basis einer Vielzahl von Daten dar. Weiterhin wurden die für die Abschätzungen verwendeten Daten einer Bewertung mit einer Pedigree-Matrix unterzogen. Dies soll bei der vertiefenden Analyse helfen, die Unsicherheit einzelner Daten zu identifizieren und besser einschätzen zu können.

Zukünftige Untersuchungen der Autor*innen dieser Studie und zahlreichen weiteren Beteiligten werden zunehmend detailliertere und genauere Abschätzungen liefern. Die Nutzung der Ergebnisse des vorliegenden Berichts für weitere Publikationen, politische Debatten oder regulatorische Maßnahmen sollte diesen Umstand angemessen berücksichtigen.

Dieser Bericht gibt – trotz der Unsicherheiten bei der Datenlage – einen wichtigen ersten Überblick über die Dimension der Kunststoffeinträge durch die Landwirtschaft und in landwirtschaftliche Böden. Wir hoffen, dass er zu einer sachgemäßen

¹ Bertling, Bertling und Hamann (2018).

und problemadäquaten Diskussion sowie zur Ableitung von Maßnahmen zur Reduktion der Kunststoffemissionen beitragen kann.

1.1 Erklärung zu Finanzierung, Verantwortlichkeiten und Nutzungsbedingungen

Die Erstellung des vorliegenden Berichts wurde vom NABU e. V. beauftragt. Die zugrundeliegende Datenbasis wurde teilweise im Rahmen des Projekts gewonnen. Darüber hinaus wurden aber auch im erheblichen Umfang Ergebnisse der eigenen Vorlauforschung von Fraunhofer UMSICHT, der Konsortialstudie Mikroplastik in 2018 sowie des vom BMBF geförderten Verbundprojekts »Plastikbudget« verwendet.²

In der Formulierung dieses Berichts waren die Autor*innen frei; eine Einflussnahme durch den Auftraggeber, die befragten Organisationen oder andere Dritte fand nicht statt. Die Ergebnisse stellen nicht in jedem Fall die Sicht der beauftragenden Organisationen, der Ökopol GmbH oder des Fraunhofer-Instituts UMSICHT dar, sondern in erster Linie die Sichtweise der Autor*innen.

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt. Des Weiteren ist es unter einer Creative-Commons-Lizenz verfügbar (cc-by-nc-sa). Das Werk oder Teile davon dürfen für nicht kommerzielle Zwecke vervielfältigt, verbreitet und öffentlich zugänglich gemacht werden, sofern auf die Urhebenden (Autor*innen, Herausgebende) verwiesen wird. Im Falle einer Verbreitung sind die gleichen Lizenzbedingungen, unter welche dieses Werk fällt, anzuwenden. Jede kommerzielle Verwertung ohne schriftliche Genehmigung der Autor*innen ist unzulässig. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in Systeme(n) der elektronischen Datenverarbeitung.

² BMBF-Förderkennzeichen: 01UP1702A

2 Verzeichnisse

2.1 Abbildungen

| | | |
|---------|---|-----|
| Abb. 01 | Untersuchungsgegenstand und Systemgrenze für die vorliegende Studie..... | 19 |
| Abb. 02 | Verteilung der Flächennutzung in Deutschland | 21 |
| Abb. 03 | Flächenanteile und -strukturierung der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland nach Kulturen | 22 |
| Abb. 04 | Mengenanteile des landwirtschaftlichen Verbrauchs verschiedener thermo- oder duroplastischer Kunststofftypen | 26 |
| Abb. 05 | Prozentualer Anteil von Verbleib und erfasstem Abfall in Bezug auf die jährliche Verbrauchsmenge an Kunststoffen 2019 | 27 |
| Abb. 06 | Kunststoffemissionen nach Anwendungen..... | 29 |
| Abb. 07 | Anteil primärer, sekundärer, intendierter und nicht-intendierter Kunststoffeinträge | 30 |
| Abb. 08 | Kunststoffeinträge pro Fläche in [kg/ha] unterschieden nach Quelle | 35 |
| Abb. 09 | Kunststoffkonzentration im Boden über die Zeit in Abhängigkeit der spezifischen Flächeneinträge | 50 |
| Abb. 10 | Folieneinsatz bei der Silage | 60 |
| Abb. 11 | Mögliche Freisetzungsmechanismen für Folien, Netze und Garne..... | 62 |
| Abb. 12 | Folien im Pflanzenbau | 69 |
| Abb. 13 | Beispiele für die (Abfall-)Sammlung von Bahnenware..... | 78 |
| Abb. 14 | Pflanztöpfe, Trays, Multizellplatten und Presstöpfe, Growbag | 86 |
| Abb. 15 | Schnellbinder und Bindedraht, Klammern, Baumschutz | 93 |
| Abb. 16 | Flächeneinträge von Kunststoff nach Kulturtyp | 102 |
| Abb. 17 | Entwicklung der Kunststoffanteile in gütegesicherten Komposten und Gärresten) | 123 |
| Abb. 18 | Stoffstrombild zu Kunststoff-Litter..... | 144 |
| Abb. 19 | Stoffstrombild zum Transfer der Kunststoff-Litter-Einträge und Abschätzungen zur resultierenden Flächenbelastung in die Landwirtschaft..... | 146 |
| Abb. 20 | Emittierte Mengen nach Anwendungstyp | 148 |

2.2 Tabellen

| | | |
|---------|---|----|
| Tab. 01 | Statistik zu Kunststoffen: Verarbeitung, Verbrauch und Abfallaufkommen in den Jahren 2013 bis 2019 in Deutschland und im Agrarsektor | 23 |
| Tab. 02 | Eigene Schätzungen zum Kunststoffverbrauch nach Anwendungsgebieten auf Basis von Abfallmengendaten aus 2018 | 24 |
| Tab. 03 | Schätzungen zum gesamten Kunststoffverbrauch inklusive Elastomeren, Chemiefasern, Polymerlösungen und -dispersionen nach Werkstoffgruppen | 24 |
| Tab. 04 | In dieser Studie ermittelte Kunststoffverbräuche der Landwirtschaft als Basis für die Abschätzung der Emissionen | 28 |
| Tab. 05 | Kunststoffemissionen in landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland | 31 |
| Tab. 06 | Kunststoffeinträge absolut und pro Fläche in [kg/ha] unterschieden nach Quelle | 36 |
| Tab. 07 | Gehalte und Partikelkonzentrationen von Mikroplastik in Böden | 41 |
| Tab. 08 | Maßnahmenvorschläge zur Reduktion der Kunststoffemissionen | 55 |
| Tab. 09 | Qualitativer Vergleich und Abschätzung von Emissionsraten für Polymeremissionen aus der Futtermittelproduktion | 63 |
| Tab. 10 | Kunststoffverbrauch und -emissionen in Futtermittelproduktion und energetischer Biomassenutzung | 64 |
| Tab. 11 | Flächenbelegung mit Kunststoffen nach Kulturart | 66 |
| Tab. 12 | Kunststoffverbrauch bei der Pflanzenproduktion | 67 |
| Tab. 13 | Kunststofffolienmasse nach Art der Anwendung | 68 |
| Tab. 14 | Qualitativer Vergleich und Abschätzung der Freisetzungsraten zu den Kunststoffemissionen | 71 |
| Tab. 15 | Kunststoffemissionen nach Art der Anwendung in der Pflanzenproduktion | 72 |
| Tab. 16 | Vergleich der Daten der vorliegenden Studie mit denen von GVM (Verbrauchsmengen) und Eunomia (Verkaufsmenge) | 73 |
| Tab. 17 | Bahnenware (Folien, Vliese, Netze, Garne): Relevante Rechtsakte und rechtliche Anforderungen | 75 |
| Tab. 18 | Qualitative Abschätzung von Freisetzungsraten im Bereich Tröpfchenbewässerung | 82 |
| Tab. 19 | Kunststoffemissionen durch Tröpfchenbewässerungssysteme | 82 |

| | | |
|---------|--|-----|
| Tab. 20 | Verbrauch von Kunststoffen für Pflanzbehälter..... | 87 |
| Tab. 21 | Qualitative Abschätzung von Freisetzungsraten im Bereich Pflanzbehälter | 88 |
| Tab. 22 | Kunststoffemissionen durch die Verwendung von Pflanzbehältern | 89 |
| Tab. 23 | Jährlicher Kunststoffverbrauch für Pflanzhilfen..... | 92 |
| Tab. 24 | Qualitative Abschätzung von Freisetzungsraten im Bereich Pflanzhilfen. | 94 |
| Tab. 25 | Kunststoffemissionen durch die Verwendung von Pflanzhilfern | 95 |
| Tab. 26 | Relevante Rechtsakte und rechtliche Anforderungen für Bewässerungssysteme, Pflanzbehälter und -hilfen..... | 96 |
| Tab. 27 | Kunststoffemissionen durch umhülltes Saatgut | 101 |
| Tab. 28 | Kunststoffemissionen durch die Anwendung umhüllter Düngemittel ... | 104 |
| Tab. 29 | Kunststoffemissionen durch Bodenverbesserer | 106 |
| Tab. 30 | Kunststoffemissionen durch die Anwendung von CSP..... | 108 |
| Tab. 31 | Düngemittel: relevante Rechtsakte und rechtliche Anforderungen | 112 |
| Tab. 32 | Übersicht der relevanten RAL-Gütezeichen für Produkte mit intendierter Ausbringung | 115 |
| Tab. 33 | Mengen in der biologischen Abfallbehandlung in Deutschland 2017 (inkl. der gütegesicherten und landwirtschaftlich verwerten Mengen) . | 119 |
| Tab. 34 | Kunststoffemissionen durch Verwertung von Komposten und Gärresten..... | 125 |
| Tab. 35 | Bodenbezogene Verwertung von öffentlichen und industriellen Klärschlämmen in D (2010, 2016, 2018) | 126 |
| Tab. 36 | Landwirtschaftlich verwertete kommunale Klärschlämme im Jahr 2018 nach Bundesländern (Spalte 3 und 4 eigene Berechnungen) | 128 |
| Tab. 37 | Kunststoffeinträge und -anteile im Klärschlamm..... | 133 |
| Tab. 38 | Klärschlamm: relevanter Rechtsakt und rechtliche Anforderungen..... | 137 |
| Tab. 39 | Kunststoff-Litter: Abschätzung von Zimmerman et al. | 141 |
| Tab. 40 | Abschätzungen zu Kunststofflittering in Deutschland im Vergleich | 144 |
| Tab. 41 | Kunststoffverbrauch in der Landwirtschaft nach Anwendungsgebieten | 149 |
| Tab. 42 | Daten und Abschätzungen zum Kunststoffeinsatz bei der Futtermittelproduktion | 150 |
| Tab. 43 | Berechnung der Emissionen auf Basis der geschätzten Freisetzungsraten | 154 |

| | | |
|---------|--|-----|
| Tab. 44 | Berechnung von Folienmasse in Anwendung und Verbrauch pro Jahr im Gemüseanbau..... | 155 |
| Tab. 45 | Berechnung von Folienmasse in Anwendung und Verbrauch pro Jahr im Spargelanbau..... | 156 |
| Tab. 46 | Berechnung von Folienmasse in Anwendung und Verbrauch pro Jahr im Erdbeeranbau..... | 157 |
| Tab. 47 | Berechnung von Folienmasse in Anwendung und Verbrauch pro Jahr im Anbau von Strauchbeeren..... | 158 |
| Tab. 48 | Folienverbrauch nach Folientyp und Kultur..... | 159 |
| Tab. 49 | Freisetzung und Flächeneintrag nach Folientyp im Pflanzenbau..... | 160 |
| Tab. 50 | Freisetzung und Flächeneintrag bei umhülltem Saatgut..... | 161 |
| Tab. 51 | Pedigree-Matrix für Befragung/Meinung von Fachleuten..... | 163 |
| Tab. 52 | Pedigree-Matrix für Literatur und Internetquellen..... | 163 |
| Tab. 53 | Bewertung der Datenquellen..... | 164 |
| Tab. 54 | Zeitlinie des Inkrafttretens des ECHA-Beschränkungsvorschlags für Mikroplastik..... | 186 |
| Tab. 55 | Übersicht der relevanten Standards für Bahnenware..... | 188 |
| Tab. 56 | Normen zum Abbauverhalten biologisch abbaubarer Kunststoffe aus .. | 192 |
| Tab. 57 | Ergebnisse des biologischen Abbaus in unterschiedlichen Umweltmilieus..... | 197 |
| Tab. 58 | Teilnehmende Fachgespräch..... | 203 |
| Tab. 59 | Teilnehmende Expertenrunde im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme »Plastik in der Umwelt«..... | 203 |
| Tab. 60 | Im Rahmen der Studie telefonisch oder via Email konsultierte Experten | 204 |

2.3 Abkürzungen

| Abkürzung | Bedeutung |
|-----------|--|
| AbfKlärV | Abfallklärschlammverordnung |
| APE | Agriculture Plastics Environment |
| AS | Abwasserschlamm |
| BBodSchG | Bundesbodenschutzgesetz |
| BBodSchV | Bundesbodenschutzverordnung |
| BDE | Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft |
| BFH | Bundesfinanzhof |
| BGK | Bundesgütegemeinschaft Kompost |
| BHE | Bundesvereinigung Humus- und Erdenwirtschaft |
| BioAbfV | Bioabfallverordnung |
| BKV | Beteiligungs- und Kunststoffverwertungsgesellschaft |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BVL | Bundesministerium für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit |
| CSB | Chemischer Sauerstoffbedarf |
| CSP | Chemischer Phosphorbedarf |
| D | Deutschland |
| DLG | Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V. |
| DOC | Abnahme des gelösten organischen Kohlenstoffes |
| DS | Durchschnitt |
| DüMV | Düngemittelverordnung |
| DünG | Düngegesetz |
| DWA | Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall |
| ECHA | Europäische Chemikalienagentur |
| EiF | Entry into Force |
| EMEA | Wirtschaftsraum Europa (Europe, Middle-East, Africa) |
| EPDM | Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk |
| EPR | Erweiterte Produzentenverantwortung |
| ESA | European Seed Association |
| EVA | Ethylen-Vinylacetat-Copolymer |
| EW | Einwohnerwerte |
| FiBL | Forschungsinstitut für biologischen Landbau |
| FM | Frischmasse |
| FS | Frischsubstanz |
| FuE | Forschung und Entwicklung |
| GBB | Gütegemeinschaft Bodenverfestigung und Bodenverbesserung e. V. |

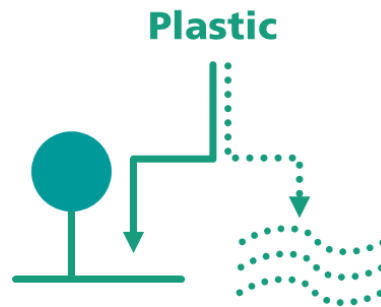
| | |
|------------------|--|
| GewAbfV/GewAbfVO | Gewerbeabfallverordnung |
| GFK | Glasfaserverstärkter Kunststoff |
| GKL | Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau e. V. |
| GKL | Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau |
| GVE | Großvieheinheit |
| GVM | Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung |
| HDPE | High-density Polyethylen |
| KrWG | Kreislaufwirtschaftsgesetz |
| KS | Klärschlamm |
| LAGA | Bund-Länderarbeitsgemeinschaft Abfall |
| LDPE | Low-density Polyethylen |
| lfdm | Laufender Meter |
| LUBW | Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg |
| LWK | Landwirtschaftskammer |
| NABU | Naturschutzbund Deutschland e.V. |
| NaWaRo | Nachwachsende Rohstoffe |
| NF | Nutzfläche |
| NR | Naturkautschuk |
| PA | Polyamid |
| PAK | Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe |
| PBAT | Polybutylenadipat-terephthalat |
| PBS | Polybutylensuccinat |
| PBSA | Polybutylensuccinat-co-adiapate |
| PBSe | Polybutylen-Sebacat |
| PBSeT | Polybutylen-Sebacat-cobutylen-terephthalat |
| PBST | Polybutylen-Succinaat-co-terephthalat |
| PC | Polycarbonat |
| PCB | Polychlorierte Biphenyle |
| PCL | Polycaprolactan |
| PE | Polyethylen |
| PET | Polyethylenterephthalat |
| PFOS | Polyfluorooctansulfonsäure |
| PHA | Polyhydroxyalkanoate |
| PHB | Polyhydroxybuttersäure |
| PHBHV | Poly(Hydroxybutyrade-co-Hydroxyvalerate) |
| PLA | Polylactic acid, Polymilchsäure |
| POP | Persistente organische Schadstoffe (Persistent Organic Pollutants) |

| | |
|-------------------|---|
| PP | Polypropylen |
| PPX | Strahlenvernetztes PP |
| PS | Polystyrol |
| PTFE | Polytetrafluorethylen |
| PU | Polyurethan |
| PUR | Polyurethan |
| PVC | Polyvinylchlorid |
| RAL | Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung |
| RAL-GZ | RAL-Gütezeichen |
| RAL-UZ | RAL-Umweltzeichen |
| REACH | Europäische Chemikalien-Verordnung (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) |
| SaatG | Saatgutverkehrsgesetz |
| SaatV | Saatgutverordnung |
| SBR | Styrol-Butadien-Kautschuk |
| ThCO ₂ | Theoretisch gebildete Kohlendioxidmenge |
| THG | Treibhausgas |
| ThOD | Theoretischer Sauerstoffbedarf |
| TM | Trockenmasse |
| TPE | Thermoplastische Elastomere |
| TPS | Thermoplastische Stärke |
| TPU | Thermoplastisches Polyurethan |
| TS | Trockensubstanz |
| USD | US-Dollar |
| UV | Ultraviolette Strahlung |

3 Zusammenfassung

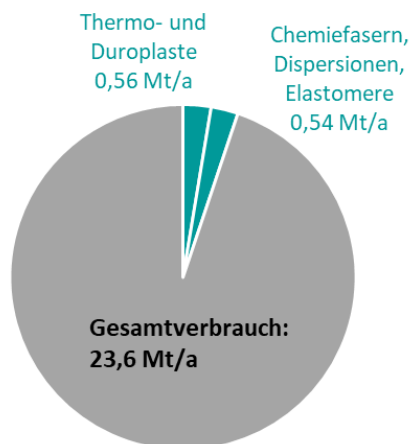
Im Folgenden sind die aus unserer Sicht 12 wichtige Ergebnisse dieser Studie in kurzer und prägnanter Weise zusammengefasst. Sie sollen die dringend notwendige Debatte im Umgang mit Kunststoffen intensivieren und erste Vorschläge zur Verringerung von Kunststoffemissionen in landwirtschaftliche Böden unterbreiten.

1 Bislang wurden terrestrische Ökosysteme in der Debatte um »Kunststoffe in der Umwelt« deutlich weniger betrachtet als aquatische Ökosysteme. Die vorliegende Studie bilanziert erstmals die wichtigsten Quellen und ihre Einträge in landwirtschaftliche Böden. Auch wenn die Zahlen mit Unsicherheiten behaftet sind, ergibt sich so eine erste Gesamtschau der aktuellen Lage.



2 Die deutsche Landwirtschaft verbraucht ca. 1,1 Millionen Tonnen Kunststoff pro Jahr (davon ca. 560.000 Tonnen Thermo- und Duroplaste und ca. 540.000 Tonnen Chemiefasern, Polymerdispersionen und Elastomere). Sie hat einen Anteil von 4,7 % am deutschen Gesamtverbrauch von 23,6 Millionen Tonnen pro Jahr.

Landwirtschaftlicher Verbrauch: 1,1 Mt/a

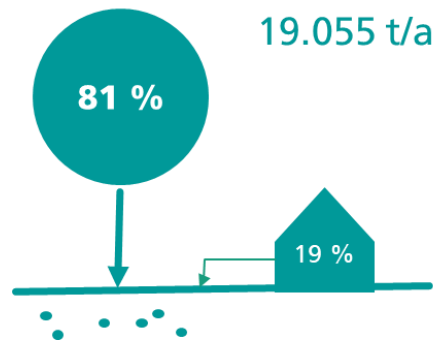


Beim Kunststoffverbrauch erreicht die Landwirtschaft einem Rezyklatanteil von ca. 37 %. Sie ist damit bei der Umsetzung einer Circular Economy anderen Kunststoffanwendungen deutlich voraus.

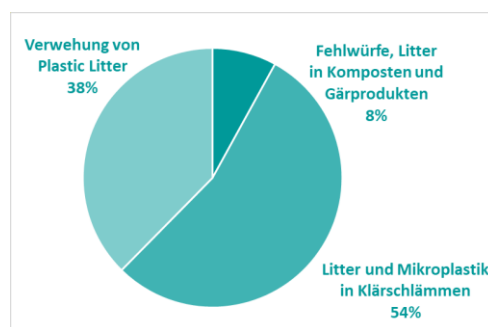
3 In einem durchschnittlichen landwirtschaftlichen Betrieb werden pro Jahr 4,3 Tonnen Kunststoff verbraucht. 2,3 Tonnen (53 % bezogen auf den Verbrauch) fallen als Abfall an. 2,0 Tonnen pro Jahr (47 %) werden nicht in den Kreislauf zurückgeführt. Der Verbleib dieser Menge ist bis heute nicht untersucht.



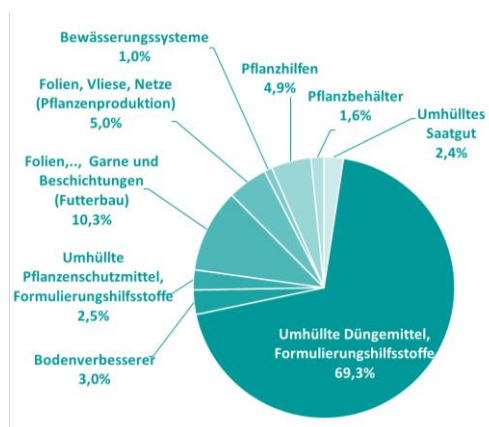
- 4 Insgesamt schätzen wir die Kunststoffemissionen in landwirtschaftliche Böden in Deutschland auf mindestens 19.055 Tonnen pro Jahr. 15.420 Tonnen pro Jahr (81 %) entstehen außerhalb der Landwirtschaft. 3.635 Tonnen pro Jahr (19 %) werden unmittelbar durch die Landwirtschaft verursacht.



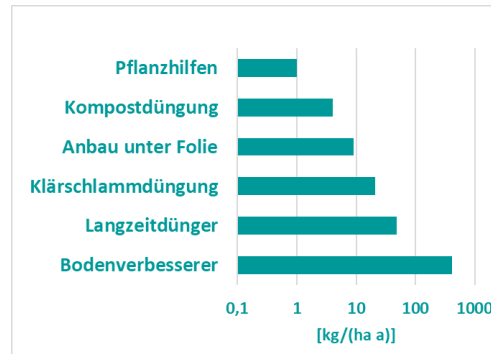
- 5 Die Emissionen, die außerhalb der Landwirtschaft entstehen, resultieren zu 54 % aus der Klärschlammausbringung, zu 38 % aus dem Littering Dritter und zu 8 % durch Kunststofffremdbestandteile in Komposten. Auch wenn die Emissionen außerhalb der Landwirtschaft verursacht werden, verantwortet die Landwirtschaft die Praktik, die zu ihrer Emission führt.



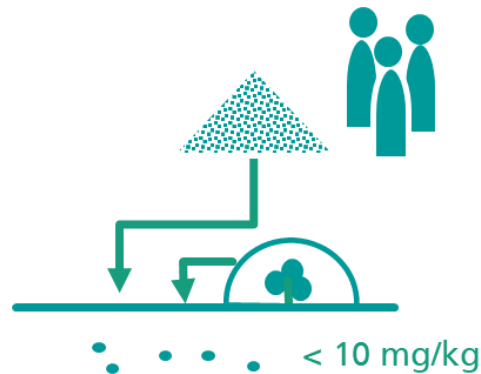
- 6 Die Emissionen, die die Landwirtschaft direkt verursacht, werden als Bestandteil von Düngemitteln (69,3 %), Bodenverbesserern (3,0 %), Pflanzenschutzmitteln (2,5 %) oder Saatgut (2,4 %) eingetragen oder sie entstehen durch Freisetzung von Kunststoffen im Futterbau (10,3 %) und Pflanzenbau (5,0 %), bei Pflanzhilfen (4,9 %) und Pflanzbehältern (1,6 %) sowie Bewässerungssystemen (1,0 %).



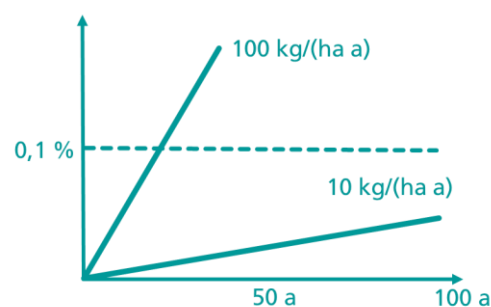
7 Bestimmte Praktiken in der Landwirtschaft führen zu besonders hohen Flächeneinträgen von mehr als 1 Kilogramm pro Hektar Anbaufläche und Jahr. Die Verwendung von Pflanzhilfen im Wein- und Gartenbau, die Düngung mit Kompost, der Anbau unter Folien, die Anwendung von Klärschlamm und Langzeitdünger sowie Bodenverbesserern in Form von Hydrogelen gehören dazu. Letztere erreichen Flächeneinträge von über 400 Kilogramm pro Hektar und Jahr.



8 Die wenigen experimentellen Forschungsarbeiten, die bislang Kunststoffe in Böden nachgewiesen haben, wurden zumeist außerhalb von Deutschland durchgeführt. Sie zeigen, dass vor allem Flächen in der Nähe dicht besiedelter Regionen, wo Klärschlamm und Folien in umweltoffenen Anwendungen eingesetzt werden, hohe Kunststoffkonzentrationen bis zu 10 Milligramm pro Kilogramm (Trockenmasse) aufweisen.

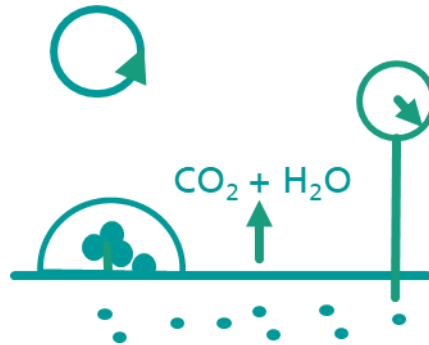


9 Wir gehen in Analogie zur Bewertung von Kompostqualitäten davon aus, dass ein Boden mit 0,1 Prozent Kunststoffen seinen wirtschaftlichen Wert verloren hat. Je nach landwirtschaftlicher Praxis kann es zu solch einer Entwertung in weniger als 20 Jahren bis hin zu einigen Hundert Jahren kommen. Die Tatsache, dass die Böden aber bereits heute verschmutzt sind und sich die Praktiken des Kunststoffeinsatzes fortwährend ausweiten, lassen die Annahme zu, dass die Entwertung eher schneller stattfindet.



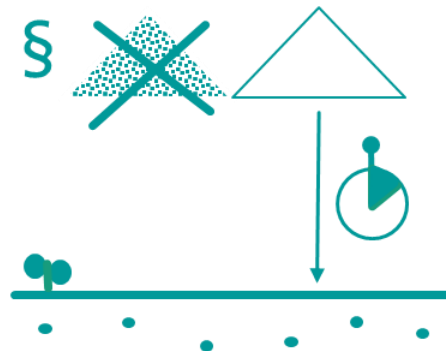
10 Zur Verringerung der Kunststoffemissionen bewerten wir folgende technische und anwendungsseitige Maßnahmen als prioritär:

- Stärkung des Recyclings bei allen Kunststoffanwendungen
- Sicherstellung einer ausreichenden anwendungsspezifischen Abbaubarkeit in allen umweltoffenen Anwendungen, in denen Verluste nicht ausreichend ausgeschlossen werden können.
- Entwicklung einer geeigneten und reproduzierbaren Messmethodik für Kunststoffe in Böden



11 Im Bereich der Regulierung sehen wir folgenden Bedarf:

- Herabsetzung der Grenz- und Schwellenwerte für Kunststoffe als Fremdstoffbestandteile
- Regulierung und Begrenzung der zulässigen Abbauezeiten für alle umweltoffenen Kunststoffanwendungen



12 Im Bereich der Landwirtschaft ist dringend eine Bildungsinitiative erforderlich, die von objektiver Seite über die Möglichkeiten und Pflichten bei Emissions- und Verbrauchsminderung sowie der Kreislaufführung der Kunststoffe informiert. Insbesondere sollte über alternative Praktiken für eine plastikemissionsfreie Landwirtschaft informiert werden.



4 Beschreibung und Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes

4.1 Motivation, Aufgabenstellung und Validität der Ergebnisse

Der Fokus in der Debatte um Kunststoffemissionen lag in den vergangenen Jahren vor allem auf den Mikro- und Makroplastikeinträgen in marine Gewässer. Letztere wurden vor allem in Form von Verpackungslittering problematisiert; zumeist mit einem Fokus auf die Situation in Asien. Die Einträge in Böden wurden demgegenüber eher vernachlässigt. Dies ist umso erstaunlicher, da Gionfra et al. in ihrer umweltpolitischen Studie aus dem Jahr 2018 erwartet, dass die Einträge in Böden das 4-fache bis 32-fache der Einträge in die Meere betragen.³

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden vor diesem Hintergrund die folgenden Arbeitspakete bearbeitet:

- Identifikation der Quellen von landwirtschaftlichen Kunststoffemissionen
- Quantifizierung der Eintragsmengen in die Böden soweit möglich nach Kunststofftypen aufgeschlüsselt
- Darstellung des Wissensstandes zu den möglichen umwelt- und humantoxikologischen Wirkungen
- Zusammenstellung und Bewertung der Ansätze zur Regulierung der Kunststoffeinträge in Böden
- Ableitung von Handlungsempfehlungen

Die Studie basiert vor allem auf der Auswertung verfügbarer Literatur, Befragungen von Expert*innen und eigenen Einschätzungen der Autor*innen. Aus Sicht der Autor*innen soll die Studie eine erste Übersicht zur Problematik geben. Die vielen offenen Fragen und Unsicherheiten, die im Resultat der Studie zurückbleiben, sollten als Ausgangspunkt und Anreiz für eine dringend notwendige experimentelle Forschung verstanden werden.

4.2 Systemgrenzen

Die vorliegende Studie adressiert einerseits die Freisetzung von Kunststoffen, die die Landwirtschaft in Deutschland verantwortet und andererseits Kunststoffeinträge in landwirtschaftliche Böden. Letztere entstehen nicht ausschließlich durch landwirtschaftliche Aktivität, sondern sind auch Folge des Eintrags aus Quellen von dritter Seite (Abb. 01). Beispiele dafür sind Einträge durch Littering, Klärschlamm, Komposte und Gärreste.

³ Gionfra (2018).

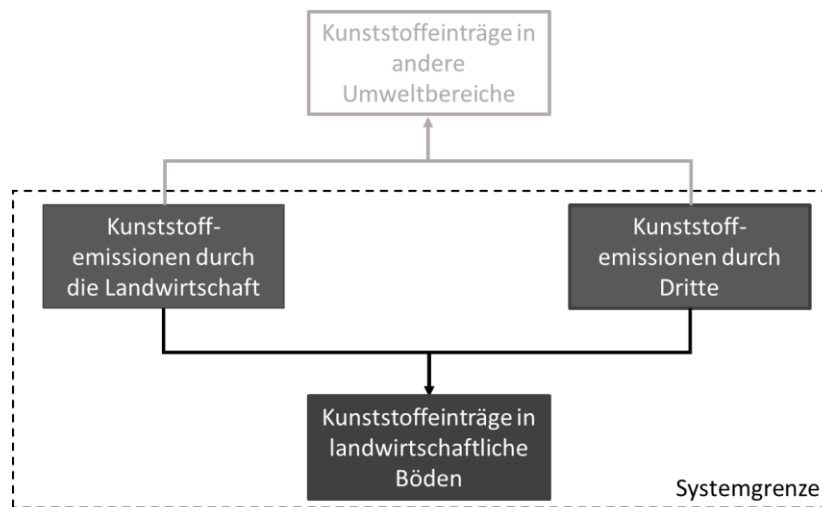


Abb. 01 Untersuchungsgegenstand und Systemgrenze für die vorliegende Studie

Es wurde dabei angenommen, dass die aus der Landwirtschaft stammenden Emissionen vollständig in landwirtschaftliche Böden gelangen. Ein Transfer der Kunststoffe von landwirtschaftlichen Flächen zu anderen Flächen (Gewässer-, Verkehrs- und Siedlungsfläche) durch Erosion o. Ä. sind nicht Gegenstand der Studie. Auch Clean-ups auf landwirtschaftlichen Flächen, die über die normale Sorge und Reinigungsarbeit in der Landwirtschaft hinausgehen, wurden nicht berücksichtigt.

4.3 Kunststoffe und Kunststoffemissionen

Unter Kunststoffen werden im Rahmen dieser Studie sämtliche bei Standardbedingungen⁴ festen synthetischen oder halbsynthetischen Polymere inklusive der ihnen zugesetzten Additive und Füllstoffe verstanden. Neben den Thermoplasten und Duroplasten, die häufig als Kunststoffe im engeren Sinne angesehen werden, werden somit auch Elastomere (Gummiwerkstoffe), Chemiefasern sowie Polymerdispersionen mitbetrachtet.

Für die Untersuchung spielt es dabei zunächst keine Rolle, ob die Polymere bio- oder fossilbasiert sind. Soweit recherchierbar, geben wir an, inwieweit eingesetzte Polymere und Kunststoffe abbaubar sind. Da aber nur für wenige Kunststoffe Abbaudaten unter realen Bedingungen in Böden vorliegen, werden auch abbaubare Polymere bei den Abschätzungen zu emittierten Mengen einbezogen. Natürliche Polymere ohne eigenschaftsverändernde chemische Modifikationen sind hingegen nicht Gegenstand der Studie.

Die Unterscheidung der Kunststoffemissionen in Mikro- und Makroplastik wird in der Studie nur gelegentlich verwendet. In den überwiegenden Fällen wird stattdessen von Kunststoffemissionen gesprochen, da aus Umweltperspektive bis heute keine belastbare Begründung vorliegt, warum Partikel kleiner oder größer als fünf Millimeter unterschiedlich behandelt werden sollten. Dies schließt natürlich nicht aus, dass es größenabhängige Effekte gibt, sondern stellt nur die weitgehend un begründete Grenzwertsetzung infrage.

Für eine weiterführende Beschäftigung mit relevanten Begriffen wird auf das Kompendium zu Kunststoffen in der Umwelt, das im Rahmen des entsprechenden BMBF-Förderschwerpunkts durch ein Autor*innenkollektiv erstellt wurde, verwiesen.⁵

4.4 Landwirtschaft und landwirtschaftlich genutzte Böden

Die im Rahmen dieser Studie untersuchten Bereiche der Landwirtschaft umfassen vor allem

- Pflanzenproduktion, insbesondere
- Ackerbau und
- Produktionsgartenbau (Gemüseanbau, Obstbau, Weinbau, Zierpflanzenproduktion und Baumschulen) sowie die
- Futtermittelproduktion.

Der Dienstleistungsgartenbau (Garten- und Landschaftsbau) sowie der Handel mit landwirtschaftlichen Erzeugnissen sind hingegen nicht Gegenstand der Studie. Auch die Tierproduktion im engeren Sinne wird nicht betrachtet (ausgenommen die in dieser Studie berücksichtigte Futtermittelproduktion), obwohl auch hier zahlreiche

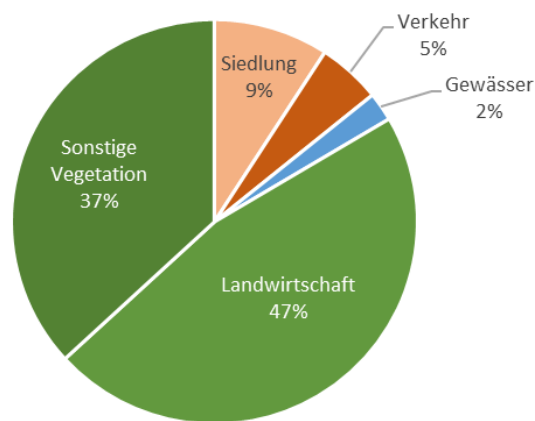
⁴ 0 °C, 1 bar (IUPAC 1982)

⁵ Bertling et al. (2021).

Arbeitsmittel und -hilfen heute aus Kunststoff hergestellt werden. Dieser Bereich sollte daher sinnvollerweise zukünftig in einer weiteren Studie untersucht werden.

Deutschland besitzt insgesamt eine Fläche von 36 Millionen Hektar, davon sind 30 Millionen Hektar Vegetationsflächen, von denen wiederum 16,7 Millionen Hektar bzw. 47 % landwirtschaftlich genutzt werden (Abb. 02). Diese Fläche nimmt aufgrund zunehmender Verkehrs- und Siedlungsfläche ab. Gleichzeitig sollten sonstige Vegetationsflächen wie Wälder, Gehölze, Heidelandschaften, Sümpfe und Moore aus Natur- und Umweltschutzgründen nicht weiter reduziert werden.⁶

Abb. 02 Verteilung der Flächennutzung in Deutschland



Mit der heute verfügbaren landwirtschaftlichen Nutzfläche erreicht Deutschland keine vollständige Selbstversorgung, während bei den wichtigsten Getreidesorten und bei Kartoffeln eine vollständige Selbstversorgung erreicht wird, ist Deutschland bei Ölsaaten, weiteren Getreidesorten sowie Gemüse und Obst deutlich unterversorgt.⁷ Berücksichtigt man, dass zukünftig zusätzliche Flächen für den Anbau energetischer Biomasse erforderlich wird und dass der Ökolandbau bei gleichen Erträgen größerer Flächen benötigt, wird klar, dass die landwirtschaftliche Nutzfläche eine wichtige und vor allem begrenzte Ressource darstellt.⁸ Der Landwirtschaft kommt damit eine besonders Verantwortung beim Erhalt dieser Ressource zu.

Der Flächenbedarf für verschiedene Kulturen ist sehr unterschiedlich. Den Großteil des Bedarfs machen Ackerland und Dauergrünland aus, während Obst, Gemüse, Hülsenfrüchte und einige andere Dauer- und Sonderkulturen nur einen kleinen Teil der Fläche beanspruchen (Abb. 03).

⁶ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaechen-boden-land-oekosysteme/boden/bodenversiegelung>, Zugriff am: 03.02.2021.

⁷ <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung-fischerei/versorgungsbilanzen/>, Zugriff am: 03.02.2021.

⁸ Industrieverband Agrar e.V. (2020).

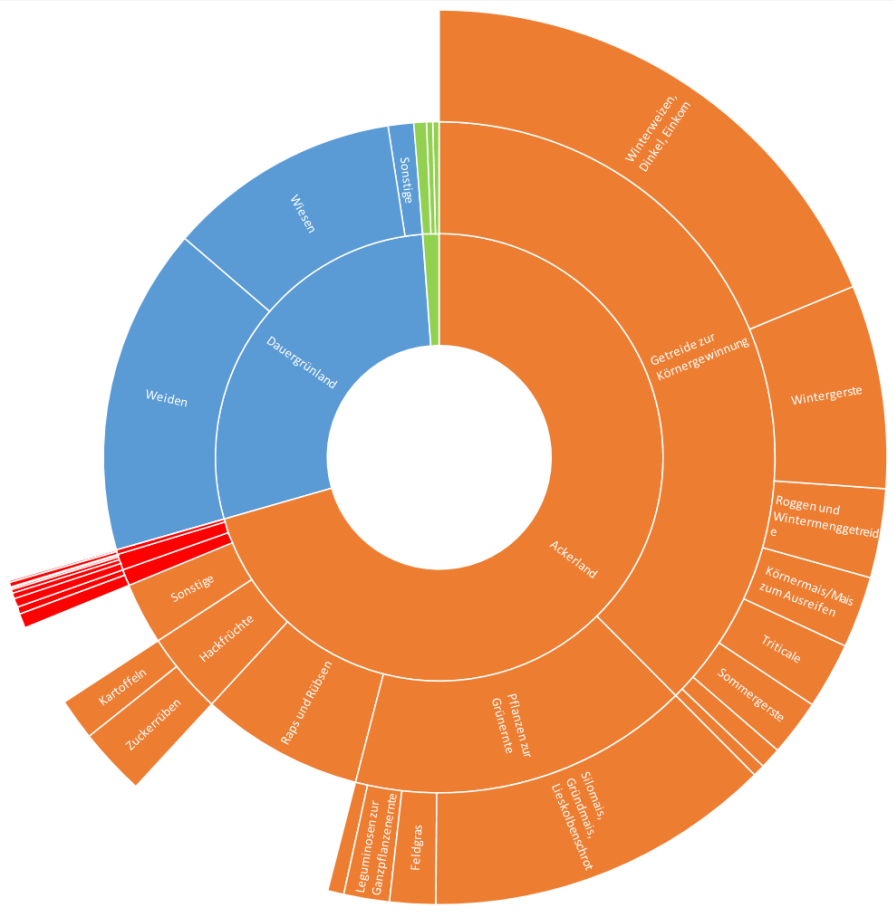


Abb. 03 Flächenanteile und -strukturierung der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland nach Kulturen (orange – Ackerlandkulturen, blau – Dauergrünland, grün – Dauer- und Sonderkulturen, rot – Gemüse, Hülsenfrüchte [eigene Darstellung auf Basis von Daten des Stat. Bundesamtes⁹])

⁹ Statistisches Bundesamt (2019b).

5 Gesamtbetrachtung

5.1 Kunststoffeinsatz in der Landwirtschaft

Weltweit wurden 2018 etwa 385 Millionen Tonnen Kunststoff (Thermoplaste, Duroplaste und Polyurethane) verarbeitet¹⁰, in Europa waren es im gleichen Zeitraum 51,2 Millionen Tonnen und in Deutschland 2019 14,2 Millionen Tonnen. Für Europa wird der Anteil der Agrarkunststoffe mit 3,4 % angegeben, für Deutschland war er mit 4,1 % (Verarbeitung) und 4,6 % (Endverbrauch) 2019 deutlich höher.^{11, 12, 13} Seit 2017 werden im Stoffstrombild für Kunststoffe in Deutschland neben dem Einsatz von Neuware auch die Rezyklate erfasst. Dadurch sind insbesondere die in der Landwirtschaft verarbeiteten und verbrauchten Mengen in den Statistiken deutlich gestiegen (Tab. 01).

Die Daten zeigen, dass sich die Landwirtschaft in Bezug auf die Realisierung einer Kreislaufwirtschaft im Vergleich zur Gesamtsituation bei den Kunststoffen positiv absetzt. Die Branche erreicht eine Rezyklateinsatzquote (Zirkularität) von 36,5 % (Kunststoffbranche insgesamt: 13,7 %, Bau: 23,3 %, Verpackung: 10,9 %, Fahrzeuge 5,5 %).

| Jahr | Verarbeitung | | | | Verbrauch | | | Abfallaufkommen | | |
|------|--------------|----------------|----------------|----------------------|--------------|----------------|------------|-----------------|----------------|------------|
| | gesamt | | Landwirtschaft | | gesamt | Landwirtschaft | | gesamt | Landwirtschaft | |
| | Menge [kt/a] | davon Rezyklat | Menge | Rezyklate [kt/a] [%] | Menge [kt/a] | Menge [kt/a] | Anteil [%] | Menge [kt/a] | Menge [kt/a] | Anteil [%] |
| 2013 | 11 755 | n. e. | 370 | n. e. n. e. | 9 685 | 400 | 4,2 | 4 747 | 248 | 5,2 |
| 2015 | 12 060 | n. e. | 375 | n. e. n. e. | 10 140 | 415 | 4,1 | 5 005 | 260 | 5,2 |
| 2017 | 14 370 | 1765 | 568 | 198 34,9 | 11 820 | 623 | 5,3 | 5 201 | 277 | 5,3 |
| 2019 | 14 235 | 1945 | 586 | 214 36,5 | 12 130 | 558 | 4,6 | 5 350 | 295 | 5,5 |

Tab. 01 Statistik zu Kunststoffen: Verarbeitung, Verbrauch und Abfallaufkommen in den Jahren 2013 bis 2019 in Deutschland und im Agrarsektor^{12, 14, 15, 16}

Eine detailliertere Aufschlüsselung der Agrarkunststoffe nach Anwendungsbereichen wurde bislang für Deutschland nicht veröffentlicht. Allerdings existieren auf europäischer Ebene Daten zur Herkunft von Kunststoffabfällen im Agrarsektor. Insgesamt fallen 1,51 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle an. Davon stammen 357 000

¹⁰ »Verbraucht« meint hier die Menge, die in die Kunststoffverarbeitung zu Produkten eingeht.

¹¹ Conversio (2020a).

¹² Conversio (2020b).

¹³ Plastics Europe (2019b).

¹⁴ Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (2014).

¹⁵ Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (2016).

¹⁶ Conversio (2018).

Tonnen aus der Pflanzenproduktion (Mulchfolien, Schutznetze, Bewässerungssysteme etc.), 413 000 Tonnen aus der Biomasseproduktion (Silofolien), 165 000 Tonnen aus Ausrüstungsgegenständen der Landwirtschaft sowie 677 000 Tonnen aus Gartenbau und Gartenarbeit (Pflanzbehälter, Pflanzhilfen, Deko-Artikel).¹⁷ Basierend auf diesen Daten und den typischen Verhältnissen von Verbrauchs- und Abfallmengen lässt sich die Mengenverteilung der verarbeiteten Agrarkunststoffe in Deutschland grob abschätzen (vgl. Tab. 02, Details siehe Anhang 9.1). In den Mengenangaben sind auch diejenigen Mengen enthalten, die zur Herstellung von Produkten für das private Gärtnern dienen.

| Anwendungsgebiete | Verarbeitete Kunststoffmengen [kt/a] |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Pflanzenbau | 92 |
| Futterbau und energ. Biomassennutzung | 106 |
| technische Produkte | 151 |
| gewerblicher und privater Gartenbau | 209 |
| Landwirtschaft - gesamt | 558 |

Tab. 02 Eigene Schätzungen zum Kunststoffverbrauch nach Anwendungsgebieten auf Basis von Abfallmengen Daten aus 2018¹⁷

Die bisher genannten Mengen umfassen thermoplastische und duroplastische Kunststoffe sowie Polyurethane. Chemiefasern, Elastomere, Polymerlösungen und -dispersionen sind in den Mengendaten nicht enthalten. Aus einer umweltorientierten Sichtweise sollten sie in die Gesamtbetrachtung einbezogen werden. Für Deutschland ergibt sich ein Gesamtkunststoffverbrauch (alle Untergruppen umfassend) von ca. 23,6 Millionen Tonnen. Der rezyklierte Anteil beträgt 2,2 Millionen Tonnen, entsprechend 9,3 % (Tab. 03).

| Kunststoff – Untergruppen | Verbrauch ¹⁸ | | | | Recyclat-anteil [%] |
|---|-------------------------|------------------|---------------|------------|---------------------|
| | Neuware [Mt/a] | Rezyklate [Mt/a] | Gesamt [Mt/a] | Anteil [%] | |
| Thermo-/Duroplaste, Polyurethan ¹⁹ | 12,3 | 1,9 | 14,2 | 60,2 | 13,4 |
| Elastomere ²⁰ | 0,62 | 0,24 | 0,86 | 3,6 | 27,9 |
| Chemiefasern ^{21, 22} | 0,54 | 0,06 | 0,60 | 2,5 | 10,0 |
| Polymerdispersion ¹⁹ | 7,9 | n. b. | 7,9 | 33,4 | ~ 0 |
| Kunststoffe – gesamt | 21,4 | 2,2 | 23,6 | 100 | 9,3 |

Tab. 03 Schätzungen zum gesamten Kunststoffverbrauch inklusive Elastomeren, Chemiefasern, Polymerlösungen und -dispersionen nach Werkstoffgruppen

¹⁷ Auskunft: Christoph Lindner, Conversio; Email vom 6.12.2019.

¹⁸ Im Wesentlichen sind hier die Verbrauchsmengen für die Verarbeitung zu Endprodukten zusammengestellt; die Mengen im Endverbrauch sind nicht bekannt. Bei den Polymerdispersionen sind statt der Mengen für die Verarbeitung die Produktionsmengen angegeben.

¹⁹ Conversio (2020b).

²⁰ Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie (2020).

²¹ <https://www.ivc-ev.de/de/chemiefaserproduktion-nach-regionen-balkendiagramm>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

²² https://universal_lexikon.deacademic.com/309237/Textilien%3A_Recycling_und_Entsorgung, letzter Zugriff am 3.02.2021.

Elastomere dienen bspw. dem Verschleißschutz beim Transport von Schüttgütern und zur Abdichtung in Bewässerungsanlagen und an Gewächshäusern. Chemiefasern werden in der Landwirtschaft für Vliese, Netze und Geotextilien eingesetzt. Polymere in Form von Lösungen und Dispersionen werden bspw. in Farben, Lacken, Klebern, Beschichtungen etc. auch in der Landwirtschaft verwendet. Unter der Annahme, dass sich die Verbrauchssituation in der Landwirtschaft in den verschiedenen Werkstoffgruppen ähnlich darstellt wie im Bereich thermo-/duroplastischer Kunststoffe, lässt sich für 2019 ein jährlicher Verbrauch von insgesamt ca. 1,1 Millionen Tonnen Kunststoff für die deutsche Landwirtschaft abschätzen.

Typische Anwendungen für Kunststoffe in der Landwirtschaft sind:

- Gewächshäuser und -tunnel
- Mulchen und Schutzsysteme im Pflanzenbau
- Silage im Futterbau
- Bewässerungssysteme
- Pflanztöpfe, -container und -hilfen
- Erntekisten
- technische und logistische Ausrüstungen in landwirtschaftlichen Betrieben

In diesen Bereichen kommen vor allem Folien und Formkörper aus Kunststoff zum Einsatz. Darüber hinaus werden Kunststoffe aber auch für Beschichtungen von Silos, Dichtungen in Gewächshäusern, Verschleißschutz von Erntemaschinen, Coating von Saatgut, als Dünger oder Additiv in Pflanzenschutzmitteln eingesetzt.

Der umfassende Einsatz von Kunststoffen in der Landwirtschaft wird vor allem mit Ertragssteigerungen, qualitativ höherwertigen Lebensmitteln und geringeren ökologischen Belastungen begründet.²³ Durch Foliengewächshäuser werden die Anbau- und Erntezeiten ausgeweitet und die Verschmutzung von Gemüse verringert. Die Bedarfe an Wasser, Düngemitteln und Pestiziden sollen durch Kunststoffe reduziert werden.

Es kommt eine große Bandbreite an Kunststoffen zum Einsatz. Im Bereich Thermoplaste, Duroplaste und Polyurethane dominieren aber die Standardpolymere deutlich (Abb. 04). Polyolefine (PP, PE) sind mit einem Anteil von 67 % die wichtigsten Kunststoffe vor den Vinylpolymeren (PVC und PS) mit 12 %. Nichtsdestotrotz sind auch andere Polymere mit 21 % relevant. Während die Polyolefine vor allem in den Massenprodukten (Folien, Pflanztöpfe) ihren Einsatz finden, werden die sonstigen Polymere, zu denen vor allem technische Polymere wie Polyamide oder Polyurethane gehören, in den landwirtschaftlichen Maschinen und Ausrüstungen verwendet.

²³ Plastics Europe (2019a).

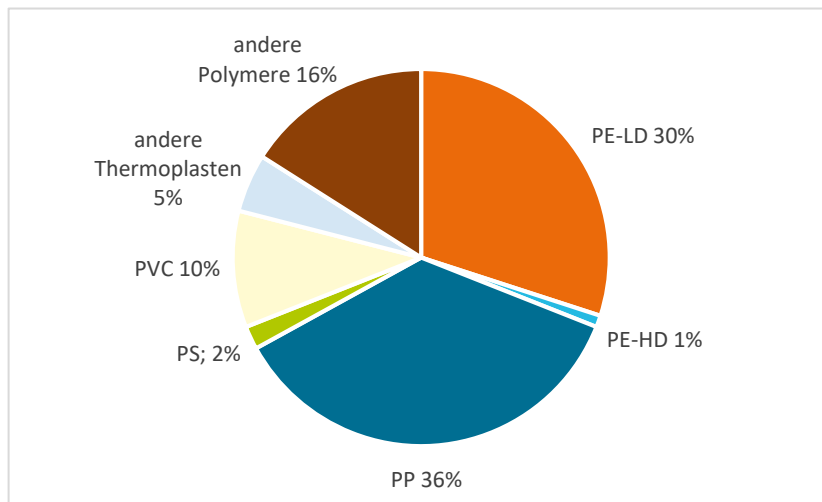


Abb. 04 Mengenanteile des landwirtschaftlichen Verbrauchs verschiedener thermo- oder duroplastischer Kunststofftypen [eigene Darstellung, basierend auf Daten von Plastics Europe²⁴]

In einer stationären Kreislaufwirtschaft mit konstantem Materialverbrauch und ohne Emissionen sollten die verbrauchten und als Abfall erfassten Mengen gleich sein. Von diesem Zustand ist die Kunststoffbranche weit entfernt. Die folgenden Aussagen beziehen sich ausschließlich auf Thermoplaste, Duroplaste und Polyurethane, da nur hier entsprechende Daten vorliegen. Die erfasste Abfallmenge erreicht insgesamt eine Quote von 40 % (Abb. 05). Das heißt: 60 % verbleiben noch in der Anwendung im anthropogenen Lager, werden nach einer ersten inländischen Nutzungsphase exportiert oder gehen als Emission verloren. Ein Großteil der Differenz ist mit langlebigen Produkten in einem wachsenden Markt zu erklären. Bei einer angenommen mittleren Nutzungsdauer von 10 Jahren und einem durchschnittlichen jährlichen Marktwachstum von 3 % würde bspw. das Abfallaufkommen allein aus diesem Grund um 25 % hinter der Verbrauchsmenge zurückbleiben. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt, wenn die Werte kurzlebiger Kunststoffanwendungen im Verpackungssektor (< 1 Jahr) und langzeitiger Anwendungen im Bausektor (> 40 Jahre) verglichen werden. Während der Verpackungssektor eine Abfallerfassungsquote von 98 % erreicht, sind es in der Baubranche 18 % (Abb. 05).

Im Bereich der Landwirtschaft liegt die Abfallerfassungsquote bei 53 % bzw. die Verbleibsquote bei 47 %. Bezogen auf die Verbrauchsmenge von 558 000 Tonnen pro Jahr ergibt sich eine Verbleibsmenge von 263 000 Tonnen pro Jahr.²⁵ Bei ca. 270 000 landwirtschaftlichen Betrieben in Deutschland²⁶ bedeutet dies, dass jedes Jahr etwa eine zusätzliche Tonne Kunststoff entweder genutzt oder ungenutzt im Betrieb akkumuliert oder mit den Produkten verkauft²⁷ bzw. als Emission verloren geht. Erweitert man dies auf die insgesamt in der Landwirtschaft genutzten Kunststoffe (inkl. Chemiefasern, Elastomere und Polymerdispersionen) und nimmt die

²⁴ Plastics Europe (2019b).

²⁵ Conversio (2020b).

²⁶ Statistisches Bundesamt (2019b).

²⁷ Hier sind keine Verpackungen gemeint, da diese getrennt bei den Verpackungen erfasst werden. Es könnte sich aber bspw. um nicht lizenzierte oderum nicht als Verpackung dienende Blumentöpfe und Pflanzhilfen handeln, die als Bestandteil des Produktes verkauft werden.

gleiche Quote von Abfall und Verbleib an, dürfte diese Menge sogar bei etwa zwei Tonnen pro Jahr liegen.

Unter der Annahme, dass ein Landwirtschaftsbetrieb mit seinen Produkten keinen Kunststoff abgibt und ein linearer Anstieg der verbleibenden Kunststoffmenge über die letzten 50 Jahre erfolgt ist, ergäbe sich eine akkumulierte Menge von durchschnittlich ca. 50 Tonnen Kunststoff pro Betrieb. Legt man diese Menge auf die durchschnittliche landwirtschaftliche Nutzfläche um, wären dies ca. 800 Kilogramm pro Hektar. Vor diesem Hintergrund wäre eine empirische Bestandsaufnahme zum Kunststoffverbleib in der Landwirtschaft durchaus sinnvoll.

Bis heute gibt es kaum eine Möglichkeit, die Wege der Kunststoffe in und nach der Nutzungsphase quantitativ zu erfassen. Aus einer Makrobilanz der Kunststoffe lassen sich demnach auch kaum belastbare Aussagen zu den emittierten Mengen ableiten. Nichtsdestotrotz wird deutlich, dass die Mengen an Kunststoffen in den landwirtschaftlichen Betrieben zunehmen und sich damit auch das Potenzial für Emissionen (durch Alterung, Verwitterung etc.) erhöht.

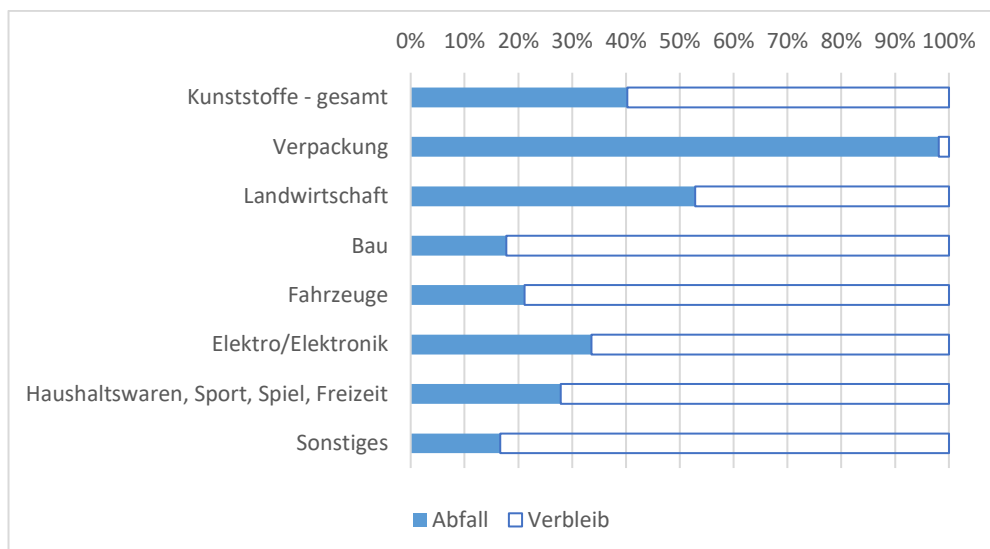


Abb. 05 Prozentualer Anteil von Verbleib und erfasstem Abfall in Bezug auf die jährliche Verbrauchsmenge²⁸ an Kunststoffen 2019 [Eigene Darstellung]

5.2 Übersicht zu landwirtschaftlichen Kunststoffemissionen in Deutschland

Da aus einer Makrobilanz nicht auf Kunststoffemissionen geschlossen werden kann, wurde in der vorliegenden Studie das Ziel verfolgt, die folgenden Anwendungsbereiche genauer zu analysieren:

- Folien, Netze und Vliese, Garne und Beschichtungen in den Bereichen
 - Pflanzenbau
 - Futterbau und energetische Biomassenutzung
- Bewässerungssysteme, Pflanztöpfe und Pflanzhilfen
- Saatgut, Düngemittel, Bodenverbesserer und Pflanzenschutz

²⁸ Conversio (2020b).

- Klärschlämme, Komposte und Wirtschaftsdünger
- Littering als externe Quelle

Im Wesentlichen wurde die Bestimmung der Kunststoffemissionen auf Basis von Verbrauchsdaten durchgeführt, die zum Teil offiziellen Statistiken entnommen werden konnten. Die zugrunde liegenden Verbrauchsmengen ergeben aufsummiert eine Masse von ca. 148 000 Tonnen Kunststoff (Tab. 04). Verglichen mit der für Deutschland insgesamt abgeschätzten Verbrauchsmenge von 1,1 Millionen Tonnen (vgl. Kap 5.1) werden demnach nur ca. 13,5 % der Kunststoffverbräuche berücksichtigt. Auch wenn die in dieser Studie berücksichtigten Quellen von offensichtlichen Emissionsgefahren ausgehen, so ist doch wahrscheinlich, dass eine zukünftige vollständige Analyse die Verbrauchsmengen und damit die Emissionen nach oben korrigieren wird.

| Anwendung/Quelle | Verbrauchsmenge für Kunststoffe in der Landwirtschaft [t/a] |
|---|---|
| Umhülltes Saatgut | 87 |
| Umhüllte Düngemittel, Formulierungshilfsstoffe | 2 520 |
| Bodenverbesserer | 110 |
| Umhüllte Pflanzenschutzmittel, Formulierungshilfsstoffe | 90 |
| Folien, Vliese, Netze, Garne und Beschichtungen (Futterbau) | 58 743 |
| Folien, Vliese, Netze (Pflanzenproduktion) | 16 008 |
| Bewässerungssysteme | 19 500 |
| Pflanzhilfen | 6 185 |
| Pflanzbehälter | 45 360 |
| Gesamt | 148 603 |

Tab. 04 In dieser Studie ermittelte Kunststoffverbräuche der Landwirtschaft als Basis für die Abschätzung der Emissionen

Für die jeweiligen Freisetzungsraten konnte insbesondere bei Folien, Netzen, Bewässerungssystemen, Pflanzhilfen und -behältern nur Schätzungen durchgeführt werden. Es wurde versucht, solche Schätzungen anhand von generellen Betrachtungen zum Littering vorzunehmen. Entsprechende Ergebnisse sollten daher mit der gebotenen Vorsicht interpretiert und weitergenutzt werden. Bei bestimmten Anwendungen konnte ein vollständiger Übergang der Kunststoffe in die Böden angenommen werden (Saatgut, Düngemittel, Pflanzenschutzmittel, Bodenverbesserer, Klärschlamm und Kompost). Hier ist aber häufig die Höhe der Kunststofffrachten unklar, da es sich entweder um wenig offenbartes Rezeptur-Know-how der Unternehmen oder um komplexe Stoffströme handelt, deren Kunststoffgehalte bis heute nur ungenügend untersucht wurden. Die Details zu den Abschätzungen aus verschiedenen Anwendungsgebieten der Kunststoffe können den Kapitel 7 entnommen werden.

In Tab. 05 und Abb. 06 sind die absoluten Emissionen aus den verschiedenen Quellen dargestellt. Die Gesamtmenge der **Einträge in landwirtschaftliche Böden schätzen wir gemäß unserem aktuellen Erkenntnisstand auf ca. 19 055 Tonnen pro Jahr** (Spannbreite 10 400 bis 35 458). Es lassen sich vier größere Gruppen unterscheiden:

- Emissionen durch Formulierungshilfsstoffe für Saatgut, Düngemittel, Bodenverbesserer oder Pflanzenschutzmittel
- Emissionen durch die Anwendung von Kunststoffprodukten wie Folien, Vliese, Netze, Garne und Beschichtungen in der Pflanzenproduktion oder Futtermittelproduktion und durch die Anwendung von Bewässerungssystemen, Pflanzhilfen und Pflanzbehältern
- Emissionen durch die Ausbringung von Kompost, Gärresten und Klärschlämmen sowie
- Emissionen durch Plastic Litter seitens Dritter

Die Quellen lassen sich danach gruppieren, ob die Einträge in die landwirtschaftlichen Böden durch die Landwirtschaft direkt stattfinden (primäre Einträge, hellrote und dunkelrote Säulen) oder ob der Grund für die Einträge vorgelagert ist (sekundäre Einträge, hellgrüne und dunkelgrüne Säulen).

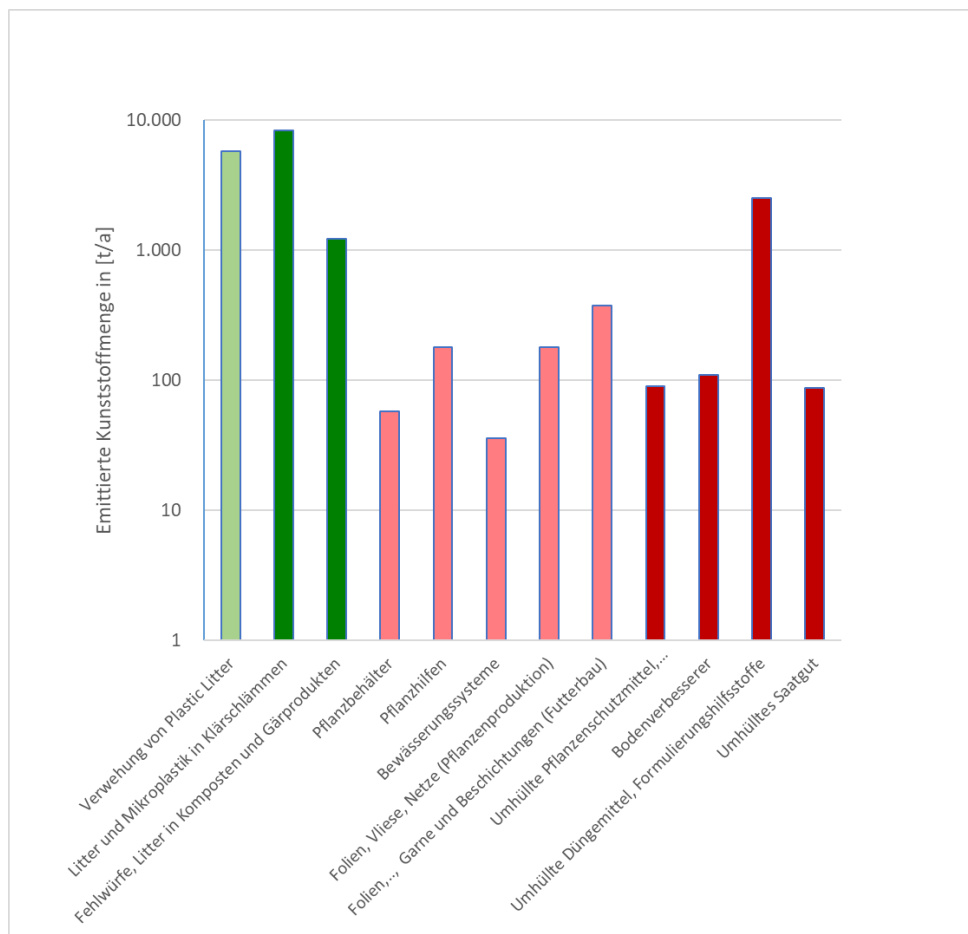


Abb. 06 Kunststoffemissionen nach Anwendungen (nicht-logarithmische Darstellung siehe Anhang 9.1)

Im Weiteren kann noch unterschieden werden, ob der Verbleib der Kunststoffe enthaltenden Stoffströme in den Böden seitens der Landwirtschaft intendiert ist oder nicht. Die Darstellung in Abb. 07 zeigt, dass vor allem die sekundären, intendierten Einträge (Klärschlamm und Kompost) zu hohen Kunststoffemissionen führen (51 %). Es folgen sekundäre, nicht-intendierte Einträge (30 %); dabei handelt es sich um das Littering seitens Dritter. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Landwirtschaft aus einer gesamtbilanziellen Sichtweise im größeren Umfang unter Kunststoffeinträgen Dritter (81 %) leidet, als sie selber verursacht (19 %). Nichtsdestotrotz ist der Großteil der Stoffeinträge seitens der Landwirtschaft intendiert (66 %) und die mit ihnen verbundenen Kunststofffrachten werden seitens der Landwirtschaft zumindest in Kauf genommen.

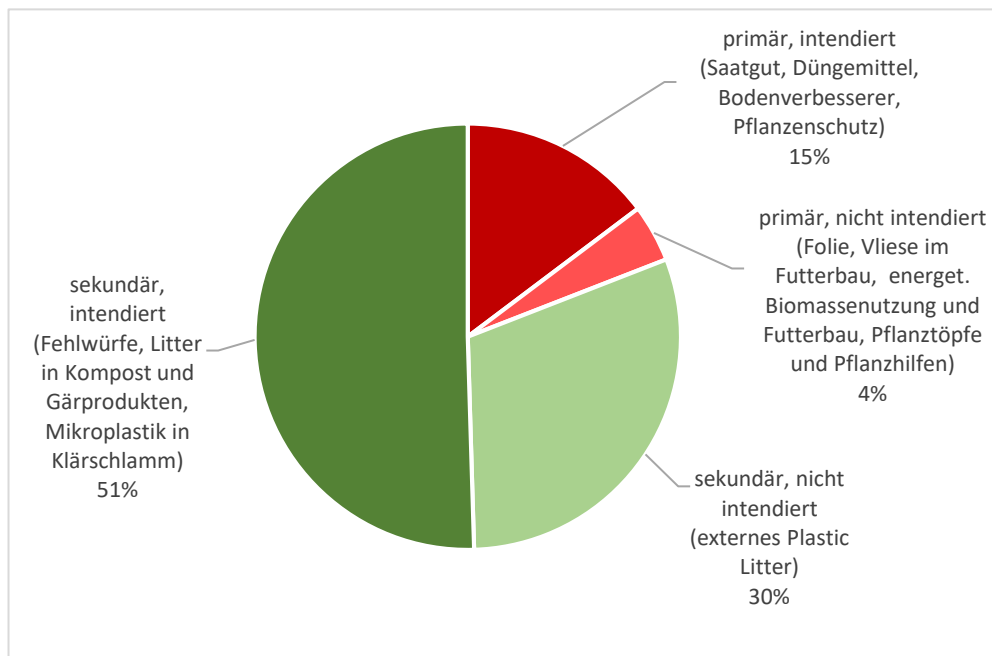


Abb. 07 Anteil primärer, sekundärer, intendierter und nicht-intendierter Kunststoffeinträge

In Tab. 05 sind die Anwendungen bzw. Quellen für die Emission, die zugrunde liegende Verbrauchsmenge, die vorwiegende Art der Freisetzung und die emittierte Kunststoffmenge zusammengefasst. Weiterhin werden relevante Kulturtypen und die wichtigsten Polymere dargestellt. Die detaillierten Analysen und Berechnungen finden sich in Kapitel 7.

| Anwendung/Quelle | Verbrauchsmenge an Kunststoffen für die Landwirtschaft [t/a] | Vorwiegende Art der Freisetzung | Emittierte Kunststoffmenge [t/a] | Wichtigste Kulturtypen | Wichtigste Polymere |
|---|--|-------------------------------------|----------------------------------|---|--|
| Primäre Einträge - intendiert | | | | | |
| Umhülltes Saatgut | 87 (33 - 130) | Herstellerformulierung, Ausbringung | 87 (33 - 130) | Weizen, Gerste, sonstiges Getreide, Mais, Hülsenfrüchte, Raps, Sonnenblumen, Zuckerrübe, Soja, Gemüse | Methyl- und Ethylcellulose, Polyethylenglykol, Chitosan, Gummi arabicum, carboxylierte Styrol-Butadien- oder Polyurethan-Dispersionen, Formaldehyd-Harnstoff-Harze, gelartige Polyacrylamide (Superabsorber) oder wasserlösliche Polyvinylalkohole |
| Umhüllte Düngemittel, Formulierungshilfsstoffe | 2 520 (720 - 5 400) | Herstellerformulierung, Ausbringung | 2 520 (720 - 5 400) | Raps, Mais, Weizen, Kartoffeln, Futtermittel, Gartenbau, Baumschulen, Zierpflanzenbau, | Polyurethane, Harnstoffharze, Polysulfone, Polyester, Polyacrylnitril |
| Bodenverbesserer | 110 (55 - 180) | Herstellerformulierung, Ausbringung | 110 (55 - 180) | Gartenbau, Erdbeeren, Gemüse, Spargel | Kalium-Polyacrylate, Natrium-Polyacrylat/Polyacrylamid, chem. modif. Polysaccharide |
| Umhüllte Pflanzenschutzmittel, Formulierungshilfsstoffe | 90 (25 - 150) | Herstellerformulierung, Ausbringung | 90 (25 - 150) | Nicht spezifiziert | Polyharnstoffe, Polyurethane, Aminoharze, Polyamide, Chitosan, Gelatine |
| Primäre Einträge – nicht intendiert | | | | | |
| Folien, Vliese, Netze, Garne und Beschichtungen | 75 836 (60.000 - 90.000) | s. u. | 556 (174 - 1578) | s. u. | |

Tab. 05 Kunststoffemissionen in landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland

| Anwendung/Quelle | Verbrauchsmenge an Kunststoffen für die Landwirtschaft [t/a] | Vorwiegende Art der Freisetzung | Emittierte Kunststoffmenge [t/a] | Wichtigste Kulturtypen | Wichtigste Polymere |
|--|--|--|----------------------------------|--|---|
| _davon in der Futtermittel- und energetischen Biomasseproduktion | 59 828 (48.000 - 70.000) | Littering, Schnittverluste, Abrieb und Witterungsverluste, Wildtiere und Vandalismus | 376 (118 - 1017) | Futterbau: Heu, Stroh, Gras- und Maissilage für Rind, Schaf, Ziege, Pferd | LDPE, HDPE, PP, Bitumen, Epoxidharz |
| _davon in der Pflanzenproduktion | 16 008 (12.000 - 20.000) | Bergungsverluste, Schnittverluste, Witterungsverluste, Wildtiere und Vandalismus | 180 (56 - 561) | Spargel, Erdbeeren, Gemüse, Strauchbeeren, Kern- und Steinobst | LDPE, HDPE, PP, PPX, PLA, TPS |
| Bewässerungssysteme | 19 500 | Bergungsverluste, Schnittverluste, Witterungsverluste, Wildtiere und Vandalismus | 36 (11 - 114) | Kartoffeln, Raps, Mais, Spargel, Erdbeeren, Gemüse, Strauchbeeren, Kern- und Steinobst | LDPE |
| Pflanztöpfe | 45 360 (33 570 - 57 150) | Littering, Witterungsverluste | 58 (18 - 182) | Wein-, Obstbau und Baumschulen, Gemüsebau, Forstwirtschaft | PP, PE zum Teil zu hohen Anteilen Rezyklate; im geringen Umfang Biokunststoffe wie PLA, TPS |
| Pflanzhilfen | 6 165 (4 245 - 8 790) | Littering, Schnittverluste, Witterungsverluste, Wildtiere | 179 (56 - 560) | Wein-, Obstbau und Baumschulen, Gemüsebau, Forstwirtschaft | PE, PP, duroplastische Harze, im geringen Umfang Biokunststoffe |
| Sekundäre Einträge – intendiert | | | | | |
| Fehlwürfe, Litter in Komposten und Gärprodukten | - | Ausbringung von Kompost, Gärresten zur Düngung | 1235 (617 - 1851) | | |

Tab. 05 Kunststoffemissionen in landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland

| Anwendung/Quelle | Verbrauchsmenge an Kunststoffen für die Landwirtschaft [t/a] | Vorwiegende Art der Freisetzung | Emittierte Kunststoffmenge [t/a] | Wichtigste Kulturtypen | Wichtigste Polymere |
|--|--|---|---|------------------------|---------------------|
| Litter und Mikroplastik in Klärschlämmen | | und Humusbildung Ausbringung von - Klärschlamm zur Düngung | 8 385 (5 655 - 12 897) | | |
| Sekundäre Einträge – nicht intendiert | | | | | |
| Verwehung von Plastic Litter | - | | 5 800 (2 500 - 10 500) | | |
| Gesamt | | | 19 056 (10 040 - 35 458) | | |

Tab. 05 Kunststoffemissionen in landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland

5.3 Kunststoffeinträge in landwirtschaftliche Böden

Eine rein mengenmäßige Auswertung (wie im vorherigen Kapitel durchgeführt) würde übersehen, dass die Kunststoffeinträge je nach Anwendungsgebiet oder Kulturtyp auf sehr unterschiedlich großen Flächen stattfinden. In Abb. 08 und Tab. 06 sind die Einträge auf die jeweils relevanten Flächen bezogen. **Der durchschnittliche jährliche Eintrag liegt bei ca. 1,06 Kilogramm pro Hektar und Jahr.** Lokal sind deutlich höhere Einträge möglich, wie die folgende Auflistung verdeutlicht:

| | |
|---|-----------------|
| • Bodenverbesserer: | 407,4 kg/(ha a) |
| • Langzeitdünger (Intensivanwendung): | 47,6 kg/(ha a) |
| • Klärschlammdüngung: | 21,0 kg/(ha a) |
| • Langzeitdünger (bezogen auf gärtnerische Nutzfläche): | 11,0 kg/(ha a) |
| • Verluste Mulchfolie: | 9,1 kg/(ha a) |
| • Kompostdüngung (intensiv): | 7,0 kg/(ha a) |
| • Verluste Flachfolie (Spargel): | 3,6 kg/(ha a) |
| • Kompostdüngung (mittel): | 3,5 kg/(ha a) |
| • Verluste Bändchengewebe | 3,2 kg/(ha a) |

Auch in Bezug auf die Flächeneinträge stellt der Klärschlamm eine problematische Quelle dar. Diese wird allerdings noch von den Einträgen durch Bodenverbesserer und die Intensivanwendung von Langzeitdüngern übertroffen. Auch Kompostdüngungen führen zu überdurchschnittlichen Belastungen der Böden. Während die Nutzung von Folien für den Pflanzenbau bei der Betrachtung in absoluten Zahlen weniger relevant erscheint, führen insbesondere Mulch-, Thermo- und Lochfolien auf Flächen, auf denen sie Verwendung finden, zu vergleichsweise hohen Belastungen. Auch verschiedene Anwendungen von Kunststoffen auf derselben Fläche bspw. in Form von Folien, Bewässerungsschläuchen, Pflanzhilfen und Düngemitteln führen zu hohen Kunststoffgehalten.

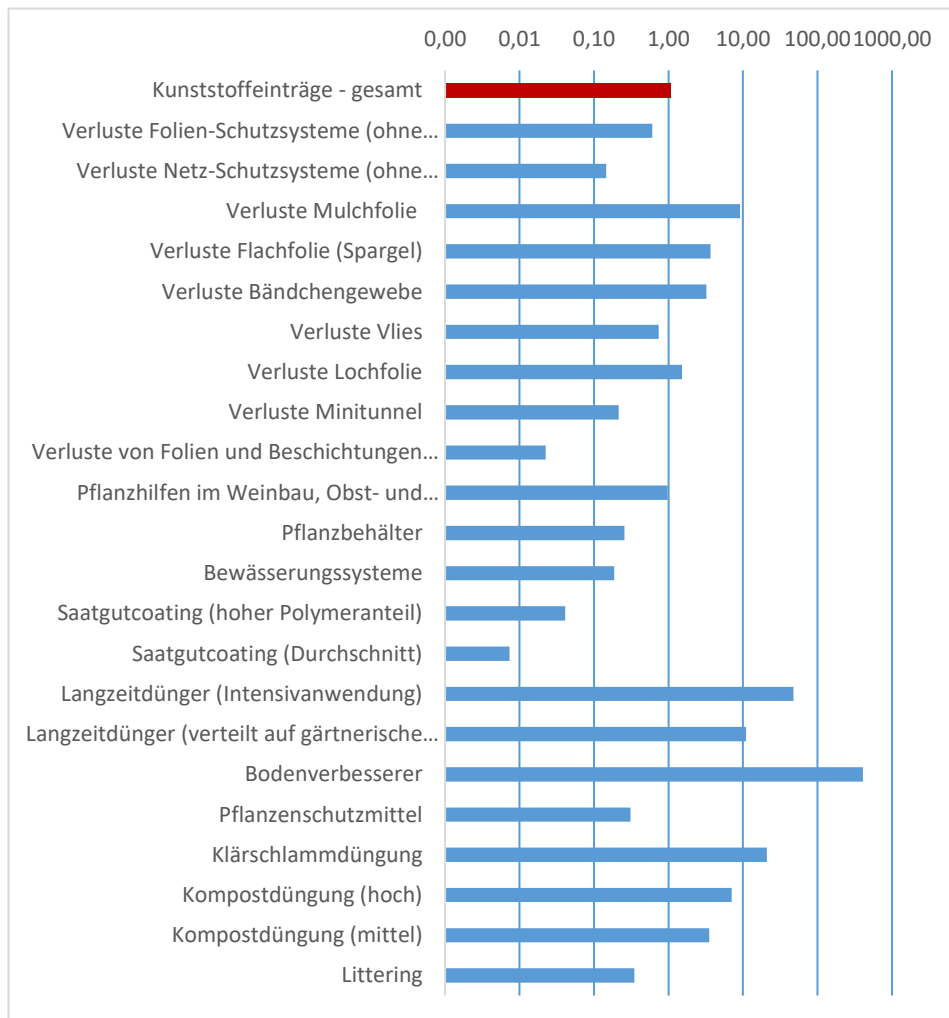


Abb. 08 Kunststoffeinträge pro Fläche in [kg/ha] unterschieden nach Quelle (zur Berechnung s. Tab. 06)

| Quelle | Relevante Fläche [ha] | Eintrag [t/a] | Flächenbelastung [kg/(ha a)] | Erläuterungen |
|---|-----------------------|---------------|------------------------------|--|
| Kunststoffeinträge - gesamt | 16 700 000 | 19 611 | 1,06 | |
| Verluste Folien-Schutzsysteme (ohne Netz) / Tunnel, Haus | 3 919 | 2,4 | 0,61 | Fläche ist identisch mit der Foli-enfläche ²⁹ |
| Verluste Netz-Schutzsysteme (ohne Folie) / Insekten, Vögel | 25 344 | 3,7 | 0,15 | Fläche ist identisch mit der Foli-enfläche ²⁹ |
| Verluste Mulchfolie | 5 935 | 54,1 | 9,12 | Fläche ist identisch mit der Foli-enfläche ²⁹ |
| Verluste Flachfolie (Spargel) | 26 281 | 95,9 | 3,65 | Fläche ist identisch mit der Foli-enfläche ²⁹ |
| Verluste Bändchenge-webe | 424 | 1,4 | 3,21 | Fläche ist identisch mit der Foli-enfläche ²⁹ |
| Verluste Vlies | 16 031 | 11,8 | 0,74 | Fläche ist identisch mit der Foli-enfläche ²⁹ |
| Verluste Lochfolie | 5 571 | 8,5 | 1,52 | Fläche ist identisch mit der Foli-enfläche ²⁹ |
| Verluste Minitunnel | 8 914 | 1,9 | 0,21 | Fläche ist identisch mit der Foli-enfläche ²⁹ |
| Verluste von Folien und Beschichtungen im Fut-terbau | 16 700 000 | 376,3 | 0,02 | gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche (Eintrag über Wirt-schaftsdünger (Mist, Gülle, Jau-che), oder direkt) ³⁰ |
| Pflanzhilfen | 185 000 | 179,2 | 0,97 | Wein, Obst- und Beerenbau, Baumschulen ³⁰ |
| Pflanzbehälter | 229 000 | 58,3 | 0,25 | Anbauflächen für Gemüse, Zierpflanzen, Kräuter, Beeren ³¹ |
| Bewässerungssysteme | 195 000 | 36,3 | 0,19 | bewässerte Flächen in D ^{32, 33} ; davon Anteil von 37,5 % für Tröpfchenbewässerung (ent-spricht Anteil der Betriebe mit Tropfenbewässerung; vgl. Kap. 7.2.1) |
| Saatgutcoating (hoher Polymeranteil) | | | 0,04 | Wert für Raps (vergleichsweise dicke Coatingschichten, vgl. Abb. 16) |
| Saatgutcoating (Durchschnitt) | 11 771 700 | 86,7 | 0,01 | Polymeremissionen durch Saat-gut bezogen auf die gesamte Ackerfläche in D ³⁰ |
| Langzeitdünger (Inten-sivanwendung) | | | 47,62 | Düngerbedarf im Gartenbau: 200 kg N ₂ /ha; N-Anteil: 20 %, Polymeranteil 5 % ³⁴ |
| Langzeitdünger (verteilt auf gesamte gärtnerische Nutzfläche) | 229 130 | 2 520,0 | 11,00 | Polymeremission durch Dünge-mittel bezogen auf die gärtnerische Nutzfläche im deutschen Gartenbau ³⁵ |
| Bodenverbesserer | 270 | 110,0 | 407,41 | 110 t/a; 270 ha; vgl. Kap. 7.3.3 |
| Pflanzenschutzmittel | 11 771 700 | 90,0 | 0,01 | Ackerfläche in D ³⁰ ; gleichmä-ßige Ausbringung |

Tab. 06 Kunststoffeinträge absolut und pro Fläche in [kg/ha] unterschieden nach Quelle

| | | | | |
|------------------------------|------------|---------|-------|--|
| Klärschlammdüngung | 430 000 | 8 385,0 | 20,96 | 0,28 Mt TM/a; 2,1 t (TM)/(ha a), vgl. Kapitel 7.4.2 |
| Kompostdüngung (hoch) | 123 500 | 1 235,0 | 7,02 | 1,76 Mt TM/a; 10 t TM/(ha x 3a) ³⁶ |
| Kompostdüngung (mit- tel) | 247 000 | 1 235,0 | 3,51 | 1,76 Mt TM/a; 7 t TM/(ha x 3a) ³⁶ |
| Littering | 16 700 000 | 5 800,0 | 0,35 | Vgl. Kap. 8 |

5.4 Kunststoffgehalte in Böden (Literaturübersicht)

Die Untersuchung von Kunststoffgehalten in verschiedenen Umweltkompartimenten ist wichtig, um die relevanten Transportpfade von der Quelle bis zur Senke zu beschreiben. Darauf aufbauend können verschiedenen Akteuren Verantwortung zugeschrieben und Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen vorgeschlagen werden. Die vorliegende Studie adressiert vor allem die Quellenseite. Dennoch soll in diesem Kapitel kurz der Stand des Wissens zur Situation bei den Senken - den Kunststoffgehalten in Böden - dargestellt werden.

Kunststoffe in Böden haben in der Vergangenheit nicht die gleiche Aufmerksamkeit erfahren, wie dies für die marine Umwelt der Fall ist.^{37, 38} Bisherige Studien sind aufgrund der methodischen und experimentellen Unterschiede nur schwer vergleichbar. Die komplexe Zusammensetzung der Bodenmatrix erschwert den analytischen Nachweis der Kunststoffe. Vor allem im Bereich des Mikroplastiks, bei dem eine visuelle Identifikation nicht möglich ist, fehlen noch belastbare Techniken für Probenahme, Extraktion, Reinigung und Bestimmung.³⁹ Insbesondere sehr feinteilige und chemisch heterogene Einträge wie Reifen- und Farbenabrieb, von denen große Mengen emittiert werden, wurden bislang kaum nachgewiesen.

Eine wichtige Quelle stellen Klärschlämme dar. Corradini et al. untersuchten in Chile 31 landwirtschaftlich genutzte Fläche (insgesamt 10 Quadratkilometer), auf denen Klärschlämme als Dünger genutzt wurden (durchschnittlich 40 Tonnen pro Hektar und Jahr).⁴⁰ Die Felder wurden je nach Häufigkeit der Düngung in Kategorien von 1 (eine Anwendung pro Jahr) bis 5 (fünf Anwendungen pro Jahr) eingeteilt. Von

²⁹ Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau e.V. (2020).

³⁰ Statistisches Bundesamt (2019b); Statistisches Bundesamt (2019d).

³¹ Statistisches Bundesamt (2019d).

³² Statistisches Bundesamt (2010).

³³ Statistisches Bundesamt (2017).

³⁴ <https://www.topagrar.com/heftplus/so-ermitteln-sie-den-duengebedarf-11581991.html>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

³⁵ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Obst-Gemuese-Gartenbau/Tabellen/gartenbau-2010-2016.html>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

³⁶ <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/boden/kompost.htm>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

³⁷ Rillig (2012).

³⁸ Rillig und Lehmann (2020).

³⁹ Möller, Löder und Laforsch (2020).

⁴⁰ Corradini et al. (2019).

jeder Fläche wurden drei Proben in 0 bis 25 Zentimetern Tiefe an zufällig bestimmten Orten genommen. Die Proben wurden getrocknet (40°C) und anschließend gesiebt (< 2 mm). Makropartikel > 2 Millimeter wurden händisch gezählt. Über eine Nassabscheidung (Flotation & Zentrifugierung) wurden die Kunststoffpartikel abgetrennt. Über optische Verfahren wurden geometrische Form, Farbe und Oberfläche der Partikel untersucht. Die Mikroplastik-Konzentration der Bodenproben reichte von 0,73 bis 10,3 Milligramm pro Kilogramm. Die Konzentration im reinen Klärschlamm lag bei 22,0 bis 53,0 Milligramm pro Kilogramm. Die Mikroplastikkonzentration war umso höher, je mehr Düngeanwendungen auf der Fläche durchgeführt wurden. 97 % der gefundenen Partikel im Boden waren Fasern.

Einen ähnlichen Zusammenhang zwischen Klärschlammaufbringung und Mikroplastikkonzentration zeigten Ljung et al. (2018).⁴¹ Untersucht wurden drei landwirtschaftliche Flächen in Schweden auf denen 1 bzw. 3 Tonnen Klärschlamm pro Hektar und Jahr ausgebracht wurden. Untersucht wurden Mikroplastikpartikel im Bereich 10 bis 500 µm, da für größere Teilchen zu geringe Konzentrationen vorlagen. Die Bodenproben wurden mittels Infrarotspektroskopie analysiert. Es wurden Mikroplastikkonzentrationen von 0,32 Milligramm pro Kilogramm (TM) für Böden mit einer Klärschlammfracht von 1 Tonne pro Hektar und Jahr bestimmt und 3,4 Milligramm bei Böden mit einer Fracht von 3 Tonnen pro Jahr. Van den Berg et al. (2020) fanden auf 16 landwirtschaftlich genutzten Flächen, auf denen Klärschlamm als Dünger eingesetzt wird, in 97 % aller Proben Mikroplastik.⁴² Die Anzahl der Teilchen war umso höher, je größer der Einsatz von Klärschlamm auf der Fläche war. In Proben, in denen Teilchen nachgewiesen wurden, wurden zwischen 500 und 8658 Mikroplastik-Partikel pro Kilogramm (TM) gefunden. Zhang and Liu (2018) untersuchten den Einsatz von Klärschlamm in China auf landwirtschaftlichen Flächen nahe eines Flusses bei denen jährlich bis zu 23 Tonnen Klärschlamm pro Hektar eingesetzt werden.⁴³ Die Anzahl der Partikel sowie deren Form wurden durch ein optisches Verfahren ermittelt. Die Konzentration an MP-Teilchen variierte von 7100 bis 42 960 Partikel pro Kilogramm. 95 % aller Partikel lagen im Größenbereich von 0,05 bis 1 Millimeter. 92 % aller gefundenen Partikel waren Fasern.

Die Ergebnisse aus den vier Studien sind nur wenig vergleichbar, da sie einmal als Masse und einmal als Partikelanzahl dargestellt wurden, auch die Bezugsgröße Trockenmasse oder Frischmasse variiert. Nichtsdestotrotz zeigen sie, dass die Größenordnung der Kunststoffemissionen bei Klärschlammaufbringung ähnlich sind und vor allem feinere Partikel dominieren, was nach dem Reinigungsprozess in der Kläranlage (Rechen, Sieb und Faulturm) naheliegend ist. Weiterhin werden vor allem Fasern gefunden. Es ist davon auszugehen, dass sämtliche Untersuchungen die Kunststoffemissionen eher unter- als überschätzen, da in der komplexen Matrix

⁴¹ Ljung, E., Olesen, K. B., Andersson, P. G., Fältström, E., Vollertsen, J., Wittgren, H. B., and Hagman, M. (2018).

⁴² van den Berg et al. (2020).

⁴³ Zhang et al. (2020).

kaum sämtliche Polymere widerspruchsfrei über visuelle oder spektroskopische Methoden identifizierbar sind.⁴⁴

Neben Klärschlämmen wurden auch landwirtschaftliche Flächen, auf denen Mulchfolien eingesetzt wurden, untersucht. Vor allem in China, wo besonders dünne Mulchfolien im großen Umfang eingesetzt werden, ist dies von besonderer Relevanz. Huang et al. (2020) untersuchten 384 Proben in 19 Provinzen, in denen seit mehreren Jahren Mulchfolien eingesetzt werden.⁴⁵ Die Mikroplastik-Konzentrationen waren umso höher, je länger auf der Fläche bereits Mulchfolien genutzt wurden. Bei Feldern, auf denen seit Jahren kontinuierlich Folien genutzt wurden, wurden Partikelkonzentrationen von $80,3 \pm 49,3$ (5 Jahre), $308,0 \pm 138,1$ (15 Jahre) und $1.075,6 \pm 346,8$ (24 Jahre) Partikel pro Kilogramm gemessen. Die Zusammensetzung der Partikel stimmte mit denen der Mulchfolie überein, was die Vermutung nahelegt, dass die Mulchfolien als Quelle von Mikroplastikemissionen fungieren. In einer weiteren Studie nahmen Zhou et al. (2020) 60 Bodenproben. Durch Infrarotspektroskopie bestimmten sie Mikroplastik-Konzentrationen von 263 bis 571 Partikeln pro Kilogramm gefunden.⁴⁶ Böden, auf denen Mulchfolien eingesetzt wurden, wiesen deutlich höhere Konzentrationen auf. Es wurden allerdings hauptsächlich Fasern gefunden, was nahelegt, dass vor allem Bändchengewebe zum Mulchen eingesetzt wurde. Die meisten Teilchen lagen im Größenbereich von 1-3 mm.

Liu et al. (2018) ermittelten Kunststoffgehalte an zwanzig Gemüsefeldern rund um Shanghai. Es wurden Partikelkonzentrationen von 2,11 bis 90,91 Partikel pro Kilogramm (TM) ermittelt.⁴⁷ Etwa 50% aller gefundenen Partikel waren kleiner als 1 mm. 50% der Partikel bestanden aus dem Kunststoff PP und 43% aus PE. Ding et al. (2020) berichten in ähnlichen Untersuchungen von höheren Partikelkonzentrationen (1430 bis 3410 Partikel pro Kilogramm TM).⁴⁸ Im Wesentlichen handelte es sich um Fasern. Inwieweit die von vielen Autoren berichtete Dominanz von Fasern mit der tatsächlichen Situation in den Böden korreliert oder ob die Fasern besser detektierbar sind, ist unbekannt. Zhang et al. (2018) bestimmten an 120 Proben die Partikelkonzentrationen. Sie fanden von 1,3 bis 14 712 Partikel pro Kilogramm (TM).⁴⁹ Die höchsten Konzentrationen wurden in Böden festgestellt, bei denen ein hoher Grad menschlicher Einflüsse vorliegt, z.B. touristische Nutzung. 60% der gefundenen Partikel waren kleiner als 1 mm.

Rezaei et al. (2019) führten im Iran erstmalig wichtige Untersuchungen zur Erosion von Mikroplastik in Böden durch. Untersucht wurde der Übergang von leichten Mikroplastikpartikeln aus natürlichen Böden in durch künstliche Winderosion erzeugte Sedimentablagerungen. Die Partikelkonzentrationen betragen in den land-

⁴⁴ Vgl. zum Nachweis von Reifenabrieb: <https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/index/index/docId/51086>; letzter Zugriff: 16.03.2021

⁴⁵ Huang et al. (2020).

⁴⁶ Zhou et al. (2020).

⁴⁷ Liu et al. (2018).

⁴⁸ Ding et al. (2020).

⁴⁹ Zhou et al. (2018).

wirtschaftlichen Böden im Schnitt 6,91 Milligramm pro Kilogramm. In den abgelagerten Sedimenten erreichte sie 20,27 mg/kg. Sie zeigten damit, dass ein bevorzugter äolischer Transport des Mikroplastiks stattfindet und es sich an bestimmten Stellen durch Erosion anreichern kann. Gleichzeitig wäre auch ein Übergang in die Oberflächengewässer denkbar. Die Autoren bestimmten auch erstmalig Erosionsraten für Mikroplastik. Entsprechende Untersuchungen sollten für Wind- und Niederschlagserosion für Deutschland durchgeführt werden.

Scheurer und Bigalke (2018) untersuchten 29 Flussauen in der Schweiz.⁵⁰ Die Proben wurden mittels Dichteabscheidung aufbereitet und durch Infrarotspektroskopie analysiert. Die gemessenen Mikroplastik-Konzentrationen im Boden lagen zwischen 0 und 800 Milligramm pro Kilogramm. In 90 % aller Proben wurde Mikroplastik nachgewiesen. Die höchsten Konzentrationen wurden für Partikelgrößen zwischen 2 und 5 Millimetern gefunden, was die Autoren auf Littering als Ursache zurückführen. Aber auch kleinere Partikel (< 500 Mikrometer) wurden in hohen Zahlen nachgewiesen. Als mögliche Ursache wurde der atmosphärische Transport von Mikroplastik genannt. Die Mikroplastik-Konzentration korreliert mit der Bevölkerungszahl im Einzugsgebiet der Flussaue. Dahl et al. (2021) untersuchten drei Seegrasweiden in Spanien an der mediterranen Küste. Es wurden Partikelmengen von 68 – 3.819 Teilchen pro kg TM gefunden. Im Gegensatz zu Scheurer und Bigalke vermuten sie intensiv betriebene Landwirtschaft als Quelle.

Chai et al. (2020) fanden an Flächen, auf denen Elektroschrott verarbeitet wurde, dass Mikroplastikeinträge bis zu 34 100 Partikel pro Kilogramm. Sie fanden vor allem technische Kunststoffe, die Schwermetallgehalte aufwiesen. Erstaunlicherweise ist der Kunststoffgehalt trotz der Art der Tätigkeit in gleicher Größenordnung wie auf landwirtschaftlichen Böden.

Huerta Lwanga et al. (2017) untersuchten die Mikroplastikgehalte in Böden und wiesen gleichzeitig den Transfer in der Nahrungskette nach. Die Partikelanzahl betrug $0,87 \pm 1,9$ Partikel pro Gramm im Boden, $14,8 \pm 28,8$ Partikel pro Gramm in den Ausscheidungen von Erdwürmern sowie $129,8 \pm 82,3$ in Hühnerkot. In den Innereien der Hühner sowie im Kropf konnten ebenfalls Mikro- und Makropartikel nachgewiesen werden.⁵¹ In Bezug auf die Studie ist zu erwähnen, dass die Mikroplastik-Gehalte auf den untersuchten Flächen als außergewöhnlich hoch einzustufen sind.

Für einen konventionell bewirtschafteten Acker im Südwesten Deutschlands, auf dem weder Klärschlammdüngung noch Folienanwendungen praktiziert wurden, fanden Möller et al. (2020) 206 Makroplastik-Partikel pro Hektar gefunden und $0,34 \pm 0,36$ Mikroplastik-Partikel pro Kilogramm (TM). Die dominierenden Polymertypen waren dabei Polyethylen, Polystyrol und Polypropylen. Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen in den Fasern dominierten fanden die Autoren vor allem Folien und Fragmente. Die ermittelten Werte könnten als Hintergrundbelastung interpretiert werden.⁵²

⁵⁰ Scheurer und Bigalke (2018).

⁵¹ Huerta Lwanga et al. (2017).

⁵² Möller, Löder und Laforsch (2020).

Die Werte aus den durchgeführten Untersuchungen sind in Tab. 07 zusammengestellt. Die gemessenen Partikelkonzentrationen auf unterschiedlich belasteten Böden schwanken von 0 bis 50 000 Partikel pro Kilogramm, die Gehalte von 0 bis 10 Milligramm pro Kilogramm (unter Vernachlässigung der Aufkonzentration durch Winderosion sowie einer Quelle, die in einer Einzelmessung Gehalte bis 800 Milligramm pro Kilogramm berichtete). Trotz aller Unsicherheit zeigen die Daten, dass sie nur noch ca. ein bis zwei Größenordnungen unterhalb der für Komposte und Gärreste in Standards und Verordnungen etablierten kritischen Fremdstoffgehalte für Folienkunststoffe von 0,1 Prozent liegen. Da ein Abbau der meisten Kunststoffe kaum stattfindet, die Rückgewinnung von Kunststoffen aus Böden technisch und ökologisch kaum machbar sein dürfte und der Einsatz von Kunststoffen in der Landwirtschaft erst seit wenigen Jahrzehnten betrieben und fortwährend ausgeweitet wird, weist dies auf eine besorgniserregende Entwicklung hin.

| Region/Quelle | Bodentyp | Gehalt (Anzahl oder Massen) | Polymertyp/Quelle |
|---------------------------|----------------------------|---|-----------------------------------|
| Deutschland ⁵³ | Acker | Makroplastik: 206 #/ha Mikroplastik: 0,34 ± 0,36 #/kg TM | Unbelastet (Hintergrundbelastung) |
| Chile ⁵⁴ | Acker | 0,73 - 10,3 mg/kg TM | Klärschlamm |
| Spanien ⁵⁵ | Acker | 0 - 8.658 #/kg | Klärschlamm |
| China ⁵⁶ | Acker | 7.100 - 42.960 #/kg TM | Klärschlamm |
| Schweden ⁵⁷ | Acker | 0,32 - 3,4 mg/kg TM | Klärschlamm |
| China ⁵⁸ | Acker | 31,0 - 1.422,4 #/kg TM | Mulchfolie |
| China ⁵⁹ | Acker | 263 - 571 #/kg | PP, PE, PVC, PET/Mulchfolie |
| Iran ⁶⁰ | Naturbelassene Böden/Acker | 6,91 - 20,27 mg/kg | Low density microplastic (LDMP) |
| China ⁶¹ | Acker | 2,11 – 90,91 #/kg | PP, PE/unbekannt |
| China ⁶² | Acker | 1.430 - 3.410 #/kg TM | PP, PE, PET, PVC/unbekannt |

Tab. 07 Gehalte und Partikelkonzentrationen von Mikroplastik in Böden

⁵³ Möller, Löder und Laforsch (2020).

⁵⁴ Corradini et al. 2019

⁵⁵ van den Berg et al. 2020

⁵⁶ Zhang und Liu 2018

⁵⁷ Ljung et al. 2018

⁵⁸ Huang et al. 2020

⁵⁹ Zhou et al. 2020

⁶⁰ Rezai et al. 2019

⁶¹ Liu et al. 2018

⁶² Ding et al. 2020

| | | | |
|-----------------------|------------------------|--|---|
| China ⁶³ | Küstenböden | 1,3 - 4.712,5 #/kg TM | LDPE, PP/unbekannt |
| Schweiz ⁶⁴ | Flussauen | 0 - 800 mg/kg | PP, PE, PVC, PS, PET, PUR, PA, ABS/ unbekannt |
| Spanien ⁶⁵ | Seegrasweiden | 68 - 3.819 #/kg TM | unbekannt |
| China ⁶⁶ | E-Schrott-Verarbeitung | 0 - 34.100 #/kg | unbekannt |
| Mexiko ⁶⁷ | Hausgarten | Boden : 0,87 ± 1,9 #/g TM , Wurmausscheidung: 14,8 ± 28,8 #/g (TM); Hühnerkot: 129,8 ± 82,3 #/g (TM) | Kunststoff aus Flaschen |

5.5 Wirkung von Kunststoffen in Böden (Literaturübersicht)

Der Forschungsstand zur Wirkung von Kunststoffen in Böden ist bis dato noch lückenhaft. Während die Wirkung auf Menschen sowie in aquatischen Ökosystemen seit Längerem intensiv erforscht wird,⁶⁸ ist die Wirkung von Mikroplastik in Böden bislang weniger gut untersucht.⁶⁹ Sie kann grob in die Wirkung auf physikalische und chemische Bodeneigenschaften sowie die Wirkung auf Bodenorganismen wie Mikroorganismen, Mesofauna, Makrofauna und Pflanzen eingeteilt werden. Darüber hinaus nehmen einzelne Studien eine Erd- und Ökosystemperspektive ein, welche die Auswirkungen von Mikroplastik auf die Biodiversität, evolutionäre Prozesse und Ökosystemdienstleistungen sowie auf globale Stoff- und Nährstoffkreisläufe in den Blick nimmt.⁷⁰ Im Folgenden wird ein Überblick über den derzeitigen Erkenntnisstand gegeben.

5.5.1 Mögliche Wirkung auf Bodenstruktur und -eigenschaften

Mikroplastik kann die physikalischen Eigenschaften von Böden beeinflussen, welche die Grundlage für die biologischen Bodeneigenschaften bilden⁷¹ und weitreichende Folgen für Ökosystemfunktionen haben und verschiedene Pflanzen-Boden-Interaktionen stören.⁷² Untersuchte Bodenparameter, die sich durch den Eintrag

⁶³ Zhang et al. 2018

⁶⁴ Scheurer und Bigalke 2018

⁶⁵ Dahl et al. 2021

⁶⁶ Chai et al. 2020

⁶⁷ Huerta Lwanga et al. (2017).

⁶⁸ Duis und Coors (2016); Eerkes-Medrano, Thompson und Aldridge (2015); Wright, Thompson und Galloway (2013); Anbumani und Kakkar (2018).

⁶⁹ Rillig et al. (2019).

⁷⁰ Rillig und Lehmann (2020).

⁷¹ Zhou et al. (2020).

⁷² Souza Machado et al. (2018).

von Mikroplastik nachweislich verändern können, beinhalten die Aggregatbildung, die Lagerungsdichte, das Porenvolumen sowie den Luft- und Wasserhaushalt.⁷³

Aufgrund seiner besonderen Beschaffenheit kann Mikroplastik sich mit Bodenpartikeln verbinden und verschiedene Aggregate formen.⁷⁴ Eine Veränderung der Aggregatstruktur kann vielfältige positive und/oder negative Veränderungen hervorrufen. So kann es zum Beispiel zu einer Veränderung in der Lagerungsdichte⁷⁵ und Bodendurchlüftung kommen, was zu einer Verringerung des Wasserhaltevermögens führen kann und Bodenwasserknappheit begünstigt. Wasserknappheit wiederum kann in der Folge den Transport von Schadstoffen durch Risse in tiefere Bodenschichten begünstigen.⁷⁶ Gleichzeitig kann Mikroplastik aber auch zu einer Verbesserung des Wasserhaltevermögens führen sowie die Verfügbarkeit von Nährstoffen erhöhen.⁷¹

Ein wesentlicher Faktor, der die Wirkung von Mikroplastik auf die physikalischen Eigenschaften von Böden beeinflusst, ist die Form und Größe der Kunststoffpartikel. Kunststofffasern beeinflussen die biophysikalischen Eigenschaften des Bodens deutlich stärker als Partikel⁷². Mikrofasern können die Bodendichte reduzieren und damit die Durchdringung mit Wurzeln und die Belüftung erleichtern. Folienfragmente hingegen begünstigen die Kanalbildung und damit den Wassertransport und führen zu stärkerer Verdunstung und Austrocknung der Böden.⁷⁷ Tüten und Folien können aber auch das Eindringen von Wasser in den Boden behindern und damit zu Wasserknappheit beitragen sowie durch starken Oberflächenabfluss Erosion begünstigen oder den Abbau von anderen Substanzen verhindern.⁷⁸

In der Diskussion um die Wirkung von Mikroplastik auf chemische Bodeneigenschaften stehen insbesondere Additive sowie die Funktion von Mikroplastik als Vehikel für Schadstoffe im Vordergrund. Additive können im Zeitverlauf ausgewaschen werden.⁷⁹ Ilyas et al. (2018) heben in ihrer Review-Studie potenzielle Gefahren von möglichen Additiven wie Nonylphenol, polychlorierte Biphenyle und organische Pestizide wie Bisphenol A, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Dichlordiphenyltrichlorethan und polybromierte Diphenylether hervor.⁸⁰ Über die Wirkung auf Bodenenzyme können diese Stoffe auch auf Nährstoffkreisläufe wie zum Beispiel den Stickstoffkreislauf Einfluss nehmen.⁸¹ Besondere Beachtung finden zudem chlorhaltige Kunststoffe wie PVC. In hohen Konzentrationen können diese eine Veränderung der chemischen Bodenbeschaffenheit herbeiführen.⁸²

⁷³ Rillig (2012); Wu et al. (2019); Boots, Russell und Green (2019); Souza Machado et al. (2018)..

⁷⁴ Leifheit und Rillig (2020).

⁷⁵ Entspricht der Bodendichte.

⁷⁶ Zhou et al. (2020); Rillig et al. (2019).

⁷⁷ Rillig et al. (2019).

⁷⁸ Ilyas et al. (2018).

⁷⁹ Zhang et al. (2019).

⁸⁰ Ilyas et al. (2018).

⁸¹ Zhou et al. (2020).

⁸² Souza Machado et al. (2018); Ilyas et al. (2018).

Über die Rolle von Mikroplastik bezüglich des Transports von Schadstoffen herrscht Unklarheit. Für aquatische Ökosysteme zeigen Studien, dass Mikroplastik auf der Oberfläche Schadstoffe mit bestimmten Eigenschaften (z. B. Hydrophobie) akkumulieren. An Mikroplastik gebundene Schadstoffe wie POPs, Pestizide oder Antibiotika können aufgrund der großen inneren Oberfläche des Bodens einfach adsorbiert werden.⁸³ Daher geht man davon aus, dass Mikroplastik den Transport von Schadstoffen in den Boden erhöhen kann.⁸⁴ Es ist denkbar, dass die Wirkung als Vektor für Schadstoffe deutlich stärker ausgeprägt ist als im aquatischen Milieu. Fest steht aber auch, dass die Sorption und Desorption von Substanzen von vielen Faktoren beeinflusst wird, wie beispielsweise der Art des Kunststoffes und der Dichte, sodass diesbezüglich weiterer Forschungsbedarf besteht.⁸⁵

5.5.2 Mögliche Wirkung auf Bodenorganismen

Der Eintrag von Mikroplastik kann Bodenorganismen auf verschiedene Weise beeinflussen. Aus ökotoxikologischer Sicht können Mikroplastikpartikel direkt und indirekt auf Organismen einwirken: durch physikalische und chemische Schäden an Geweben und Membranen, die von den Partikeln selbst ausgehen (direkte Toxizität) sowie indirekt durch den Transport von partikelgebundenen Schadstoffen.⁸⁶

Die toxische Wirkung hängt neben anderen Faktoren insbesondere von der Größe der Partikel, der Art des Kunststoffes, der spezifischen Sensitivität der Lebewesen und der vorliegenden Konzentration ab.⁸⁵ Je kleiner die Mikroplastikpartikel sind, desto mehr verschiebt sich die Wirkung von einer physischen hin zu einer chemisch/toxischen.⁸⁷

Studien zeigen, dass Mikroplastik in einer Größe von 1 µm bis 500 µm eine negative Wirkung auf Tiere (Meso- und Makrofauna) haben kann und dass Partikel, die kleiner als 6 µm sind, Pflanzen beeinflussen können. Nanopartikel (50 bis 100 nm) können die Zellwände von Pilzen passieren⁸⁸ sowie durch die Wurzeln von Pflanzen aufgenommen werden.⁸⁹ Versuchsergebnisse legen zudem nahe, dass große Kunststoffpartikel eine geringere letale Toxizität für Bodenorganismen aufweisen als kleinere Partikel.⁹⁰

Bezüglich der Wirkung von Mikroplastik auf Boden-Mikroorganismen haben bisherige Studien insbesondere die Wirkung auf Enzymaktivitäten im Boden untersucht.⁹¹ Die Ergebnisse zeigen, dass die Wirkung in Abhängigkeit von der Art des Kunststoffes sehr unterschiedlich ausfallen kann. PE, PA und PET erhöhten die Stoffwechselaktivitäten von Mikroorganismen in Versuchen. Die Anwesenheit von PVC

⁸³ Leifheit und Rillig (2020); Zhou et al. (2020).

⁸⁴ Duis und Coors (2016); Wu et al. (2019); Rillig et al. (2019).

⁸⁵ Zhang et al. (2019).

⁸⁶ UBA (2020); Souza Machado et al. (2018).

⁸⁷ Rillig et al. (2019).

⁸⁸ Zhang et al. (2019).

⁸⁹ Rillig et al. (2019).

⁹⁰ Souza Machado et al. (2018); Zhou et al. (2020).

⁹¹ Zhou et al. (2020).

und PE hingegen hatte einen negativen Effekt auf den Artenreichtum an Mikroorganismen.⁹¹

Pochron et al. untersuchten in einem ökotoxikologischen Experiment die Wirkung von Altreifenabrieb auf Mikroorganismen und Erdwürmer.⁹² In Bezug auf Mikroorganismen stellten sie keine Veränderung der Stoffwechselaktivitäten fest.

Muroio et al. untersuchten den Einfluss von biologisch abbaubarem Polybutylen-Adipat-Coterephtalat (PBAT) auf Mikroorganismen in Böden.⁹³ Sie fanden heraus, dass sich die Pilzflora sowohl in der Nähe der Kunststofffragmente als auch im übrigen Boden deutlich änderte. Im Gegensatz dazu war der Einfluss auf Bodenbakterien eher gering. Insbesondere solche Bakterien, von denen bekannt ist, dass sie das Pflanzenwachstum positiv beeinflussen, wurden nicht negativ beeinflusst.

Andere experimentelle Studien zur Wirkung von auf Feldern aufgebrauchten Kunststofffolien auf Mikroorganismen haben festgestellt, dass die Biomasse an Mikroorganismen, die Enzymaktivität und die funktionale Diversität mit ansteigendem Anteil an Folienresten sank.⁹⁴

Zhou et al. heben zudem hervor, dass Veränderungen der physikalischen Bodenbeschaffenheit durch Mikroplastik, wie zum Beispiel der Aggregatstruktur und des Porenvolumens, die evolutionäre Richtung von Mikroben verändern kann und sich sogar neue ökologische Nischen formen können. So kann beispielsweise die Oberfläche von Mikroplastik als ein zuvor nicht da gewesenes Habitat für Mikroorganismen fungieren. Erkenntnisse aus Studien zur Wirkung von Mikroplastik in aquatischen Ökosystemen legen außerdem nahe, dass Mikroplastik auch als Vektor für Pathogene im Boden in Frage kommt und somit zum Transport von Mikroben und Krankheiten beiträgt. Der Eintrag von Mikroplastik in Böden übt so evolutionären Druck aus und kann zu einer potenziellen Veränderung in ökologischen Gemeinschaften führen.⁹¹

Die Wirkung von Mikroplastik auf größere Bodenorganismen wurde insbesondere an Erdwürmern⁹⁵ und zu einem geringeren Ausmaß an Springschwänzen⁹⁶ untersucht. Beide Arten stehen in wechselseitiger Beziehung zu Mikroplastik. Sie tragen zur Produktion an sekundärem Mikroplastik bei sowie auch zu dessen Verteilung im Boden. Erdwürmer zerkleinern Mikroplastik in ihren Kaumägen und verteilen ihn in ihren Gängen. Auch Mesofauna wie Springschwänze und Milben und Makrofauna wie Maulwürfe und andere grabende Säugetiere tragen auf ähnliche Weise zu Zerkleinerung und Verteilung im Boden bei.⁹⁷ Es wird vermutet, dass dadurch die Bioverfügbarkeit von Mikroplastik erhöht wird.⁹⁶

⁹² Pochron et al. (2017).

⁹³ Muroio et al. (2016).

⁹⁴ Ng et al. (2018).

⁹⁵ Zhou et al. (2020).

⁹⁶ Boots, Russell und Green (2019).

⁹⁷ Rillig (2012).

Weitere experimentelle Untersuchungen an Erdwürmern haben gezeigt, dass Mikroplastik von Bodenorganismen aufgenommen werden kann und ihre Vitalität beeinflusst.⁹⁵ Der Verzehr von Mikroplastik führt zu einer sinkenden Verfügbarkeit von Nährstoffen und Energie und erhöht ihre Sterblichkeit.⁹⁸ Diese Ergebnisse decken sich auch mit Untersuchungen von aquatischen Organismen. Duis und Coors haben im Rahmen einer Untersuchung an Copepoden, Amphipoden, Strandkrabben und Muscheln festgestellt, dass diese Mikroplastik aufnehmen und meist rasch (innerhalb weniger Stunden oder Tage) wieder ausscheiden.⁹⁹ In Laboruntersuchungen wurde jedoch gezeigt, dass die Aufnahme großer Mengen von Mikroplastik zu einer geringeren Nahrungsaufnahme und folglich zu einer Verringerung der Energiereserven und Auswirkungen auf andere physiologische Funktionen führt.

Boots et al. stellten eine geringere Biomasse von Erdwürmern (*Aporrectodea rosea*) fest, wenn sie Mikroplastik aus verschiedenen Kunststoffarten ausgesetzt waren. Der Effekt war am stärksten unter der Zugabe von HDPE.⁹⁶ Huerta et al. und Pochron et al. kamen zu ähnlichen Ergebnissen für LDPE und *Lumbricus terrestris* sowie Mikroplastik aus recycelten Altreifen und *Eisenia fetida*.^{100, 101} Weitere beobachtete negative Wirkungen auf Erdwürmer durch Mikroplastik sind die Beeinträchtigung des Immunsystems, reduziertes Wachstum und geringere Enzymaktivität.⁹⁵

Weitere Studien zeigen, dass sich in der Anwesenheit von Mikroplastik die Struktur der Gräben von Erdwürmern verändert.¹⁰² Dies hat auch einen direkten Einfluss auf die physikalischen Bodeneigenschaften wie der Aggregatstruktur und damit auch auf andere Bodenorganismen.¹⁰³ Mesofauna und Erdwürmer sind zuträglich für die Bodenqualität. Umgekehrt heißt dies, dass negative Auswirkungen auf diese zu einer Verschlechterung der Bodenqualität führen.

Bezüglich der Studien an Erdwürmern ist zu beachten, dass die experimentellen Untersuchungen unter Labor- oder semi-natürlichen Bedingungen und unter hohen Mikroplastik-Konzentrationen durchgeführt wurden. Es gilt als eher unwahrscheinlich, dass die in den Untersuchungen verwendeten Konzentrationen in natürlicher Umgebung auftreten. Geringere Konzentrationen zeigten in Untersuchungen keine entsprechenden Auswirkungen auf das Wachstum oder die Sterblichkeit von Erdwürmern, dennoch konnten histopathologische Effekte und Immunreaktionen festgestellt werden.¹⁰⁴

Weitere Untersuchungen wurden an wirbellosen Tieren wie Springschwänzen, Nematoden und Schnecken vorgenommen.¹⁰⁵ Auch hier zeigen Ergebnisse negative Auswirkungen auf die Bodenorganismen. Unter anderem wurden Essverhalten und

⁹⁸ Zhang et al. (2019).

⁹⁹ Duis und Coors (2016).

¹⁰⁰ Huerta Lwanga et al. (2016b).

¹⁰¹ Pochron et al. (2017).

¹⁰² Huerta Lwanga et al. (2016a).

¹⁰³ Souza Machado et al. (2018).

¹⁰⁴ Zhou et al. (2020).

¹⁰⁵ Souza Machado et al. (2018); Zhou et al. (2020).

Stoffwechselaktivitäten beeinträchtigt, Schäden am Speise- und Verdauungstrakt von Organismen verursacht sowie Fortpflanzungsvermögen und Immunreaktionen gestört. Bereits geringe Mengen an Mikroplastik haben hier das Wachstum von Organismen beeinflusst.¹⁰⁴

Mikroplastik kann sich auf die Keimung und das Wachstum von Pflanzen auswirken, wobei negative und positive Effekte auftreten. Leifheit und Rillig haben mögliche Wirkungsmechanismen, wie Mikroplastik Pflanzen positiv und/oder negativ beeinflussen könnte, identifiziert.^{106, 107} Demnach kann Mikroplastik Pflanzen durch eine Veränderung der Bodenstruktur, durch die Immobilisation von Nährstoffen, durch Transport und Adsorption von Schadstoffen, durch den Einfluss auf Mikroorganismen und Wurzelsymbiosen, durch eine direkte toxische Wirkung (für Nanoplastik) und durch die Veränderung von Pflanzengemeinschaften beeinflussen.¹⁰⁷ Ein weiterer von Zhang et al. beschriebener Wirkmechanismus ist die Einschränkung und physische Schädigung von Wurzeln und deren Wachstum durch scharfkantige Mikroplastikpartikel.¹⁰⁸

Veränderungen in physikalischen Bodeneigenschaften wie der Bodendichte, dem Wasserhaltevermögen und der Aggregatstruktur, können das Pflanzenwachstum auf verschiedene Weise beeinflussen. Eine reduzierte Lagerungsdichte und eine bessere Durchlüftung können zum Beispiel das Pflanzenwachstum begünstigen, wohingegen eine Veränderung der Aggregatstruktur zu einer Verschiebung von Mikroorganismen-Gemeinschaften führen kann (mit möglichen negativen Effekten für das Wachstum von Pflanzen). Letzteres kann zum Beispiel der Fall sein, wenn wichtige Funktionen wie die Stickstofffixierung gestört werden.¹⁰⁹ Die Veränderung von physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften (Aggregatstabilität und pH-Wert) durch verschiedene Arten von Mikroplastik und eine damit einhergehende Verringerung der Keimungsrate und des Wachstums von Weidegras wurde zum Beispiel in einem Experiment von Boots et al. festgestellt.¹¹⁰

Der Abbau von weniger persistentem Mikroplastik steht im Verdacht, zu einer Immobilisation von Nährstoffen für Pflanzen zu führen. Eine hemmende Wirkung auf das Pflanzenwachstum ist damit wahrscheinlich.¹¹¹ Über die generelle Wirkung durch den Transport von Schadstoffen herrscht hingegen Unklarheit. Auf der einen Seite wird vermutet, dass phytotoxische Substanzen gut an Mikroplastik gebunden werden können und damit der Transport in Böden erhöht wird. Auf der anderen Seite suggerieren Forschungsergebnisse aus Versuchen mit aquatischen Lebewesen, dass durch Adsorption von Schadstoffen an Mikroplastik diese weniger verfügbar sind für Pflanzen und somit Kunststoffe eine Art schützende Wirkung auf Pflanzen haben könnten.¹¹¹

¹⁰⁶ Leifheit und Rillig (2020).

¹⁰⁷ Rillig et al. (2019).

¹⁰⁸ Zhang et al. (2019).

¹⁰⁹ Rillig et al. (2019); Zhou et al. (2020).

¹¹⁰ Boots, Russell und Green (2019).

¹¹¹ Rillig et al. (2019).

Eine direkte toxische Wirkung auf Pflanzen ist im Falle von besonders kleinen Mikroplastik Partikeln – Nanoplastik – denkbar. Derzeit liegen keine Studien zu Mengen von Nanoplastik in Böden oder zur Wirkung von Nanoplastik auf Pflanzen vor.¹¹² Es wird aber davon ausgegangen, dass sich Nanokunststoffpartikel in Böden befinden.¹¹¹ Studien mit landwirtschaftlich genutzten Pflanzen zeigen, dass Nanoplastik durch die Wurzeln in Pflanzen aufgenommen werden kann.¹¹³ Ihre potenziell toxische Wirkung kann sich zum Beispiel als Veränderung an der Zellmembran und in Zellmolekülen oder durch das Hervorrufen von oxidativem Stress darstellen.¹¹¹

Durch von Mikroplastik hervorgerufene Veränderungen der physikalischen Bodeneigenschaften sowie die direkte toxische Wirkung von Nanokunststoffpartikeln könnten für Pflanzen notwendige Symbiosen mit Mikroorganismen gestört werden. Rillig et al. heben hervor, dass zu diesem Zeitpunkt noch keine Studien diesbezüglich vorliegen und dass hier ein wichtiger Bereich für zukünftige Forschung liegt – dies auch wegen der potenziellen Bedeutung für globale Nährstoffkreisläufe.¹¹¹

Auch die Wirkung von Mikroplastik auf die Diversität und Zusammensetzung von Pflanzengemeinschaften könnte relevant sein. Verschiedene Mechanismen sind hier denkbar, die evolutionären Druck ausüben könnten, zum Beispiel die Veränderung von physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften, die unterschiedliche Sensitivität von Pflanzen und Veränderungen in den Mikroben-Gemeinschaften im Boden.¹¹¹

5.5.3 Bioakkumulation

Ein weiteres relevantes Thema ist die Bioakkumulation von Mikroplastik und von den an Mikroplastik gebundenen Schadstoffen in aquatischen und terrestrischen Nahrungsketten. Nanokunststoffpartikel können von Pflanzen aufgenommen werden. Wenn es sich um Nutzpflanzen handelt, können diese sich unter Umständen auch in Lebensmitteln wiederfinden.¹¹⁴ Ebenso haben Untersuchungen gezeigt, dass Mikroplastik von Erdwürmern aufgenommen wird und durch deren Verzehr an Hühner weitergegeben werden kann.¹¹⁵

Studien in aquatischen Ökosystemen zeigen, dass Mikroplastik zur Bioakkumulation von Schadstoffen wie POPs in marinen Nahrungsketten führt.¹¹⁶ So akkumulieren zum Beispiel Muscheln veterinäre Antibiotika. **Fehler! Textmarke nicht definiert.** Generell gibt es aber nur wenige Daten zum Einfluss und zur Akkumulation von Mikroplastik in Nahrungsketten in aquatischen und insbesondere terrestrischen Ökosystemen, sodass keine generellen Aussagen getroffen werden können.¹¹⁶

¹¹² Ng et al. (2018).

¹¹³ Zhou et al. (2020).

¹¹⁴ Rillig et al. (2019); Zhang et al. (2019).

¹¹⁵ Ng et al. (2018).

¹¹⁶ Wu et al. (2019).

5.6 Ökonomische Entwertung landwirtschaftlicher Böden durch Kunststoffeinträge

Böden sind eine begrenzte und über viele Dekaden gewachsene Ressource. Durch Kunststoffemissionen wird sie entwertet. Allerdings gibt es bislang keine empirischen Untersuchungen, die einen Zusammenhang zwischen Kunststoffbelastung einerseits und Ertragsmengen oder Produktqualitäten andererseits nachweisen. Nichtsdestotrotz wird bereits heute der Fremdstoff- und Kunststoffgehalt in Komposten und Klärschlämmen über die europäische und deutsche Düngemittelverordnung reguliert.^{117, 118}

Ab 2026 dürfen laut EU-Düngeverordnung noch maximal 0,25 % Fremdstoffe (bezogen auf die Trockenmasse (TM)) enthalten sein. Zu den Fremdstoffen zählen Kunststoffe, Metalle und Glas. Erfahrungen der Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) legen nahe, dass Komposte mit Kunststoffgehalten von mehr als 0,1 % (TM) am Markt nicht akzeptiert werden.¹¹⁹ Auch in Gesprächen mit Agierenden der Landwirtschaft wurde immer wieder darauf hingewiesen, dass die Kompostqualität in Bezug auf Kunststoffanteile bereits heute kritisch gesehen wird. Darauf aufbauend wird die Annahme getroffen, dass ein landwirtschaftlich genutzter Boden mit einem Kunststoffgehalt von 0,1 % (TM) zumindest seinen wirtschaftlichen Wert verloren hätte.

Unter Berücksichtigung der heute verfügbaren landwirtschaftlichen Nutzfläche sowie typischer Werte für Bearbeitungstiefe, Bodendichte¹²⁰, Wasser- und Luftporenanteil,¹²¹ lässt sich der Anstieg der Kunststoffkonzentration über die Jahre leicht berechnen.¹²² Bei einem durchschnittlichen Eintrag von 100 Kilogramm pro Hektar und Jahr hätte ein Boden nach etwas mehr als 30 Jahren den kritischen Grenzwert von 0,1 % erreicht, bei 50 Kilogramm pro Hektar und Jahr immerhin in weniger als 70 Jahren. Bei 10 Kilogramm pro Hektar und Jahr hätte der Boden nach 80 Jahren immerhin 25 % des Maximalwertes erreicht; bei der heutigen durchschnittlichen Belastung von 1 Kilogramm pro Hektar und Jahr wären es 3 % des Grenzwertes nach 100 Jahren (Abb. 09).

¹¹⁷ Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019).

¹¹⁸ EU-Kommission und EU-Parlament (8. Mai 2019).

¹¹⁹ Kehres (2016).

¹²⁰ <https://www.topagrar.com/technik/news/flach-schaelen-statt-graben-9365947.html>, letzter Zugriff am 3.02.2021

¹²¹ https://stadtverband-chemnitz.de/th_images/fachberatung/allgemeines/zusammensetzung_und_entstehung_des_bodens.pdf, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹²² Annahme: Bodendicke: 0,30 m; Bodendichte: 1.350 kg/m³; Wasseranteil: 25 %, Luftporenanteil 25 %.

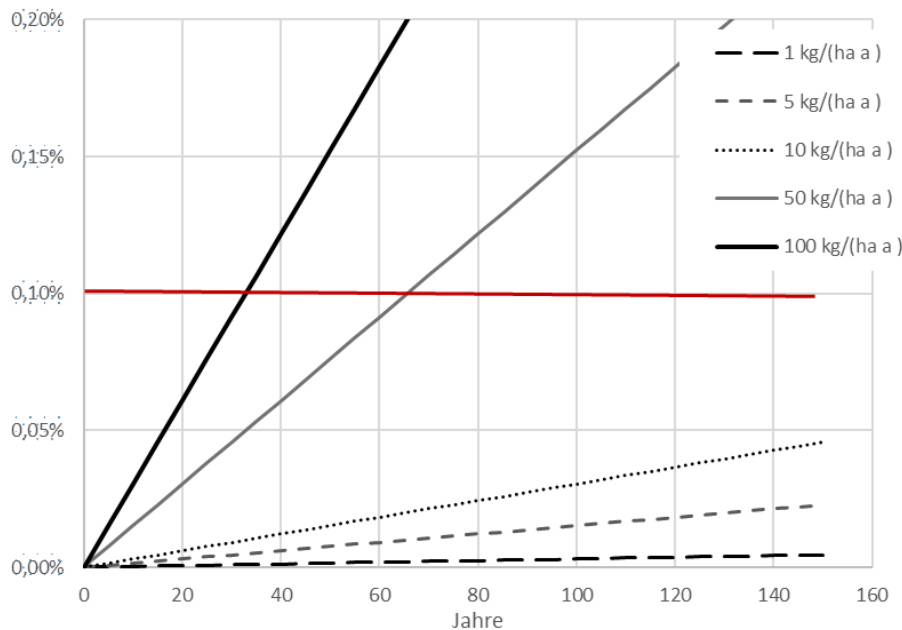


Abb. 09 Kunststoffkonzentration im Boden über die Zeit in Abhängigkeit der spezifischen Flächeneinträge (rote Linie = kritischer Grenzwert gemäß EU-Düngeverordnung)

Diese Abschätzung vernachlässigt, dass bereits seit vielen Jahren Kunststoffe in die Böden eingetragen werden. Würde dies berücksichtigt, wäre es sehr wahrscheinlich, dass es bereits heute Böden gibt, die den Grenzwert deutlich schneller erreichen. Insbesondere dann, wenn gleichzeitig mehrere Quellen für Kunststoffemissionen vorhanden sind oder sich die heutigen Praktiken zur Kunststoffverwendung ausweiten, ist mit einem deutlich schnelleren Anstieg der Kunststoffkonzentrationen zu rechnen. Eine Entlastung der Böden könnte durch einen Abbau der Kunststoffe stattfinden. Da die hier betrachteten Zeiträume zumindest für konventionelle Kunststoffe eher kurz im Vergleich zu den typischen Abbauezeiten sind, wurde dieser Effekt nicht berücksichtigt.

Ein einfacher Ansatz zur Monetarisierung der Schäden lässt sich auf Basis der Kaufwerte durchführen. Der Kaufwert eines Hektars landwirtschaftlich nutzbarer Fläche betrug in Deutschland im Jahr 2019 ca. 25 500 Euro, wobei der Wert innerhalb Deutschlands stark schwankt. Vor allem in den westdeutschen Flächenländern lag er zum Teil deutlich höher.¹²³ Geht man vereinfachend davon aus, dass die Entwertung des Bodens einen linearen Zusammenhang mit der Kunststoffkonzentration aufweist und wie oben beschrieben bei einem Grenzwert von 0,1 % eine vollständige (wirtschaftliche) Entwertung für landwirtschaftliche Zwecke eintritt, lassen sich die jährlich in Deutschland vernichteten Werte wie folgt abschätzen.

¹²³ Statistisches Bundesamt (2019c).

$$\begin{aligned}
K_{\text{Verlust}} &= \frac{\dot{m}_{\text{Kunststoffemission}} \times A_{\text{LNF}} \times K_{\text{Kaufwert LNF}}}{A_{\text{LNF}} \times d_{\text{Boden}} \times (\rho_{\text{Boden}} - \rho_{\text{H}_2\text{O}} \times \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}) \times \delta_{\text{Grenzwert}}} \\
&= \frac{17.800 \text{ t} \times 16.700.000 \text{ ha} \times 25.500 \frac{\text{€}}{\text{ha}} \times 100\%}{16.700.000 \text{ ha} \times 0,3 \text{ m} \times \left(1,35 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} - 1,0 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \times 0,23\right) \times 0,1 \%} \\
&\approx 135.000.000 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}
\end{aligned}$$

Unter Verwendung des aktuellen Kaufwerts für landwirtschaftliche Nutzfläche ergibt sich bei einer Emission von 1 Kilogramm Kunststoff pro Hektar und Jahr ein jährlicher Wertverlust von ca. 135 Millionen Euro. Zum Vergleich: Diese Verluste in der Landwirtschaft entsprechen ca. 1,7 % der Wertschöpfung, die durch die Herstellung von Agrarkunststoffen erreicht wird.¹²⁴ Dies liegt in der Größenordnung der Umsatzrendite der Kunststoffindustrie. Bei einer detaillierten und vor allem lokalen Betrachtung der verschiedenen Kunststoffanwendungen würde sich vor allem bei Flächen mit hohen spezifischen Emissionen das Verhältnis des Verlustes von Bodenwert zu Wertschöpfung noch deutlich ungünstiger darstellen.

Vermutlich wird sich auch auf einem Boden mit einer Kunststoffkonzentration von 0,1 % oder mehr noch Landwirtschaft betreiben lassen, sodass die obige Annahme einer vollständigen Entwertung nur als grobe Annäherung dienen kann und eine Kunststoffkonzentration von 0,1 % nicht mit einem vollständigen Verlust der Nutzbarkeit gleichzusetzen ist. Dennoch führen Verknappung, Flächenkonkurrenzen, Erosion und zunehmende Schadstoffgehalte in Deutschland vor allem in den westdeutschen Flächenländern seit Jahren zu deutlich steigenden Preisen guter Böden. Die Abschätzung der wirtschaftlichen Verluste ist daher vermutlich – trotz der dargestellten Unsicherheiten – in Bezug auf den wirtschaftlichen Gesamtverlust eher konservativ. Gleichzeitig wird die Zunahme kunststoffverschmutzter Böden die Preise für unbelastete Böden weiter in die Höhe treiben. Die Problematik, die sich aus hohen Bodenpreisen ergibt, wird auch dadurch ersichtlich, dass die flächenbezogene Bruttowertschöpfung der Landwirtschaft 2018 nur 1 273 Euro pro Hektar Nutzfläche betrug. Eine weitere Verteuerung der Ressource Boden wäre vor allem für produzierende Kleinbetriebe fatal.

Sollten zukünftig konkrete öko- und humantoxikologische Gefahren durch die Kunststoffe belegt werden, wären die Wertverluste sicherlich um ein Vielfaches höher. Dass zunehmende Kunststoffgehalte im Boden von Landwirten, Umweltschützern und Verbrauchern zukünftig als normal akzeptiert werden, erscheint hingegen eher unwahrscheinlich.

¹²⁴ In Europa wurden 2019 mit 51,2 Millionen Tonnen Kunststoff ca. 360 Milliarden Euro erwirtschaftet. Dies entspricht ca. 7 000 Euro pro Tonne. Überträgt man diesen Wert auf die Produktion von Agrarkunststoffen (Thermoplaste, Duroplaste, Polyurethane, Elastomere, Chemiefasern und Polymerdispersionen), so ergibt sich eine Bruttowertschöpfung von ca. 7,7 Milliarden Euro.

6 Maßnahmenvorschläge

In diesem Kapitel werden Maßnahmenvorschläge zur Reduktion der Kunststoffemissionen zusammengefasst (eine ausführlichere Beschreibung findet sich jeweils in Kapitel 7). Sie sollen als Grundlage für eine notwendige gesellschaftliche Debatte über sinnvolle Maßnahmen dienen und Hinweise auf notwendige Innovationen stimulieren.

Die Einträge in landwirtschaftliche Böden können wie in Kapitel 5 beschrieben nach dem Typ des Eintrags in primär (Entstehung im ursächlichen Zusammenhang mit der Landwirtschaft) und sekundär (Entstehung durch Dritte verursacht) unterteilt werden. Weiterhin kann der Verbleib im Boden durch die Landwirtschaft in »intendiert« (beabsichtigt oder in Kauf genommen) bzw. »nicht-intendiert« unterteilt werden. Es ergeben sich vier Eintragstypen (vgl. Tab. 08). Verschiedene Maßnahmen können in Bezug auf die Eintragstypen als unterschiedlich sinnvoll und effizient erachtet werden. Maßnahmen, um Littering oder Mikroplastik außerhalb der Landwirtschaft zu adressieren, die über andere Wege als Klärschlamm, Kompost und Gärreste in landwirtschaftliche Böden gelangen, werden im Rahmen dieser Studie nicht behandelt, da sie de facto sämtliche Anwendungsbereiche von Kunststoffen betreffen.

Die zugeordneten Maßnahmenvorschläge wurden nach den Kriterien der Umsetzbarkeit und Wirksamkeit bewertet sowie mögliche Interessenskonflikte mit anderen (Umwelt-)Zielen (Tradeoffs) aufgezeigt (vgl. Tab. 08).

Grundsätzlich lassen sich vier Maßnahmentypen unterscheiden, die jeweils unterschiedliche Akteure und deren Verantwortlichkeiten adressieren:

- Alternative Werkstoffe/Technologien -> Forschung und Entwicklung
- Anwendung -> Landwirtschaft
- Regulatorik/Systeme -> Politik
- »Bildung -> Verbände, Behörden

Sämtliche umweltoffenen Kunststoffanwendungen in der Landwirtschaft sollten im Hinblick auf eine Reduktion der Freisetzung optimiert werden. Das Recycling – sofern machbar - sollte die erste Option darstellen. Auch zu rezyklierende Werkstoffe sollten für den Fall von Emissionen in die Umwelt eine Art »Notfallabbaubarkeit« besitzen, um unbegrenzte Anreicherung von Kunststoffen in der Umwelt zu unterbinden. Dort wo Recycling keine Option ist, sollten besser abbaubare Alternativen entwickelt werden. Im Idealfall solche, bei denen eine gezielte Initiierung des Abbaus nach Ende der Nutzungsphase möglich ist, sodass hohe Funktionalität in der Nutzungsphase und schneller Abbau nach Nutzungsende sich nicht ausschließen. Ungewünschte Fragmentierungen, unsachgemäße Handhabung etc. könnten auf der Ebene von Material- und Produktdesign adressiert werden. Indikatoren, die eine zu lange Nutzung von Kunststoffprodukten und damit deren Versprödung und Witterung vermeiden, könnten Kunststoffemissionen reduzieren. Weiterhin fügen sich schwarze und grüne Kunststoffprodukte zwar optisch in den Pflanzenbau gut ein, lassen sich aber umso schwerer wiederfinden. Ggf. wäre es auch sinnvoll,

für die verlustfreie Bergung von Folien, Netzen etc. funktionierende technische Lösungen zu entwickeln.

Grundsätzlich besteht in Bezug auf Kunststoffe in Böden ein hohes Wissensdefizit, das insbesondere durch das Fehlen sowohl von Methoden als auch einfacher Messtechniken zur Bestimmung im Boden verursacht wird. Die sollten entwickelt und vereinheitlicht werden.

Landwirtschaftliche Praktiken, die den Kunststoffeinsatz reduzieren oder vermeiden (bspw. natürliches Mulchen, Verzicht auf Kunstdünger, dickere Folien) sollten geprüft und gefördert werden. In Bezug auf solche Änderungen in der landwirtschaftlichen Praxis ist zu prüfen, inwieweit diese mit ökologischen Zielkonflikten (Tradeoffs) verbunden sind und ob sich etwaige Mehrkosten auch als Mehrwert am Markt durchsetzen lassen. Da sich »plastikfrei« derzeit als Qualitäts- und Differenzierungsmerkmal im Handel etabliert, könnten sich auch Impulse in Richtung einer »plastikfreien Landwirtschaft« ergeben. In Bezug auf Bodenverbesserer sollte geprüft werden, ob diese im Vergleich zu Bewässerungssystemen eine wirtschaftlich und ökologisch sinnvollere Alternative darstellen. Der Anbau trockenresistenter Pflanzen wäre ggf. zu prüfen. Entsprechende Strategien werden auch im Rahmen der Klimaanpassung diskutiert.

Zulässige Polymergehalte und zulässige Abbauperioden könnten in einer Vielzahl von Rechtsakten und freiwilligen Standards geschärft werden (REACH, ECHA-Beschränkungsvorschlag für Mikroplastik, Saatgutgesetz, EU-Düngemittelverordnung und Düngegesetz). Die Abbauperiode sollte anwendungs- und mengenspezifisch gestaffelt werden. Auch der ECHA-Beschränkungsvorschlag sollte sich stärker am Kriterium der Abbaubarkeit orientieren. Das europäische und nationale Recht sollte – insbesondere in Bezug auf Kunststoffgehalte in Düngemitteln - besser harmonisiert werden. Auch die Anforderungen an die regelmäßige Prüfung und ein umfassendes Monitoring der Bodenqualität sollte regulatorisch verankert werden. Grundsätzlich stellt das BBodSchG einen Rechtsrahmen dar, über den der Eintrag von Mikroplastik adressiert werden könnte. Bisher findet das BBodSchG jedoch keine entsprechende Anwendung. Die bodenbezogene Klärschlammverwertung sollte weiter reduziert werden und ggf. an strengere Vorgaben für Fremdstoffgehalte geknüpft werden – sofern diese in Zukunft nachweisbar werden. Alternativ zu festen Grenzwerten könnten Fremdstoffgehalte auch direkt an Gebühren gekoppelt werden. Die Stärkung der Rücknahmesysteme ist eine Maßnahme, die indirekt wirkt. Durch sie könnte einerseits die Wertschätzung des Kunststoffs und damit der sorgsame Umgang mit ihm gestärkt werden. Weiterhin könnten durch bspw. »Product as a Service«-Konzepte sinnvolle Nutzungszeiten vorgegeben werden.

Auch in zusätzlichen Bildungs- und Informationsmaßnahmen wird ein Potenzial zur Reduktion von Kunststoffeinträgen in der Landwirtschaft gesehen. Dies betrifft die Förderung des Problembewusstseins und Informationen zu Vorteilen der folienfreien und »kunststoffreduzierten« Landwirtschaft, aber auch Informationen zu den Rechtspflichten für Abfallerzeuger, die sich aus Kreislaufwirtschaftsgesetz und Gewerbeabfallverordnung ergeben sowie zu existierenden Sammelsystemen und -praktiken.

Die folgenden Maßnahmen sehen wir in Bezug auf ihre Wirksamkeit und Umsetzbarkeit sowie geringer Zielkonflikte als besonders vielversprechend an:

- Auswahl und Entwicklung von Kunststoffen, die eine an die anwendungsseitigen Erfordernisse und die spezifischen Umweltbedingungen angepasste Abbaubarkeit besitzen (möglichst lange Nutzungsdauer (Latenzphase), anschließend schneller Abbau)
- Dort wo möglich sollte allerdings die Rezyklierbarkeit Vorrang besitzen. Dennoch sollte bei allen umweltoffen eingesetzten Polymeren eine - wenn auch langsame - Abbaubarkeit als Notfallkriterium vorhanden sein, um einen dauerhaften Anstieg der Gehalte in der Umwelt zu vermeiden.
- Entwicklung einer geeigneten, schnellen und günstigen Messtechnik für Kunststoffgehalte in Böden
- Prüfung des Einsatzes von Biomasse oder dickeren Folien zur Abdeckung als Alternative zu dünnen Folien
- Herabsetzung der Grenz- und Schwellenwerte für Kunststoff-Fremdstoffbestandteile auf technisch mögliche und sinnvolle Werte bei gleichzeitiger Heraufsetzung der Anforderungen für die Probennahme
- Regulierung, Standardisierung und Zertifizierung von anwendungsspezifischen Abbauzeiten unter Berücksichtigung eingesetzter Mengen, Nutzungsdauer sowie von Bodentyp und Mikroklima
- Informationsoffensive zu den Rechtspflichten sowie zu technischen und anwendungsseitigen Möglichkeiten der Emissionsminderung, der Verringerung des Verbrauchs und der Kreislaufführung der Kunststoffe

| PRIMÄR | | | | | | | | | | SEKUNDÄR | | Maßnahme | Umsetzbarkeit | Wirksamkeit | Bemerkung und Hinweise zu Tradeoffs (ökologisch, sozial, ökonomisch) | |
|--|----------------------|------------------|----------------------|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------|-------------|----------------------------------|-------------------------------|----------|--|-------------|--|---|
| INTENDIERT | | | | | NICHT INTENDIERT | | | | | INTENDIERT | NICHT INTENDIERT | | | | | |
| Umhülltes Saatgut | Umhüllte Düngemittel | Bodenverbesserer | Pflanzenschutzmittel | Folien Futterbau | Folien Pflanzenproduktion | Bewässerungssysteme | Pflanztöpfe, Pflanzhilfen | Kompost | Klärschlamm | Laterale Plastic Litter Einträge | Laterale Mikroplastikeinträge | | | | | |
| Alternative Werkstoffe/Technologien -> Forschung und Entwicklung | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X | X | X | X | | X | | | | | | | | Schnelle an die Anwendung und die spezifischen Umweltbedingungen angepasste Abbaubarkeit (möglichst lange Nutzungsdauer (Latenzphase), anschließend schneller Abbau) | | | Folienabbau eher als Notoption ansehen, grundsätzlich sollten die Folien recycelt werden; Differenzierung nach Nutzungsdauer (Spargel vs. Erdbeeren) wäre wichtig |
| X | | | | | | | | | | | | | Weiterentwicklung der Maschinenteknik (Vereinzelung), um auf Umhüllung von Saatgut (Pilletierung) verzichten zu können, ggfs. auch polymerfreie Alternativen der Beizung prüfen | | | Zu stark staubende Saatgüter und Düngemittel lassen sich mit dem Arbeitsschutz und Artenschutz (vgl. Bienensterben 2008 sowie Wirkung auf Insekten insgesamt) nicht vereinbaren |
| | X | | X | | | | | | | | | | Alternative Konzepte zur kontrollierten Abgabe (controlled release), Schwefelummantelung, Urease-/Nitrifikationshemmer, anorganische Kapseln | | | |
| | | | | X | X | | | | | | | | Metabolisierbare Sprühbeschichtungen als Alternative zu Siloflachfolien | | | Derzeit ist noch keine ausreichende Funktionalität gesichert (Gefahr von Futtermittelverlusten) |
| | | | | X | X | X | X | | | | | | Indikator für Alterung (bspw. Farbumschlag als Funktion von UV) entwickeln, um ungewollte Versprödung und Fragmentierung zu vermeiden; (bio-)abbaubare Folien deutlich kennzeichnen, um Verwechslung zu vermeiden und die Anforderungen für den Abbau zu kommunizieren | | | |
| X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | | | Entwicklung einer geeigneten, schnellen und günstigen Messtechnik für Kunststoffgehalte in Böden | | | |
| | | | | X | X | X | | | | | | | Handhabungs- und Bergetechnik verbessern (Reißen und Fragmentieren sollten vermieden werden) | | | Erhöhter Ressourcenaufwand durch zusätzlichen Maschineneinsatz |

Tab. 08 Maßnahmenvorschläge zur Reduktion der Kunststoffemissionen

| PRIMÄR | | | | | | | | | | SEKUNDÄR | | Maßnahme | Umsetzbarkeit | Wirksamkeit | Bemerkung und Hinweise zu Tradeoffs (ökologisch, sozial, ökonomisch) | | | | | |
|---------------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------|-------------|----------------------------------|-------------------------------|----------|---------------|-------------|--|--------|--|--|--|--|
| INTENDIERT | | | | | NICHT INTENDIERT | | | | | INTEN- DIERT | NICHT INTEN- DIERT | | | | hoch | mittel | Gering | | | |
| Umhülltes Saatgut | Umhüllte Düngemittel | Bodenverbesserer | Pflanzenschutzmittel | Folien Futterbau | Folien Pflanzenproduktion | Bewässerungssysteme | Pflanztöpfe, Pflanzhilfen | Kompost | Klärschlamm | Laterale Plastic Litter Einträge | Laterale Mikroplastikeinträge | | | | | | | | | |
| Anwendung -> Landwirtschaft | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | X | X | | | | | | | | | | | | Biomasse zur Abdeckung als Alternative zu Folien | | | Bei mangelnder Funktionalität drohen Pflanzenverluste |
| | X | | | | | | | | | | | | | | | | Häufigere Düngemittelgaben statt umhüllte Düngemittel | | | Auswaschung von Dünger (Nitratproblematik, Phosphorverluste), zusätzlich ökonomischer und ökologischer Aufwand für die häufigere Ausbringung (THG, Bodenverdichtung) |
| | | | | X | X | | | | | | | | | | | | Dickere Folien verwenden | | | Erhöhter Ressourcenaufwand |
| | | X | | | | X | | | | | | | | | | | Bewässerungssysteme als Alternative zu Bodenverbesserern (oder umgekehrt) auf ökologische Vorteilhaftigkeit prüfen | | | |
| | | X | | | X | X | | | | | | | | | | | Anbau trockenresistenter Pflanzen | | | Starker Eingriff in kulturell und ökologisch etablierte Anbaumethoden |

| PRIMÄR | | | | | | | | | | SEKUNDÄR | | Maßnahme | Umsetzbarkeit | Wirksamkeit | Bemerkung und Hinweise zu Tradeoffs (ökologisch, sozial, ökonomisch) | |
|--|----------------------|------------------|----------------------|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------|-------------|----------------------------------|-------------------------------|----------|--|-------------|--|--|
| INTENDIERT | | | | | NICHT INTENDIERT | | | | | INTEN- DIERT | NICHT INTEN- DIERT | | | | | |
| Umhülltes Saatgut | Umhüllte Düngemittel | Bodenverbesserer | Pflanzenschutzmittel | Folien Futterbau | Folien Pflanzenproduktion | Bewässerungssysteme | Pflanztöpfe, Pflanzhilfen | Kompost | Klärschlamm | Laterale Plastic Litter Einträge | Laterale Mikroplastikeinträge | | | | | |
| Regulatorik/Systeme -> Politik | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X | | | X | | | | | | | | | | Umsetzung der Vorgaben (insbesondere relevant für Saatgut) des ECHA-Beschränkungsvorschlags in der Fassung vom 22.08.2019 | | | |
| X | X | | | | | | | | | | | | Zulässigen Polymeranteil in Saatgutgesetz, EU-Düngeprodukteverordnung und Düngegesetz regeln | | | |
| X | X | (X) | X | | X | | | | | | | | Regulierung, Standardisierung und Zertifizierung von anwendungsspezifischen Abbaueiten unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer sowie von Bodentyp und Mikroklima | | | |
| | X | X | | | | | | | | | | | Harmonisierung von deutschem und europäischen Düngerecht in Bezug auf Anforderungen an Polymere und deren Abbaubarkeit | | | |
| | | | | | X | | | X | X | | | | Herabsetzung der Grenz- und Schwellenwerte für Kunststoff-Fremdbestandteile auf technisch mögliche und sinnvolle Werte, Heraufsetzung der Anforderungen für repräsentative Probennahme | | | |
| X | X | X | X | | X | X | X | X | X | | | | Verbot von Kunststoffeinträgen und/oder Einträgen kritischer Additive auf oder in der Nähe von Flächen mit besonderem Wert für die Biodiversität | | | Erhöhte Ausbringung und Verluste an Wirksubstanz (Saatgut, Nährstoff, Hilfsstoff, Biozid) bzw. mangelnde Nährstoffzufuhr, Störung natürlicher Kreisläufe (Humus-C, N, P) |
| | | | | | X | | | X | X | | | | Überarbeitung der Richtlinien der Ökoverbände: in Bezug auf die Anforderungen zur Reduktion von Mikroplastik schärfen und in Bezug auf Folieneinsatz konkretisieren | | | |
| | | X | | | | | | X | X | | | | Anforderungen an Flockungshilfsmittel und Gelbildner verschärfen (ggf. Erweiterung der ECHA-Mikroplastikdefinition), ggf. Anforderungen an Abbaubarkeit formulieren | | | Wassermangel, ggf. Verzicht auf bestimmte Kulturen erforderlich |

| PRIMÄR | | | | | | | | | | SEKUNDÄR | | Maßnahme | Umsetzbarkeit | Wirksamkeit | Bemerkung und Hinweise zu Tradeoffs (ökologisch, sozial, ökonomisch) | |
|---|----------------------|------------------|----------------------|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------|-------------|----------------------------------|-------------------------------|---|---------------|-------------|---|--|
| INTENDIERT | | | | | NICHT INTENDIERT | | | | | INTEN- DIERT | NICHT INTEN- DIERT | | | | | |
| Umhülltes Saatgut | Umhüllte Düngemittel | Bodenverbesserer | Pflanzenschutzmittel | Folien Futterbau | Folien Pflanzenproduktion | Bewässerungssysteme | Pflanztöpfe, Pflanzhilfen | Kompost | Klärschlamm | Laterale Plastic Litter Einträge | Laterale Mikroplastikeinträge | | | | | |
| | | | | | | | | | X | | | Weitere Einschränkung der bodenbezogenen Klärschlammverwertung (bspw. nur noch kompostierte und gütegesicherte Klärschlammkomposte) und effektiver Vollzug bezüglich der beschlossenen Einschränkungen | | | | |
| | | | | | | | | X | X | | | Fremdstoffgehalte im Bioabfall mit Gebühren beaufschlagen und Höchstwerte gesetzlich festlegen (bspw. in der Novellierung der BioAbV), Entsorgung verpackter Lebensmittel oder anderer nicht biogener und bioabbaubarer Abfälle in Bioabfall und Klärschlamm verbieten (Vollzug von GewAfV und KrWG, LAGA-Empfehlung) | | | | |
| | | | | X | X | X | | | | | | Stärkung der Rücknahmesysteme: z. B. verpflichtende Teilnahme, Finanzierung über EPR oder Pfandsysteme, höhere Rücknahme- und stoffliche Verwertungsquoten, konsequenterer Vollzug von KrWG/GewAbfV | | | | |
| Bildung -> Verbände, Behörden | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | X | X | | | | | | | Bessere und leicht zugängliche Informationen zur Kreislaufführung bzw. zur folienfreien Landwirtschaft inklusive Information über Rechtspflichten und Verantwortung für Landwirt*innen u. a. | | | | |
| X | X | X | X | X | X | X | X | X | | | | Zusammenstellung und Bereitstellung des Wissens zum Einfluss von Kunststoffgehalten auf den Bodenwert für Landwirt*innen | | | | |
| X | X | X | X | X | X | X | X | X | | | | Informationsschrift für Produktentwicklung in Bezug auf die Abbauleistung in Abhängigkeit von Bodentyp und Mikroklima bzw. Polymertyp | | | | |

7 Kunststoffemissionen nach Quellen

7.1 Folien, Vliese, Netze, Garne und Beschichtungen

7.1.1 Futtermittelproduktion und energetische Biomassenutzung

7.1.1.1 Kunststoffanwendungen

Vor allem Raufutter wie Heu und Stroh, Gras und Ganzpflanzenprodukte sowie Mais werden in großen Fahrsilos sowie als Rund- und Quaderballen gelagert. Dabei werden Garne, Netze, Vliese und Folien verwendet, um die Formstabilität der Ballen zu gewährleisten, die Pflanzenprodukte vor Witterungseinflüssen zu schützen oder um eine Konservierung zu erreichen.

Neben der direkten Nutzung als Heu oder Stroh ist die Konservierung durch Silieren von noch feuchtem Schnittgut eines der wichtigsten Verfahren in der heutigen Landwirtschaft. Dabei werden Fahrsilos, Rund- und Quaderballen durch Kunststofffolien luftdicht umschlossen, um eine anaerobe Gärung zu ermöglichen. Durch die Gärung werden die Pflanzenprodukte aufgeschlossen und erzielen bei der Tierfütterung (insbesondere bei Rindern, Schafen, Ziegen und Pferden) oder bei der energetischen Biomassenutzung höhere Ausbeuten.

Mais, die mengenmäßig wichtigste Pflanze für die Silage, wird nahezu vollständig in Fahrsilos verarbeitet. Für die Einlagerung in den Fahrsilos werden Mais und in geringerem Umfang auch andere Pflanzen gehäckselt und in einer großen Siloanlage (bestehend aus einer Bodenplatte aus Beton oder Asphalt mit oder ohne Seitenwände) gelagert. Im Anschluss werden sie durch Überfahren mechanisch verdichtet und mittels einer Kombination aus Unterziehfolie und Flachfolie (beide aus LDPE) luftdicht abgedeckt. Die Boden- und Seitenwände sind in der Regel mit Bitumen oder Epoxidharzen beschichtet, um eine Schädigung des Betons durch die bei der Gärung entstehenden sauren Sickersäfte zu vermeiden. In der Regel werden die Fahrsilos zusätzlich noch durch Schutzgitter aus HDPE vor einem Befall durch Wildtiere (Vögel, Nager, Füchse etc.) geschützt.

Ballen werden in Form von Rund- oder Quaderballen verwendet. Bei der direkten Nutzung als Heu und Stroh dominieren die Quaderballen. Zur Herstellung der Ballen werden im ersten Schritt Heu und Stroh vorgetrocknet, anschließend gepresst und schließlich mittels Erntegarnen (aus PP) oder Ballennetzen (aus HDPE) fixiert. Zum Schutz vor Niederschlägen wird Heu in der Regel überdacht gelagert, Stroh häufig auch draußen. Vor der Witterung wird Stroh häufig mit Abdeckvliesen aus PP geschützt.

Soll der Balleninhalte siliert werden, muss er analog zum Vorgehen bei den Fahrsilos luftdicht abgeschlossen werden. Bei der Ballensilage werden vor allem Gras (in geringerem Umfang auch Ganzpflanzen wie Ackerbohne, Luzerne, Lupine) oder Pflanzenreste (Trester, Rübenblätter) in Ballen gepresst. Eine Umfrage bei einer Fachausschusssitzung zur Futtermittelkonservierung der Deutschen Landwirtschafts-Ge-

sellschaft im Jahr 2004 kam zu dem Schluss, dass bei etwa 20 % des Gesamtaufkommens zur Silage die Ballensilage und bei 80 % Fahrstilos eingesetzt werden.¹²⁵ Eine Nachfrage bei der Landwirtschaftskammer NRW¹²⁶ ergab, dass der Anteil der Ballensilage heute eher niedriger ist. Grund dafür ist die Konzentration in der Landwirtschaft. Größere Unternehmen lassen sich von den hohen Investitionskosten für Fahrstilos nicht abschrecken, sodass vor allem die im Vergleich zur Ballensilage niedrigeren Betriebskosten den Ausschlag für die Fahrstilos geben. Heute wird die Ballensilage vor allem für den vierten bis fünften Ernteschnitt in einer Saison eingesetzt, der ca. 7 bis 21 % der gesamten Erntemenge je nach Kultur ausmacht.¹²⁷ Nichtsdestotrotz hat sich die Ballensilage ebenfalls technisch und wirtschaftlich weiterentwickelt und wird nach wie vor insbesondere von Lohnunternehmen angeboten und durchgeführt.¹²⁸ Es wird im Folgenden angenommen, dass die Ballensilage für Gras- und Ganzpflanzensilage heute noch ca. 15 % ausmacht. Bei der Ballensilage werden mehr Rundballen als Quaderballen verwendet. Die gepressten Ballen werden mit Erntegarnen (PP), Ballennetzen (HDPE) oder einer Mantelfolie (LDPE) in Form gehalten und anschließend mit einer dünnen Stretchfolie (LDPE) in mehreren Lagen luftdicht verpackt.



Abb. 10 Folieneinsatz bei der Silage: oben links Fahrstilo¹²⁹, oben rechts Rundballen¹³⁰, unten links Strohballen mit Erntegarn gebunden¹³¹, unten rechts Ballennetz¹³²

7.1.1.2 Eingesetzte Kunststoffmenge

Eine detaillierte Statistik der verbrauchten Kunststoffmengen in der Futtermittelproduktion existiert bis heute nicht. Eine grobe Schätzung der verwendeten Mengen an Folien, Netzen, Vliesen und Garnen bei der Futtermittelerzeugung und der

¹²⁵ DOW (Februar 2005).

¹²⁶ Telefonat mit Willem Tel; Bauberatung der Landwirtschaftskammer NRW, 4.03.2020.

¹²⁷ Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2018).

¹²⁸ <https://lu-web.de/redaktion/news/trend-report-pressen/>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

¹²⁹ W. Willmann, 26.07.2006 (CC BY 2.5)

¹³⁰ patpatpat; 1.1.2006.2017 (CC BY 2.0)

¹³¹ T. Houlihan, 27.10.2008, (CC BY-SA 3.0)

¹³² Flominator, 11.08.2005, (CC BY-SA 3.0)

energetischen Biomassenutzung kann aber anhand der statistischen Daten zur Futtermittelproduktion, zu den Häufigkeiten und typischen Größen von Fahrsilos, Quader- und Rundballen sowie anhand von Produktinformationen über Art, Dicke und Nutzungsdauer der eingesetzten Folien vorgenommen werden.

Die Abschätzung für die jährlichen Verbrauchsmengen ist in Tab. 10 zusammengestellt. Die detaillierte Abschätzung der Mengen kann Anhang 1.1 entnommen werden. Einsatzgebiete, Verbreitung und technische Daten der diversen Folien, Vliese, Netze und Garne wurden entsprechenden Produktinformationen entnommen und durch Gespräche mit Expert*innen bestätigt. Die jährlich verbrauchte Menge an Folien, Netzen, Vliesen und Garnen beläuft

sich auf ca. 60 000 Tonnen. Da viele Anwendungen mehrjährig sind, wird die in Nutzung befindliche Menge mit 159 000 Tonnen fast dreimal so hoch eingeschätzt.

7.1.1.3 Kunststoffemissionen

Polymeremissionen aus Folien, Vliesen, Netzen und Garnen sind nicht intendiert, können aber durch vielfältige Mechanismen entstehen (Abb. 11). Defekte Folien bei der Silage stören den Silierprozess und können zur Vernichtung des Futtermittels führen. Grundsätzlich ist auch mit keinem starken Abrieb zu rechnen, da die Folien keiner permanenten dynamischen Belastung unterliegen. Allerdings werden die Silageballen zur Fütterung manuell oder voll automatisiert durch Rundballenschneider geöffnet und entleert. Es ist sehr wahrscheinlich, dass dabei geringe Mengen Folien-, Garn- und Netzreste im Futter oder in der Umwelt verbleiben.¹³³ Bei den Fahrsilos ist die Zerstörung bei der Entnahme nicht erforderlich; stattdessen wird die Folie aufgewickelt. Nichtsdestotrotz kann insbesondere die dünne Unterziehfolie leicht reißen. Folienreste, die in der Silage verbleiben, werden im Idealfall von Menschen zurückgehalten und der Entsorgung oder Verwertung zugeführt; sie könnten aber auch über den Wirtschaftsdünger wieder auf die landwirtschaftliche Nutzfläche ausgetragen werden. Die mehrjährige Nutzung ist vor allem bei den Fahrsilos aus betriebswirtschaftlicher Sicht sinnvoll und sollte prinzipiell zu einem sorgsameren und sparsameren Umgang mit den Folien führen als dies bei der Ballensilage der Fall ist.

Da die Folien draußen angewendet werden, ist auch eine Verwitterung denkbar. Um dies zu unterbinden, werden die Folien in der Regel UV-stabilisiert.¹³⁴ Allerdings verbraucht sich der UV-Schutz.¹³⁵ Werden die Folien über die empfohlene Nutzungsdauer hinaus verwendet, ist es daher nicht unwahrscheinlich, dass sie reißen und fragmentieren.

Darüber hinaus sind auch Beschädigungen der Folien, Netze und Vliese durch Vandalismus, Wildtiere, Unwetter, illegale Entsorgung, unsachgemäße Anwendung oder Verwitterung bei zu langer Nutzung oder bei Verwendung minderwertiger Folie nicht ausgeschlossen und in Einzelfällen auch dokumentiert.¹³⁶

¹³³ https://www.youtube.com/watch?v=a2ie_rlzalq, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹³⁴ [https://agriculture.basf.com/global/assets/en/Crop%20Protection/agricultural-films/Agriculture_2016_Final%20\(2\).pdf](https://agriculture.basf.com/global/assets/en/Crop%20Protection/agricultural-films/Agriculture_2016_Final%20(2).pdf), letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹³⁵ <https://www.dm-folien.com/shop/silofolie-4-x-25-m-150my>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹³⁶ Bspw. Süddeutsche Zeitung (26.01.2018):SZ: Plastikmüll - Mehrweg wäre der richtige Weg; <https://www.sueddeutsche.de/kolumne/plastikmuell-mehrweg-waere-der-richtige-weg-1.3842056>, letzter Zugriff am 9.02.2021. www.sueddeutsche.de



Abb. 11 Mögliche Freisetzungsmechanismen für Folien, Netze und Garne: a) illegale Ablagerung¹³⁷, b) Extremwetterereignisse¹³⁸ c) Liegen gelassene Folien¹³⁹ d) ungenügende Befestigung¹⁴⁰, e) zerrissene Netze¹⁴¹ f) verknotete und zerrissene Garne¹⁴²

Vertiefende empirische Untersuchungen zum Umgang mit Folien, Netzen, Vliesen und Garnen in der Futtermittelproduktion, aus denen sich Emissionsraten ableiten lassen, wurden bis heute nicht durchgeführt. Eine Ableitung aus Stoffbilanzen ist nicht möglich, da weder die Verbrauchsmenge noch die Bestandsmengen noch die End of Life-Verwertungswege ausreichend detailliert bekannt sind. Eine Bestimmung aus der Beprobung von landwirtschaftlichen Nutzflächen setzt ein langfristiges und umfassendes Untersuchungsprogramm voraus, das bisher nicht durchgeführt wurde.

Besonders emissionsrelevant dürfte die Beschichtung der Fahrsilos sein; diese kann nicht zurückgewonnen werden und muss üblicherweise nach einigen Jahren erneuert werden, da sie durch mechanische Belastung und Medieneinfluss beschädigt wurde. Wir erwarten hier die mengenmäßig höchsten Verlustraten, gleichwohl liegen auch hier keine empirischen Untersuchungen vor.

Eine quantitative Abschätzung der Emissionen kann sich daher zum jetzigen Zeitpunkt nur auf qualitative Argumente stützen. In Tab. 09 werden die Offenheit ge-

¹³⁷ Till Zimmermann, 29.03.2020

¹³⁸ Andrew Gray, CC BY-SA 2.0. 2007, Wikimedia Commons

¹³⁹ Jürgen Bertling, 03.05.2021

¹⁴⁰ Jürgen Bertling, 03.05.2021

¹⁴¹ Katharina Istel, 03.05.2021

¹⁴² Katharina Istel, 03.05.2021

genüber der Umwelt, der Einfluss von Witterung und Umweltmedien (bspw. Sickersäfte) sowie die mechanische Belastung, denen die Folien, Garne, Netze, Vliese und Beschichtungen ausgesetzt sind, verglichen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass eine schlechte Abtrennbarkeit durch Zerschneiden oder Vermischung mit Silage, Heu oder Stroh zu einem erhöhten Verbleib in der Umwelt führt.

| Folientyp | Kriterium | | | | Schätzung zu Spannweite und Basiswert ¹⁴³ der Verlustrate [%] |
|----------------------------|------------------|----------------------------|-----------------------|----------------|--|
| | Umwelt-offenheit | Witterungs-/Medieneinfluss | Mechanische Belastung | Abtrennbarkeit | |
| Stretchfolie | rot | rot | rot | gelb | (0,1 - 1) 0,32 |
| Ballennetz | rot | gelb | rot | rot | (0,1 - 1) 0,32 |
| Erntegarn | rot | rot | rot | gelb | (0,1 - 1) 0,32 |
| Mantelfolie | rot | gelb | rot | rot | (0,1 - 1) 0,32 |
| Siloflachfolie | gelb | rot | gelb | grün | (0,01 - 0,1) 0,032 |
| Unterziehfolie | gelb | rot | rot | gelb | (0,1 - 1) 0,32 |
| Beschichtung | rot | rot | rot | rot | (1 - 10) 3,2 |
| Silogitter/ Abdeckvlies | rot | rot | rot | grün | (0,01 - 0,1) 0,032 |

Tab. 09 Qualitativer Vergleich und Abschätzung von Emissionsraten für Polymeremissionen aus der Futtermittelproduktion (rot = verstärkt die Emission deutlich, gelb = verstärkt die Emission geringfügig, grün = eher kein Einfluss auf die Emission)

Als Referenzwert für die Schätzung der Verlustrate wurde die in Kapitel 8.1 bestimmte durchschnittliche Litteringrate von 0,105 % verwendet. Sie dient als Bezugswert für eine sinnvolle Schätzung. Eine spezifische Berücksichtigung von Ereignissen wie Vandalismus, illegale Entsorgung, Extremwetterereignisse, sowie Nutzung über die Lebensdauer hinaus sind in dieser Verlustrate subsumiert. Die Annahme eines entsprechend geringen Verbleibs von Kunststoff-Litter in der Umwelt bedeutet gleichzeitig auch, dass eine Reinigungsleistung der landwirtschaftlichen Betriebe unterstellt wird, die derjenigen der öffentlichen Infrastrukturreinigung entspricht. Da bei Schätzungen es häufig eher um die richtige Größenordnung, denn eine geringe Differenz geht, wurde der geometrische Mittelwert statt des arithmetischen Mittelwertes verwendet.

Bei den meisten Folienanwendungen schätzen wir, dass die Emissionsrate leicht oberhalb der durchschnittlichen Litteringrate liegt, da die Anwendungen in der Regel außerhalb befestigter Infrastrukturen stattfinden und einem starken Witterungs- und Medieneinfluss (Sickersäfte) unterliegen. Die Folien, Netze und Garne werden bei der Nutzung und durch Windböen stark mechanisch beansprucht. Gelegentlich sind Folien, Netze und Garne nur schwer vom Erntegut zu trennen. Es wird weiterhin angenommen, dass die Emissionen direkt auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen verbleiben oder ihnen über den Wirtschaftsdünger

¹⁴³ Der Basiswert ist das geometrische Mittel aus Minimum und Maximum der Spannweite.

wieder zugeführt werden. Eine potenzielle Rückgewinnung durch Reinigungsmaßnahmen ist in den Verlustraten bereits berücksichtigt.

Insgesamt lassen sich so die Kunststoffemissionen durch Folieneinsatz in Futtermittelproduktion und energetischerenergetische Biomassenutzung auf ca. 376 t/a (Basiswert) abschätzen (Tab. 10). Der größte Teil dieser Emissionsabschätzung resultiert allerdings aus der Beschichtung von Böden und Wände von Fahrsilos. Unter Verwendung der Spannbreite für die Freisetzungsraten ergibt sich eine Spannbreite für die Emissionen von 118 bis 1017 Tonnen pro Jahr (detaillierte Berechnung in Kapitel 9).

| Kulturtyp | Anwendung | Polymertyp, Schichtdicke, [μm], spez. Gewicht [m/kg bzw. g/m ²], Lebensdauer [a] | Jährliche Ver- brauchsmenge [t/a] | Polymer- emission [t/a] |
|---|----------------|---|---|----------------------------------|
| Futterbau (Rind, Schaf, Ziege, Pferd) | Stretchfolie | LDPE, 20 μm , 1 a | 17 680 | 56,6 |
| | Ballennetz | HDPE, 12 g/lfdm, 1 a | 1725 | 5,6 |
| | Erntegarn | PP, 130 m/kg, 1 a | 7800 | 25,0 |
| | Mantelfolie | LDPE, 18 μm , 1 a | 200 | 0,6 |
| | Siloflachfolie | LDPE, 150 μm , 2 a | 14 400 | 4,6 |
| | Unterziehfolie | LDPE, 40 μm , 1 a | 7500 | 24,0 |
| Futterbau (s. o.) und energetische Biomass- senutzung | Silogitter | HDPE, 250 g/m ² , 6 a | 2300 | 0,7 |
| | Beschichtung | Bitumen, Epoxy, 600 μm , 10 a | 8100 | 259,2 |
| | Abdeckvlies | PP, 150 g/m ² , 6 a | 123 | < 0,1 |
| Gesamt | | | 59 828 (48.000-70.000) | 376,3 (117,5 - 1016,9) |

Tab. 10 Kunststoffverbrauch und -emissionen in Futtermittelproduktion und energetischer Biomassenutzung

Wie zuvor beschrieben, ist die durchgeführte Abschätzung mit Unsicherheiten behaftet. Insbesondere bleibt unklar, inwieweit eine durchschnittliche Litteringquote auf die Landwirtschaft übertragbar ist. Auch die Transportpfade der Emissionen sind komplex und in der Literatur kaum beschrieben. Es ist bspw. denkbar, dass die Fragmente aus Folien und Beschichtungen, wenn sie über das Abwassersystem abtransportiert werden, über den Klärschlamm zurück auf landwirtschaftliche Böden gelangen. Wäre dies der Fall, müssten sie bei der Klärschlamm Bilanzierung berücksichtigt werden (in dieser Studie wurde daher bei der Berücksichtigung der Fremdbestandteile in Klärschlamm darauf verzichtet, um Doppelzählung zu vermeiden, vgl. Kapitel 7.4). Auch die Praktiken bei der Nutzung, Lagerung und Entsorgung von Folien sind sehr heterogen, so dass aus Einzelfällen kaum auf die Gesamtsituation bei den Emissionen geschlossen werden kann. Dies sollte bei der Interpretation und Weiternutzung der Daten entsprechend berücksichtigt werden.

7.1.2 Pflanzenproduktion

7.1.2.1 Kunststoffanwendungen

Neben der Futtermittelproduktion spielen Kunststoffe auch bei der Pflanzenproduktion eine große Rolle. Der Einsatz der Folien wird mit den Qualitätsanforderungen seitens Handel und Verbraucher*innen, mit einer Ausweitung der Anbau- und Erntezeit sowie dem verminderten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln begründet. Auch Trends wie die Nachfrage nach »Superfoods« auf Basis verschiedener Beeren forcieren den Anbau unter Folie. Grundsätzlich lassen sich beim Einsatz von Folien, Vliesen und Netzen in der Pflanzenproduktion die folgenden Ziele unterscheiden:¹⁴⁴

Verfrühen/Verspäten

Mittels durchsichtiger Thermo- oder Lochfolien wird die Wärmeabstrahlung minimiert und die Bodentemperatur angehoben. Die Aussaat kann so früher stattfinden und der Erntezeitraum ausgeweitet werden. Die transparenten Folien können direkt auf den Boden gelegt oder in Foliengewächshäusern und Minitunneln eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu reflektieren weiße Folien die Sonnenstrahlung und verzögern die Erwärmung des Bodens. Dadurch lässt sich die Erntesaison auf einen späteren Zeitpunkt verschieben und eine Überhitzung des Bodens vermeiden. Durch schwarze Folien lässt sich hingegen ebenfalls eine Erwärmung des Bodens erreichen. Die wichtigsten Einsatzgebiete sind der Spargel-, Erdbeer- und Gemüseanbau. Beim Spargelanbau sind auch schwarz/weiße Folien, die gewendet werden können, etabliert.

Schützen

Folien, Vliese und Netze werden auch eingesetzt, um Pflanzen vor Schadinsekten, -milben, Vögeln und Wildtieren zu schützen. Auch gegen Extremwetterereignisse wie Hagel bieten sie Schutz. Dies ist insbesondere im Gemüse- und Obstbau von Bedeutung. Auch hier gibt es Lösungen, bei denen die Kunststoffe direkt auf dem Boden appliziert werden sowie solche, bei denen Minitunnel oder begehbare Tunnel eingesetzt werden.

Mulchen

Das Mulchen wurde ursprünglich mit Rinde, Gras oder anderen Biomassen durchgeführt. ES führt zu einer Verbesserung der Humus- und Stickstoffbilanz, einen Schutz vor Austrocknung, die Unterdrückung des Unkrautwuchses und die Anhebung der Bodentemperatur. Bei Wind und Regen kann Mulchen auch Verschlämmung, Auswaschen und Erosion des Bodens verringern. Vor allem bei Erdbeeren, Spargel und einigen Gemüsekulturen werden heute zum Mulchen zunehmend Folien, Vliese und Bändchengewebe aus Kunststoffen eingesetzt. Ergänzend zu den vorgenannten Gründen für das Mulchen spielt dabei auch die Sauberhaltung des Ernteguts eine wichtige Rolle. Im Gegensatz zu den positiven Erwartungen, die mit dem Folieneinsatz verknüpft werden, gibt es allerdings auch kritische Untersuchungen, die zeigen, dass eine verringerte Versickerung zu größeren Abflussmengen, erhöhter Erosion und einem Verlust an Schädlingsbekämpfungsmitteln führt.¹⁴⁵

¹⁴⁴ Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (2019).

¹⁴⁵ Rice et al. (2001).

Grundsätzlich lassen sich die beschriebenen Anwendungsgebiete häufig nur schwer voneinander isolieren.

7.1.2.2 Eingesetzte Kunststoffmenge

Ausgangspunkt für die Bestimmung der eingesetzten Kunststoffmengen sind Erhebungen der Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau (GKL). Die Daten der GKL basieren auf Schätzungen von regionalen Landwirtschaftsexpert*innen zu den Flächen, auf denen Kunststofffolien eingesetzt werden. Sie sind aufgeschlüsselt nach Region, Kultur- und Folientyp.¹⁴⁶ Für die vorliegende Studie wurden diese Schätzungen auf die gesamte Anbaufläche einer Kulturart in Deutschland unter Verwendung von Anbaudaten des Statistischen Bundesamtes hochgerechnet.¹⁴⁷ Aus Anwendungsempfehlungen sowie Bildauswertungen wurde der übliche Flächenbelegungsgrad abgeschätzt. Den Produktdaten verschiedener Hersteller wurden die eingesetzten Polymertypen, Dichten und typischen Dicken bzw. Flächengewichte entnommen.¹⁴⁸

Der Anbau von Spargel und Erdbeeren verursacht die größten Kunststoffverbräuche. Da im Spargelanbau vor allem dicke, langlebige Folien eingesetzt werden, ist hier die in Anwendung befindliche Gesamtmasse besonders hoch. Quantitativ findet der Anbau von Spargel und Erdbeeren heute nahezu vollumfänglich unter Einsatz von Folie statt. Bei beiden Kulturarten fällt auf, dass die mit Folie bedeckte Fläche größer ist als die gesamte Anbaufläche (Tab. 11). Dies resultiert aus Mehrfachabdeckungen, bei denen beispielsweise Mulchfolien und Folientunnel oder Vliese kombiniert werden. Bei Strauchbeeren und Gemüse (vor allem Gurke, Kürbis, Zucchini, Zuckermais, Rhabarber und Salat) ist der Flächenbelegungsgrad heute noch deutlich niedriger. Es wird aber allgemein eine weitere Ausweitung dieser Praktik auch bei diesen Kulturen erwartet. Insgesamt erreicht die Folien-, Gewebe- und Netzfläche bei Gemüse, Strauchbeeren, Kern- und Steinobst und bei Sonderkulturen wie Spargel und Erdbeeren, heute bereits 50 % der Anbaufläche (Tab. 11).

| Kulturtyp | Anbaufläche gesamt [ha] | Folienfläche [ha] | Flächenbelegungsgrad [%] |
|--------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|
| Gemüseanbau | 105 222 | 27 671 | 26 % |
| Spargel | 23 191 | 37 612 | 162 % |
| Erdbeeren | 11 500 | 16 733 | 146 % |
| Strauchbeeren | 8 868 | 1 224 | 14 % |
| Kern- und Steinobstanbau | 49 934 | 16 593 | 33 % |
| Summe | 198 715 | 99 834 | 50 % |

Tab. 11 Flächenbelegung mit Kunststoffen nach Kulturart

Die aus den GKL-Daten und den statistischen Daten abgeschätzten Mengen sind in Tab. 12 zusammengestellt (für detaillierte Berechnungen siehe Anhang I, Kapitel 9.4). Dabei wurde zwischen in Anwendung befindlichen Gesamtmengen sowie den

¹⁴⁶ <https://www.gkl-online.de/agrar-kunststoffe.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁴⁷ Statistisches Bundesamt (2019d).

¹⁴⁸ Beispielsweise: Firmenich EHMO-TEC® T-Tasche und COVERTAN-PRO®, Wurth Rey Thermal, Hartmann Brockhaus PE Mulchfolie, BASF ecovio® M 2351, FKUR Bio-Flex® FX 1130, GLAESERgrow Gewächshausfolie und Minitunnelfolie, FVG Lochfolie, DM Flachfolie, Masgard® Bändchengewebe, Ökolys® Bändchengewebe.

jährlichen Verbrauchsmengen unterschieden. Beim Anbau von Erdbeeren und Gemüse (vor allem Gurke, Kürbis, Zucchini, Zuckermais, Rhabarber und Salat) werden dünne Folien für eine Saison aus LDPE in Form von Mulch-, Loch- und Thermofolien eingesetzt. Dickere und damit reißfestere Folien, die mehrjährig eingesetzt werden, sind die schwarz-weißen Wendefolien (LDPE), die vor allem beim Spargelanbau genutzt werden. Darüber hinaus werden transparente Flachfolien (LDPE) für Minitunnel und Gewächshäuser verwendet, die sowohl beim Anbau von Erdbeeren, Spargel, Gemüse als auch von Strauchbeeren verwendet werden. Nicht selten werden verschiedene Folientypen in mehrlagigen Systemen kombiniert. Beim Mulchen finden auch Bändchengewebe (PP, teilweise vernetzt, dann als PPX bezeichnet) ihren Einsatz. Diese sind deutlich dicker, aber auch länger nutzbar. Zum Verfrühen werden statt Folien auch Vliese aus PP verwendet. Beim Anbau von Kern- und Steinobst finden vor allem mehrjährige Schutznetze vorwiegend aus HDPE gegen Hagel, Vögel und Insekten Verwendung. Je länger Folien, Gewebe oder Netze nutzbar sind, desto geringer ist die jährliche Verbrauchsmenge im Vergleich zur Gesamtmasse in Anwendung.

| Kulturtyp | Anwendung | Polymertyp, Charakteristik [μm , m/kg, g/m ²], Lebensdauer [a] | Jährliche Verbrauchsmenge [t/a] |
|---------------|---------------------------------|---|------------------------------------|
| Spargel | Verfrühung/Unkrautunterdrückung | LDPE, 50-120 μm , 2 - 8 a | 7 503 |
| Erdbeeren | Verfrühung/Unkrautunterdrückung | Folie LDPE/PLA/TS, 15-70 μm , 1-2 a Vlies PP, 24 μm , 2 a Gewebe PP(X), 105 μm , 5 a | 3 028 |
| | Schutzsysteme | Folie LDPE, 200 μm , 5 a Netze HDPE, 48 μm , 10 a | 583 |
| Gemüseanbau | Verfrühung/Unkrautunterdrückung | Folie LDPE/PLA/TS, 15-70 μm , 1-2 a Vlies PP, 24 μm , 2 a | 2 755 |
| | Schutzsysteme | Folie LDPE, 200 μm , 5 a Netze HDPE, 48 μm , 10 a | 625 |
| Strauchbeeren | Verfrühung/Unkrautunterdrückung | Folie LDPE/PLA/TS, 15-70 μm , 1-2 a Vlies PP, 24 μm , 2 a Gewebe PP(X), 105 μm , 5 a | 77 |
| | Schutzsysteme | Folie LDPE, 200 μm , 5 a Netze HDPE, 48 μm , 10 a | 224 |
| Kernobst | Schutzsysteme | Folie LDPE, 200 μm , 5 a Netze HDPE, 48 μm , 10 a | 813 |
| Steinobst | Schutzsysteme | Folie LDPE, 200 μm , 5 a Netze HDPE, 48 μm , 10 a | 401 |
| Gesamt | | | 16 008 (12.000 – 20.000) |

Tab. 12 Kunststoffverbrauch bei der Pflanzenproduktion

In Tab. 13 sind die eingesetzten Mengen nach Folientyp aufgeschlüsselt, zusätzlich ist die sich aus der Lebensdauer ergebende Gesamtmenge dargestellt. Alternativ zu konventionellen, nicht bioabbaubaren Kunststoffen hat sich auch der Einsatz von bioabbaubaren Kunststoffen für Mulchfolien etabliert. Aus den Daten der GKL kann die Menge der bioabbaubaren Mulchfolien zu ca. 129 t/a entsprechend ca. 7 % der Gesamtmenge abgeschätzt werden. Diese Folien können nach der Nutzung auf der Anbaufläche verbleiben und untergepflügt werden und sollten im Idealfall in kurzer Zeit vollständig abgebaut werden. Ob die Abbaurate den Anforderungen und Erwartungen gerecht wird, ist umstritten. Als Biokunststoffe kommen vor allem Composites auf Basis von PLA und thermoplastischer Stärke zum Einsatz.

| Folientyp | Jährlicher Folienverbrauch [t/a] | Lebensdauer [a] | Gesamtmasse der in Anwendung befindlichen Folie [t] |
|----------------------------|------------------------------------|-----------------|---|
| Schutzsysteme (Folien) | 1 489 | 5 | 7 446 |
| Schutzsysteme (Netze) | 1 156 | 10 | 11 557 |
| Mulchfolie (konventionell) | 1 691 | 1 | 1 691 |
| Mulchfolie (abbaubar) | 129 | 1 | 129 |
| Flachfolie (Spargel) | 4 994 | 6 | 29 961 |
| Bändchengewebe | 85 | 5 | 424 |
| Vliese | 1 843 | 2 | 3 686 |
| Thermo- und Lochfolie | 2 646 | 1 | 2 646 |
| Minitunnel | 1 976 | 3 | 5 928 |
| Gesamt | 16 008 (12.000 – 20.000) | | 63 468 |

Tab. 13 Kunststofffolienmasse nach Art der Anwendung

7.1.2.3 Kunststoffemissionen

Kunststoffemissionen aus Folien, Vliesen und Netzen im Pflanzenbau sind nicht intendiert. Jedoch sind Mulchfolien häufig sehr dünn, werden geschlitzt oder gelocht, um Samen oder Setzlinge einzubringen, und perforiert, um das Durchdringen von Niederschlagswasser zu erlauben. Zur Fixierung werden die Folien an den Rändern mit Erde überdeckt. All diese Punkte begünstigen Reißen und Fragmentierung und erschweren die Bergung. Während der Wachstumsphase werden die Mulchfolien von den Pflanzen durchdrungen, auch dies kann die spätere Trennung von Pflanze und Folie erheblich beeinträchtigen (Abb. 12).

Das Bergen der Folie, welches im Gegensatz zum Verlegen bislang nicht vollständig automatisiert werden kann, ist sehr personalintensiv und mit hohen Kosten verbunden. Für viele landwirtschaftliche Betriebe ist daher der Einsatz biologisch abbaubarer Folien attraktiv.¹⁴⁹ Sind die lokalen Bedingungen für einen biologischen Abbau nicht optimal, können die Folienreste allerdings deutlich länger als erwartet im Boden präsent sein. Die Abbauphase kann je nach Boden und mikroklimatischen Gegebenheiten sehr stark schwanken. Vor allem bei PLA sind die experimentell ermittelten Abbauphasen und -grade in Abhängigkeit vom Umweltmilieu und den abbauenden Organismen bislang sehr unterschiedlich und variieren zwischen fast vollständigem Abbau in 180 Tagen und nahezu keinem Abbau innerhalb eines Jahres.¹⁵⁰ Gegebenenfalls besteht durch das gleichzeitige Vorhandensein von abbaubarer und konventioneller Folie am Markt eine Verwechslungsgefahr, sodass konventionelle Folien versehentlich untergepflügt werden.

¹⁴⁹ Eigene Berechnung mit dem Mulchfolienrechner der HS Weihenstephan: <https://www.gartenbausoftware.de/mulchfolienrechner.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁵⁰ Adhikari et al. (2016).



Abb. 12 Folien im Pflanzenbau: a) PLA-Mulchfolie¹⁵¹ b) weiße Mulchfolie¹⁵² c) maschineller Einbau von Mulchfolie¹⁵³ d) Spargel unter Folie¹⁵⁴ e) Vlieseinsatz beim Gemüseanbau¹⁵⁵ f) zerrissene Folie¹⁵⁶

Im Zusammenhang mit Emissionen aus Mulchfolien gibt es vor allem Untersuchungen in China. Zhang et al. haben den Verbleib auf landwirtschaftlichen Flächen detailliert untersucht.¹⁵⁷ 2013 wurden in China 180 000 Tonnen Mulchfolien auf 2 700 000 Hektar eingesetzt. Von den untersuchten Flächen wiesen 60,7 % nicht geborgene Kunststoffreste über 75 kg/ha auf. Die kumulierten Gesamteinträge in ca. 30 Jahren mit stetig zunehmender Folienanwendung beliefen sich auf ca. 340 000 Tonnen. Die jährlichen Kunststoffemissionen pro Fläche betragen ca. 8 bis 10 kg/ha entsprechend ca. 10 % der eingesetzten Folien. Im Vergleich zur Praxis in

¹⁵¹ Wikipedia, Kesselring 2009, CC BY-SA 3.0.

¹⁵² Wikipedia, Gerlach 2008, CC BY-SA 3.0.

¹⁵³ Wikipedia, Flickr, Dwight Sipler 2009; CC BY 2.0.

¹⁵⁴ Wikipedia, Zumthie 2007, gemeinfrei.

¹⁵⁵ Pixabay-Lizenz.

¹⁵⁶ Katharina Istel, 03.05.2021

¹⁵⁷ ZHANG et al. (2016).

Deutschland werden in China jedoch sehr dünne Folien (< 10 µm) eingesetzt, insbesondere bei hoch intensiven Anwendungen wie Baumwolle und Mais. Die Studie von Zhang et al. zeigt auch, dass dickere und damit stabilere Folien die Emission deutlich senken.

Neben den Mulchfolien werden im geringeren Umfang auch wasserdurchlässige Bändchengewebe eingesetzt. Sie sind deutlich dicker und werden über mehrere Jahre genutzt. Nichtsdestotrotz können sie an den Rändern ausfransen; die übliche Befestigung mit Bodennägeln aus Kunststoff kann dies begünstigen.¹⁵⁸

Im Gegensatz zu den Mulchfolien (15 bis 70 µm) sind Spargelfolien deutlich dicker (50 bis 120 µm). Sie haben in der Regel eine schwarze Seite zur Ernteverfrühung und eine weiße Seite, um in der späten Saison die Überhitzung und Austrocknung des Bodens zu unterbinden. Der Wechsel der Seiten wird bei kleineren Anbauflächen händisch, bei großen maschinell durchgeführt. Die Folien werden 2 bis 8 Jahre verwendet und zur Ernte aufgerollt oder angehoben (Spargelspinne). Beim maschinellen Heben und Wenden können die Folien hin und wieder auch reißen.¹⁵⁹

Werden Folien zu lange angewendet und nicht rechtzeitig geborgen, können sie verwittern und porös werden.¹⁶⁰ Um dies zu unterbinden, werden die Folien in der Regel UV-stabilisiert.¹⁶¹ Allerdings verbraucht sich der UV-Schutz;¹⁶² so wird beispielsweise für Mulchfolien eine Nutzungsdauer von ein bis drei Jahren angegeben.¹⁶³ Werden die Folien über die empfohlene Nutzungsdauer hinaus verwendet, ist es daher nicht unwahrscheinlich, dass sie reißen und fragmentieren. Darüber hinaus sind auch Beschädigungen der Folien, Netze und Vliese durch Vandalismus, Wildtiere, Unwetter sowie die illegale Entsorgung und unsachgemäße Anwendung in Einzelfällen dokumentiert.¹⁶⁴

Vertiefende empirische Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Folien, Vliesen und Netzen in der Pflanzenproduktion, aus denen sich Emissionsraten ableiten lassen, existieren bisher nicht (Ausnahme China, s. o.). Die Berechnung aus Stoffbilanzen oder aus Bodengehalten ist analog zur Situation bei Folien in der Futtermittelproduktion aufgrund der Datenlage nicht möglich.

Eine quantitative Abschätzung der Emissionen kann sich daher zum jetzigen Zeitpunkt nur auf qualitative Argumente stützen. In Tab. 14 werden die Umweltoffenheit, der Witterungs- und Medieneinfluss sowie die mechanische Belastung, der Folien, Vliese, Gewebe und Netze ausgesetzt sind, analog zur Vorgehensweise bei den Folien im Futterbau verglichen und bewertet. Insbesondere das Durchwachsen und Einbinden der dünnen Mulchfolien in den Boden sehen wir kritisch.

¹⁵⁸ <https://eurovlies-deutschland.de/produkte/15-produkte/91-bodenabdeckvlies.html#>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁵⁹ <https://www.saechsische.de/spargelbauern-gegen-folien-verbot-3664446.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁶⁰ <https://www.maz-online.de/Lokales/Potsdam-Mittelmark/Gross-Kreutz/Alte-Spargelfolie-lagert-am-Wald-von-Deetz>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁶¹ [https://agriculture.basf.com/global/assets/en/Crop%20Protection/agricultural-films/Agriculture_2016_Final%20\(2\).pdf](https://agriculture.basf.com/global/assets/en/Crop%20Protection/agricultural-films/Agriculture_2016_Final%20(2).pdf), letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁶² <https://www.dm-folien.com/shop/silofolie-4-x-25-m-150my>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁶³ <http://www.firmenich.de/katalog.pdf>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁶⁴ <https://pfaffenhofen-today.de/37854-ppaf-28042017>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

| Folientyp | Kriterium | | | | Schätzung zur Verlustrate [%] |
|------------------------------------|------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------------|
| | Umwelt-offenheit | Witte-rungs-/Medien-einfluss | Mechani-sche Be-lastung | Abtrenn-barkeit | |
| Mulchfolien | [Red] | | | | (1 - 10) 3,2 |
| Vliese | [Red] | [Red] | [Yellow] | [Green] | (0,1 - 1) 0,32 |
| Thermo- und Lochfolien | [Red] | [Red] | [Yellow] | [Green] | (0,1 - 1) 0,32 |
| Bändchengewebe | [Red] | [Red] | [Red] | [Green] | (0,1 - 1) 0,32 |
| Flachfolien (insbesondere Spargel) | [Red] | [Red] | [Green] | [Green] | (0,1 - 1) 0,32 |
| Folien, Netze für Tunnel | [Red] | [Yellow] | [Yellow] | [Green] | (0,01 - 0,1) 0,032 |

Tab. 14 Qualitativer Vergleich und Abschätzung der Freisetzungsraten zu den Kunststoffemissionen (rot = verstärkt die Emission deutlich, gelb = verstärkt die Emission geringfügig, grün = eher kein Einfluss auf die Emission)

Als Referenzwert wurde die in Kapitel 8.1 bestimmte durchschnittliche Litteringrate von 0,105 % verwendet. Bei den meisten Folienanwendungen mit direktem Bodenkontakt schätzen wir, dass die Emissionsrate leicht oberhalb dieser Litteringrate liegt. Im Weiteren gehen wir davon aus, dass die Emissionen direkt auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen verbleiben.

Zur Bestimmung der Emissionsmengen werden im Gegensatz zum Vorgehen bei der Futtermittelproduktion, die Freisetzungsraten auf die in Anwendung befindliche Masse bezogen, um der erwartbaren verstärkten Emissionen bei langen Nutzungsdauern gerecht zu werden. Insgesamt lassen sich so die Kunststoffemissionen durch Folieneinsatz in der Pflanzenproduktion auf ca. 180 Tonnen pro Jahr (Sapnbreite 56 bis 561; vgl. Tab. 15) abschätzen. Dabei wurde für die bioabbaubaren Folien vollständiger Abbau unterstellt und dementsprechend keine Emission angenommen.¹⁶⁵

Den größten Teil der Emissionen erwarten wir von den Flachfolien gefolgt von den Mulchfolien. Weitere nennenswerte Emissionen sind von Vliesen sowie Thermo- und Lochfolien zu erwarten. Bei allen Folientypen dürften die Emissionen deutlich zunehmen, wenn sie oberhalb ihrer empfohlenen Lebensdauer eingesetzt werden.

Bezieht man die emittierte Menge auf die Fläche, so erhält man die jährlichen Flächeneinträge. Hier dominieren die Emissionen aus Mulchfolie deutlich vor denen aus Flachfolie und Bändchengewebe. Die durchgeführte Abschätzung basiert nicht auf empirischen Daten, sondern vor allem auf Annahmen und Schätzungen. Inwieweit eine durchschnittliche Litteringquote auf Folien, die direkt und intendiert im Bodenkontakt eingesetzt werden, übertragbar ist, ist dementsprechend unsicher.

¹⁶⁵ Im Gegensatz dazu wurde bei allen sonstigen Quellen, keine ausreichende Abbaubarkeit unterstellt. Letztlich sind diese Aspekte in weiteren Forschungsarbeiten zu überprüfen. Bioabbaubare Polymere/Kunststoffe haben bislang aber keine relevanten Marktanteile, so dass sich das Ergebnis dieser Studie dadurch kaum ändern würde.

Legt man die chinesischen Daten zugrunde, so scheinen die Daten in realistischer Größenordnung.

| Folientyp | Polymeremission nach Folientyp [t/a] | Gesamtfläche der eingesetzten Folie [ha] | Jährlicher Flächeneintrag [kg/(ha a)] |
|----------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------------|
| Schutzsysteme (Folien) | 2,38 | 3 919 | 0,61 |
| Schutzsysteme (Netze) | 3,70 | 25 344 | 0,15 |
| Mulchfolie (konventionell) | 54,12 | 6 486 | 8,34 |
| Flachfolie (Spargel) | 95,87 | 26 281 | 3,65 |
| Bändchengewebe | 1,36 | 424 | 3,20 |
| Vliese | 11,79 | 16 031 | 0,74 |
| Thermo- und Lochfolie | 8,47 | 5 571 | 1,52 |
| Minitunnel | 1,90 | 8 914 | 0,21 |
| Gesamt | 179,6 (56 - 561) | | |

Tab. 15 Kunststoffemissionen nach Art der Anwendung in der Pflanzenproduktion

7.1.3 Daten im Vergleich

Zeitgleich zur Bearbeitung dieser Studie erschienen Studien zum Mengenaufkommen bei Agrarkunststoffen seitens der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung (GVM) und von Eunomia Research and Consulting Ltd.^{166, 167} Beide Studien teilen die Folien ebenfalls in solche für den Futtermittel- und Gemüseanbau ein. Im Gegensatz zur vorliegenden Studie versucht keine der beiden Studien, die Emissionsraten als Folge der Kunststoffverwendung abzuschätzen.

Die GVM bezieht sich analog zur vorliegenden Studie auf die Datenbasis seitens der GKL-Expert*innenbefragung/Expertenbefragung.¹⁶⁸ Es wurden gleichfalls verschiedene Folientypen, Mehrfachabdeckungen und die unterschiedliche Lebensdauer berücksichtigt. Zusätzlich wurden Folienanwendungen bei weiteren Kulturtypen einbezogen, die in den GKL-Daten und der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt wurden. Dies sind bspw. Frühkartoffeln, Ziergehölze und Blumen.

Auch das Vorgehen bei der Bestimmung der Mengen im Futterbau und der energetischen Biomassenutzung ist weitgehend identisch. Im Wesentlichen findet sowohl bei GVM als auch in der vorliegenden Studie die Abschätzung über die seitens des Statistischen Bundesamtes publizierten Mengen für Silage und Heu statt. Im Weiteren wurden Annahmen zur Verteilung zwischen Fahrсило und Ballensilage, zur Größe der Silageeinheiten und zur Verteilung verschiedener Verpackungsoptionen getroffen. An dieser Stelle differenziert die vorliegende Studie etwas stärker als die GVM-Studie, indem bspw. auch Unterziehfolie, Abdeckgitter und Mantelfolien separat ausgewiesen werden. Andererseits wird in der GVM-Studie zusätzlich auch die Folienanwendung bei Pressschnitzeln berücksichtigt. Auch wenn sich die Gesamtmenge beider Studien um weniger als 7% unterscheidet, sind in den einzelnen

¹⁶⁶ Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (2020).

¹⁶⁷ Sherington und Bradley, C. Hann, S. (2020).

¹⁶⁸ Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau e.V. (2020).

Positionen und im Detaillierungsgrad doch deutlich Unterschiede erkennbar (vgl. Tab. 16). Gründe für die Unterschiede können in einer unterschiedlichen Interpretation der GKL-Daten, in unterschiedlichen Annahmen bei den Folienparametern (Flächengewichte, Nutzungsdauer) sowie in der Anzahl der berücksichtigten Kulturen begründet sein. Hier besteht zukünftig Bedarf an einer verbesserten Datengrundlage.

Eunomia berichtet im Gegensatz zur Studie von GVM und zur vorliegenden Studie keine Verbrauchs-, sondern Verkaufsmengen auf EU-Ebene, basierend auf Daten von Agriculture Plastics Environment (APE) Europe. Wie diese Daten genau erhoben werden, ist nicht bekannt. Allerdings verweist APE Europe darauf, dass es sich um Näherungswerte handelt. Für Deutschland gibt APE Europe eine Verkaufsmenge von 70.000 Tonnen pro Jahr für das Jahr 2018 an.¹⁶⁹ In welcher Relation bei einem internationalen Marktgeschehen die Verkaufs- und Verbrauchsmengen insbesondere in Bezug auf die nationalen Märkte zusammenhängen, ist bislang nicht untersucht.

| Anwendung | Diese Studie [t/a] in D | GVM [t/a] in D | Eunomia [t/a] in EU |
|---------------------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| Fahrsilo-Abdeckfolien | 14 400 | | |
| Unterziehfolien | 7 500 | 26 458 | 121 000 |
| Silogitter | 2 300 | n. b. | n. b. |
| Stretchfolien | 17 680 | | |
| Mantelfolien (Netzersatzfolien) | 200 | 16 158 | 146 000 |
| Ballennetze (Wickelnetze) | 1 725 | 7 432 | 50 000 |
| Silobeschichtung | 8 100 | n. b. | n. b. |
| Abdeckvlies | 123 | n. b. | n. b. |
| Erntegarn (Pressgarn) | 7 800 | 6 879 | 80 000 |
| Schutzsysteme (Folien) | 1 489 | | 117 000 |
| Schutzsysteme (Netze) | 1 156 | 3 607 | 4 500 |
| Mulchfolie | 1 820 | 5 663 | |
| Flachfolie (Spargel u. a.) | 4 994 | 7 490 | 77 000 |
| Thermo- und Lochfolie | 2 646 | 3 247 | |
| Bändchengewebe | 85 | n. b. | n. b. |
| Vliese | 1 843 | 3 435 | 5 000 |
| Minitunnel | 1 976 | 597 | 56 300 |
| Gesamt | 75 836 (60.000 – 90.000) | 81 146 | 708 000 (D: 70 000) |

Tab. 16 Vergleich der Daten der vorliegenden Studie mit denen von GVM (Verbrauchsmengen) und Eunomia (Verkaufsmenge)

¹⁶⁹ <https://apeeurope.eu/statistics/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

7.1.4 Rechtliche Situation

Regulierungen, die potenzielle Mikroplastikeinträge durch Aufbringung, Verbleib und nachfolgende Verwitterung spezifisch für Bahnenware wie Folien, Netze, Garne und Vliese regeln, existieren nicht. Bahnenware, die zu Abfall wird, fällt in den Geltungsbereich des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) und der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfVO)(siehe Anhang III, Kapitel 11.1).

Das Aufbringen von Bahnenware auf den Boden sowie der Verbleib fallen in den Geltungsbereich des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG)¹⁷⁰ und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)¹⁷¹, sofern das Aufbringen und der Verbleib schädliche Bodenveränderungen zur Folge haben (siehe Anhang III, Kapitel 11.2). Bisher gehören Makro- und Mikroplastik jedoch nicht zu den hier explizit aufgeführten Schadstoffen.

Die rechtlichen Anforderungen sehen vor, dass Bahnenware wie Folien, Vliese, Garne und Netze nicht im oder auf dem Boden verbleiben darf, wenn diese gemäß § 3 KrWG zu Abfall geworden ist. Vielmehr muss die Bahnenware als Kunststoffabfall gemäß § 3 Abs. 1 GewAbfVO getrennt gesammelt und der Verwertung zugeführt werden. Diese Rechtspflicht richtet sich an die erzeugende oder besitzhabende Person der zu Abfall gewordenen Bahnenware; also in aller Regel an die Bahnenware einsetzende Landwirtschaft betreibende Person.

Wenn Folien, Vliese, Netze und Garne zu Abfall werden, ergibt sich also aus KrWG und der GewAbfV unmittelbar eine Rechtspflicht, diese der Verwertung zuzuführen und somit aus dem Boden bzw. von der Bodenoberfläche zu entfernen. Jedoch besteht hier die Schwierigkeit zu bestimmen, ob es sich entsprechend der Legaldefinition um Abfall handelt oder nicht (siehe hierzu Ausführungen in Anhang III, Kapitel 11.1). Daher hätten die entsprechenden Bestimmungen dieser beiden Rechtsakte zwar grundsätzlich das Potenzial, die Verbleibsmengen von Bahnenware in oder auf Böden zu reduzieren; sie finden nach aktuellem Kenntnisstand der Autor*innen in der Praxis und im Vollzug jedoch kaum bis gar keine Anwendung. Eine Zusammenfassung der rechtlichen Anforderungen findet sich in Tab. 17 .

¹⁷⁰ Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502) zuletzt geändert durch Artikel 3 Absatz 3 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465).)

¹⁷¹ Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554) zuletzt geändert durch Artikel 3 Absatz 4 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465).)

| Relevante Rechtsakte | Anforderungen |
|---|--|
| Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) ¹⁷² Gewerbeabfallverordnung (GewAbfVO) ¹⁷³ | Bahnenware darf nicht im oder auf dem Boden verbleiben, wenn diese gemäß § 3 KrWG zu Abfall geworden ist, sondern muss als Kunststoffabfall gemäß § 3 Abs. 1 GewAbfVO getrennt gesammelt und der Verwertung zugeführt werden |
| Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) ¹⁷⁴ Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) ¹⁷⁵ | Keine Anforderungen bezüglich Makro- und Mikroplastik |

Tab. 17 Bahnenware (Folien, Vliese, Netze, Garne): Relevante Rechtsakte und rechtliche Anforderungen

7.1.5 Freiwillige Systeme und Standards

Für bestimmte Arten von Bahnenware (Silo-, Unterzieh-, Stretch und Mantelfolie) hat sich das Rücknahmesystem »ERDE« etabliert.¹⁷⁶ Das System wird von Herstellern und Erstvertreibern, die in den deutschen Markt liefern, finanziert und von der RIGK GmbH betrieben. Initiiert und realisiert wurde es von der Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e. V. Landwirt*innen und Lohndienstleistungsunternehmen können Abfallfolien an Sammelstellen abgeben; dafür wird eine Gebühr erhoben, die die Sammelstelle festlegt. 2018 sammelte ERDE 13 433 Tonnen, 2019 bereits 20 534 Tonnen Altfolien. Die bisherigen jährlich in Verkehr gebrachten Mengen schätzt ERDE für Silo- und Stretchfolie auf 43 000 Tonnen, für Pressgarne auf 7000 Tonnen und für Ballennetze auf 5800 Tonnen (die von den Autor*innen dieser Studie ermittelten Werte weichen davon insbesondere bei den Ballennetzen ab (vgl. Kap. 7.1.3)). Die Erntekunststoffe, die über ERDE zurückgenommen werden, sind in zwei Fraktionen aufgeteilt, die getrennt gesammelt werden. Folien müssen besenrein und von grobem Schmutz befreit sein; es dürfen keine Fremdmaterialien (zum Beispiel Eisen, Holz oder Reifen) enthalten sein. Bei der Abgabe spielt es keine Rolle, wo das Produkt gekauft wurde oder von welcher Marke es stammt. Die gesammelten Kunststoffe werden zerkleinert, gewaschen und über die stoffliche Verwertung zu Regranulat eingeschmolzen.

¹⁷² Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808).

¹⁷³ Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV) vom 18. April 2017 (BGBl. I S. 896), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 3 des Gesetzes vom 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234).

¹⁷⁴ Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502) zuletzt geändert durch Artikel 3 Absatz 3 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465).

¹⁷⁵ Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554) zuletzt geändert durch Artikel 3 Absatz 4 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465).

¹⁷⁶ <https://www.erde-recycling.de/ueber-erde/was-ist-erde.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

In den Richtlinien der Bio-Anbauverbände Bioland¹⁷⁷, Demeter¹⁷⁸ und Naturland¹⁷⁹ finden sich Vorgaben zur Verwendung von Abdeckmaterialien. Demeter verbietet den Einsatz von PVC und schreibt vor, dass mehrfach gebrauchsfähige oder verrottbare Materialien wie Baumwolle, Flachsmatten, Mulchpapier oder Folien aus nachwachsenden Rohstoffen bevorzugt werden sollten. Naturland und Bioland erlauben nur Folien aus Polyethylen oder Polypropylen. Auch werden in den Richtlinien von Demeter landwirtschaftlichen Praktiken, die ohne den Einsatz von Folien auskommen, Vorrang eingeräumt (bspw. organisches Mulchen statt Abdecken mit Folien). Hier heißt es: »Organisches Mulchen ist ein dem Biologisch-Dynamischem Landbau entsprechendes Verfahren, das zur Verbesserung der Bodenfauna führt. Es ist dem Abdecken mit Folien etc. vorzuziehen.«¹⁷⁸.

7.1.6 Maßnahmenvorschläge zur Reduktion der Einträge

7.1.6.1 Alternative Praktiken und (Werk-)Stoffe

Bei der Futtermittelproduktion mittels Ballensilage oder Fahrsilo ist der luftdichte Abschluss für eine ordnungsgemäße und keimfreie Fermentation von großer Bedeutung. Versuche einer folienfreien Silierung, die sich in die moderne landwirtschaftliche Produktion integrieren lässt, sind bislang wenig erfolgreich¹⁸⁰ oder noch im Entwicklungsstadium.¹⁸¹⁻¹⁸² Nichtsdestotrotz erscheinen die Strategien zur Abdeckung mit Biomasse wie Sudangras, Ölrettich oder Einsaaten von Getreide, Raps oder Ackerbohnen eine interessante Perspektive. Auch die Entwicklung von spritzfähigen Systemen auf Basis nachwachsender Rohstoffe, aus denen sich gut abbaubare Werkstoffe ergeben, scheint vielversprechend. Die notwendigen FuE-Arbeiten sollten intensiviert werden. Gleichzeitig ist aber kritisch zu prüfen, ob die alternativen werkstofflichen Lösungen zu Nachteilen bei der Produktqualität oder zu Produktionsverlusten führen und wie diese aus ökologischer Sicht gegenüber einer Minderung der Kunststoffemissionen zu bewerten sind.

Eine Vermeidung von Makro- und Mikroplastikeinträgen durch den Einsatz von Bahnenware in der Pflanzenproduktion ist durch alternative (ökologische) landwirtschaftliche Praktiken (so wie das von Demeter verlangte organische Mulchen statt dem Einsatz von Mulchfolien) und den Einsatz von Bahnenware aus alternativen Materialien möglich. Demeter fordert hier beispielsweise die bevorzugte Verwendung von verrottbaren Materialien wie Baumwolle, Flachsmatten oder Mulchpapier.

¹⁷⁷

https://www.bioland.de/fileadmin/user_upload/Verband/Dokumente/Richtlinien_fuer_Erzeuger_und_Hersteller/Bioland_Richtlinien_25_Nov_2019.pdf, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁷⁸ <https://www.demeter.de/leistungen/zertifizierung/richtlinien#richtlinien-erzeuger>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁷⁹ https://www.naturland.de/images/Naturland/Richtlinien/Naturland-Richtlinien_Erzeugung.pdf, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁸⁰ <https://www.topagrar.com/acker/aus-dem-heft/biogassilage-ohne-folie-lohnt-das-9729139.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁸¹

<https://www.ardmediathek.de/br/player/Y3JpZDovL2JyLmRlL3ZpZGVvLzgzNDlhOTM2LWE3MwQtNDU4Ni1iMjYyLjc2MwQ4ODM2YTU5MQ/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁸² Uhl et al. (2011).

Auch bioabbaubare Kunststoffe werden als Alternative diskutiert (vgl. Kapitel 12). Hier kommen beispielsweise Folien aus PLA oder thermoplastischer Stärke (vgl. Abschnitt 7.1.2.2) oder auch Polybutyrat-Adipat-Terephthalat (PBAT) in Frage. In einer Studie der ETH Zürich wurden Mulchfolien aus PBAT bezüglich ihres Abbauverhaltens in landwirtschaftlichen Böden hin untersucht¹⁸³ und nachgewiesen, dass Bodenmikroorganismen die PBAT-Folien mineralisieren und Kohlenstoff aus dem Polymer in ihre Biomasse überführen¹⁸⁴. Insgesamt bestehen jedoch noch Wissenslücken über das Abbauverhalten der verfügbaren bioabbaubaren Mulchfolien unter realen Bedingungen. Einige aktuelle Forschungsprojekte adressieren diese Wissenslücken.^{185, 186} Der Anteil abbaubarer Mulchfolien wird aktuell auf ca. 7 % geschätzt.

Im Gegensatz zur gewünschten Bioabbaubarkeit nach Nutzungsende ist die Verwitterung und Versprödung der Folien in der Nutzungsphase unerwünscht. Es stellt sich insbesondere die Frage, ob und wie rechtzeitig – bevor ein vollständiges Bergen nicht mehr möglich ist – bemerkt wird, dass die Folien bei Nachlassen des UV-Schutzes verspröden und fragmentieren. Auch die Übertragbarkeit der Werte zum UV-Schutz auf eine große Zahl unterschiedlicher Anwendungssituationen ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Untersuchungen unter realitätsnahen Anbaubedingungen sind daher erforderlich. Schulungen, eindeutige Kennzeichnungen und im Praxiseinsatz bestätigte technische Daten sind wichtig, um die Emissionen zu reduzieren.

Aus chinesischen Untersuchungen zeigt sich zudem, dass dickere Folien tendenziell zu weniger Rückständen führen.¹⁵⁷ Hier sind die Kunststoffemissionen aber zunächst gegen andere Umweltwirkungen wie Erhöhung von Ressourcenbedarf, Treibhausgasemissionen etc. abzuwägen.

7.1.6.2 Weiterentwicklung rechtlicher Instrumente und bestehender Rücknahmesysteme

Die Einträge von Makro- und Mikroplastik in die Umwelt aus dem Einsatz von Bahnenware in der Landwirtschaft ergeben sich durch unsachgemäße Entsorgung, Verwitterung, Verwehung etc. Dies erfolgt jedoch in vergleichsweise geringem relativen Maßstab. Beim Littering handelt es sich um ein Defizit, das sich im Prinzip durch einen effektiveren und konsequenten Vollzug des Kreislaufwirtschaftsrechts adressieren ließe, wobei sich hier in der Praxis die Frage der Verhältnismäßigkeit (Kosten zu Nutzen) stellt. Strengere und häufigere Kontrollen durch Vollzugsbehörden dürften sich zwar grundsätzlich eignen, um Fälle unsachgemäßer Entsorgung festzustellen und zu ahnden. Es ist jedoch fraglich, ob hierdurch in der Breite eine nennenswerte Reduktion erreicht werden kann – auch, da sich Einträge durch Verwehung und Abrieb regulatorisch nicht adressieren lassen.

¹⁸³ Zumstein, Michael Thomas; Schintlmeister, Arno; Nelson, Taylor Frederick; Baumgartner, Rebekka; Wobken, Dagmar; Wagner, Michael et al. (2018): Biodegradation of synthetic polymers in soils: Tracking carbon into CO₂ and microbial biomass. In: Science advances 4 (7), eaas9024. DOI: 10.1126/sciadv.aas9024.

¹⁸⁴ Das konkrete Untersuchungsdesign ist in Zumstein et al. (2018) näher beschrieben.

¹⁸⁵ <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/referenzen/imulch-kunststoffe-boeden.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁸⁶ https://www.deutschlandfunk.de/muell-von-morgen-mikroplastik-auf-dem-acker.697.de.html?dram:article_id=446685, letzter Zugriff am 4.02.2021.

Zunächst wäre es daher sinnvoll und angemessen, über geeignete informatorische Instrumente und Maßnahmen bspw. durch Vorgaben für eine Abfallberatungspflicht (analog zum Vorgehen im KrWg) für eine hinreichende Aufklärung von Landwirt*innen und Landwirtschaftsbetrieben bzgl. ihrer jeweiligen Rechtspflichten Sorge zu tragen – beispielsweise unter Nutzung geeigneter Institutionen wie etwa Verbände (Deutscher Bauernverband, Bauernverbände der Länder etc.).



Abb. 13 Beispiele für die (Abfall-)Sammlung von Bahnenware¹⁸⁷

Die bestehenden Rücknahmesysteme und freiwilligen Standards zielen grundsätzlich auf eine verbesserte Erfassung (Sammlung, Rücknahme) von Bahnenware ab (der Schwerpunkt liegt hier bislang auf dickeren Silo- und Flachfolien). 2020 hat ERDE die Rücknahmeaktivitäten auf Ballennetze und Spargelfolien ausgeweitet; in den kommenden Jahren soll eine Ausweitung auf Pressgarne sowie Mulch- und Stretchfolien erfolgen. Im Rahmen einer Selbstverpflichtung¹⁸⁸ sollen bis Ende 2020 mindestens 50 % und bis Ende 2022 mindestens 65 % der in den deutschen Markt gebrachten Siloflach- und Stretchfolien gesammelt und einer werkstofflichen Verwertung zugeführt werden. Dieses Ambitionsniveau mag in Bezug auf die kontinuierliche Entwicklung hin zu einer Kreislaufwirtschaft (also in Bezug auf eine angestrebte weitgehende Kreislaufführung von Materialien und mit Blick auf Kreislaufquoten in anderen Bereichen) ausreichend sein. Die Mikroplastikeinträge, die aus Abrieb, Verwitterung und Littering nicht erfasster Bahnenware resultieren, bewegen sich jedoch mit 0,105 % angenommener Emission relativ zur eingesetzten Menge in einer Größenordnung, die sich mit Quotenregelungen kaum effektiv adressieren lässt.

Dennoch kann durch einheitlich organisierte Rücknahmesysteme potenziell eine verbesserte Sammlung mit reduzierten Verlusten realisiert werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die weitere Etablierung von Rücknahmesystemen mit

¹⁸⁷ Till Zimmermann, 29.03.2020

¹⁸⁸ https://www.raiffeisen.de/sites/default/files/2019-06/2019_06_27_Ware_Agrarkunststoffe_An-Selbstverpflichtung_oU.pdf, letzter Zugriff am 4.02.2021.

der damit verbundenen Schaffung von einheitlichen Rücknahmestrukturen und kommunikativen Maßnahmen zu einem bewussteren Umgang mit den Folien führt und die Emissionen in die Umwelt weiter verringert werden (vgl. auch die vorstehenden Ausführungen zu informatorischen Instrumenten und Maßnahmen). Wäre die Rückgabe über das Rücknahmesystem für landwirtschaftliche Betriebe kostenlos oder gar als Pfandsystem organisiert, könnten die Kunststoffemissionen ggf. sogar noch weiter reduziert werden. Ergänzend könnten weitere – über das Rücknahmesystem hinausgehende – bewusstseinschaffende Maßnahmen eine zusätzliche Reduktion der Mikroplastikeinträge bewirken. Denkbar wäre auch eine gesetzliche Pflicht zur Beteiligung der Herstellfirmen an Rücknahmesystemen (im Sinne einer erweiterten Verantwortung der Herstellfirmen/ Produktverantwortung).

In Bezug auf den Einsatz von Spargelfolien wird insbesondere im Hinblick auf die Biodiversität (Verschlechterung der Lebensräume insbesondere für Vögel) immer wieder ein Verbot (z. B. durch entsprechende Anpassung des Bundesnaturschutzgesetzes) diskutiert.¹⁸⁹ Hier wäre zu untersuchen, ob dieses zu einem erhöhten Import von Spargel führen würde und welche ökologischen nachteiligen Transportaufwendungen damit verbunden wären. Es ist zudem denkbar (insbesondere bei einer angenommenen gleichbleibenden Nachfrage nach weißem Spargel ohne Verfärbungen), dass ein Verbot zu einer reinen Verlagerung sowohl des Anbaus als auch des Folieneinsatzes in andere Länder führt, so dass keinerlei ökologischer Nutzen erreicht würde.

¹⁸⁹ <https://www.gruene-fraktion-brandenburg.de/presse/pressemitteilungen/2018/auch-fuer-2019-keine-regelung-zum-spargelanbau-unter-folie-in-schutzgebieten/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

7.2 Bewässerungssysteme, Pflanztöpfe, Pflanzhilfen

7.2.1 Bewässerungssysteme

Im Jahr 2015 wurden in Deutschland 451 800 Hektar landwirtschaftliche Flächen bewässert; 2009 waren es noch 372 749 Hektar.^{190, 191} Dies entspricht einer Zunahme von ca. 3 % pro Jahr. Mangels anderer Daten wird angenommen, dass sich diese Entwicklung bis heute fortgesetzt hat, sodass für 2020 eine bewässerte Fläche von ca. 520 000 Hektar angenommen wird, entsprechend ca. 3 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche.

Die wichtigsten Kulturarten, auf denen bewässert wird, sind Kartoffeln (22 % der Fläche) und Gemüse inkl. Erdbeeren (16 %). Der Einsatz von Bewässerungssystemen dient dazu, zu niedrige oder schwankende Niederschlagsmengen auszugleichen. Vor allem bei sandigen Böden mit niedriger Wasserspeicherfähigkeit werden relative Mehrerträge bis zu 68 % erzielt.¹⁹²

Etwa 5060 Betriebe setzten in 2015 Tröpfchenbewässerung, 12 360 Betriebe Sprinkleranlagen ein. Während die Zahl der Sprinkleranlagen seit 2009 nahezu konstant geblieben ist (12 126), hat die Zahl der Tröpfchenbewässerungsanlagen mit ca. 8 % pro Jahr deutlich zugelegt. Unter der Annahme, dass sich diese Zunahme bis 2020 fortgesetzt hat, ergäbe sich für 2020 eine Anzahl von ca. 7500 Betrieben mit Tröpfchenbewässerung. Die trockenen Sommer der Jahre 2018 und 2019 könnten dazu beitragen, dass diese Zahl tatsächlich deutlich höher ist. Das Umweltbundesamt sieht die Bewässerung abhängig von den lokalen Gegebenheiten als mögliche Klimaanpassungsmaßnahme.¹⁹³ Geht man davon aus, dass die Größe der bewässerten Flächen unabhängig von der Art der Bewässerung ist, so ergibt sich für das Jahr 2020 eine bewässerte Fläche von ca. 195 000 Hektar für Tröpfchenbewässerung und 325 000 Hektar für Sprinkleranlagen.

7.2.1.1 Kunststoffanwendungen

Während es sich bei Sprinkleranlagen häufig um Komponenten aus Metall bzw. mobile Anlagen handelt, sind Tröpfchenbewässerungsanlagen fest installiert und bestehen aus dünneren Kunststoffschläuchen (zumeist PE). Sie werden als Einweg- oder Mehrwegsysteme mit einer Nutzungsdauer von 1–6 Jahren angeboten. Die weiteren Ausführungen konzentrieren sich auf Tröpfchenbewässerungen als mögliche Emissionsquelle.

Tröpfchenbewässerungsanlagen werden je nach Ausführung der Bewässerung (Zwischendamm, Kronendamm, Unterflur etc.) mit 7 bis 14 Kilometern pro Hektar verlegt.^{194, 195} Da die erwartbaren Ertragssteigerungen bei zu hohem Abstand der Tropfstellen deutlich geringer ausfallen, nehmen wir an, dass im Mittel 10 Kilometer pro Hektar eingesetzt werden. Die Wandstärken der Schläuche variieren von ca.

¹⁹⁰ Statistisches Bundesamt (2017).

¹⁹¹ Statistisches Bundesamt (2010).

¹⁹² Andreas Rüschi (2017).

¹⁹³ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/trockenheit-in-deutschland-fragen-antworten>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁹⁴ Vgl. dazu auch Testanlage mit 36 000 Metern auf 3,5 Hektar von Netafim; <https://netafim-kompetenzzentrum.de/technik/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁹⁵ Martin Müller (2016).

0,2 Millimeter für ein- bis zweijährige einmalige Anwendungen bis zu 1,0 Millimeter für mehrjährige und ggf. mehrmalige Anwendungen.¹⁹⁶ Unabhängig von der gewählten Schlauchtype (Ein- oder Mehrwegverwendung) ergibt sich ein Kunststoffeinsatz für die Tropfschläuche von ca. 100 Kilogramm pro Hektar und Jahr. Basierend auf der obigen Abschätzung ergäbe sich ein Kunststoffverbrauch für Bewässerungsschläuche von 19 500 Tonnen pro Jahr in Deutschland.¹⁹⁷ Auch Verbinder, T-Stücke, Filter und Pumpen der Bewässerungssysteme sind zum Teil oder vollständig aus Kunststoff. Diese Komponenten werden aber im Weiteren nicht berücksichtigt. Die Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung (GVM) geht in ihrer Studie von 3199 Tonnen pro Jahr aus; die Daten wurden interviewbasiert abgeschätzt.¹⁹⁸ Die GVM berücksichtigt allerdings nur Einwegschläuche. Die Kosten für Mehrwegsysteme (> 0,60 €/m) und Einwegsysteme (0,14 €/m) unterscheiden sich deutlich.¹⁹⁶ Nichtsdestotrotz kann davon ausgegangen werden, dass besonders für Dauerkulturen Mehrwegsysteme eingesetzt werden, um die Kosten für die Installation zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Menge für Einwegsysteme ergäben sich 16 300 Tonnen pro Jahr für Mehrwegsysteme oder bei einer angenommenen 5-jährigen Nutzungsdauer 81 500 Tonnen im Bestand (Tab. 19).

7.2.1.2 Kunststoffemissionen

Die Hersteller verweisen bei der Bewerbung ihrer Produkte auch auf mögliche Beschädigungen durch Insekten, Nagetiere, Vögel etc. Auch das Reißen beim Verlegen und Bergen wird thematisiert, so dass Verluste nicht unwahrscheinlich sind.

Empirische Untersuchungen zu Verlustmengen oder Gehalten in Böden existieren bislang nicht. Daher wird eine Abschätzung vorgenommen, die auf das allgemeine Litteringverhalten referenziert (analog zum Vorgehen in Kapitel 7.1).

Die Anwendung von Bewässerungsschläuchen ist grundsätzlich umweltoffen, da sie in enger Verbindung mit den wachsenden Pflanzen oberhalb des Bodens oder mit geringer Überdeckung verwendet werden. Vor allem auf der Oberfläche verlegte Tropfschläuche unterliegen einem starken UV-Einfluss. Insbesondere, wenn die Schläuche nicht rechtzeitig geborgen werden, ist eine Versprödung und Fragmentierung durchaus wahrscheinlich. In einem Forschungsprojekt wurde ermittelt, dass dickwandige Schläuche bei Zugkräften von 300 Newton und dünnwandige bereits bei 160 Newton leicht reißen.¹⁹⁹ Entsprechende Zugkräfte werden vor allem beim Bergen schnell erreicht. Auch durch Pflanzenwachstum, Unterflurverlegung, Bodenbearbeitung und Tierbisse oder auch durch Vandalismus unterliegen die Tropfschläuche zum Teil hohen mechanischen Belastungen. Insbesondere wenn es zu kleineren Abrissen oder einer Fragmentierung in Folge von Versprödung kommt, ist eine effiziente und vollständige Abtrennung vom Boden kaum vorstellbar (Tab. 18).

Die Freisetzungsraten für die Einwegschläuche, die aufgrund ihrer geringen Wandstärken besonders empfindlich auf mechanische Belastungen reagieren, wurden

¹⁹⁶ https://www.baywa.de/de/garten/bewaesserung/tropfschlaeuche/-tropfer/c-sh_bp_9826070/, letzter Zugriff am 4.02.2021.

¹⁹⁷ Das Unternehmen Netafim, der globale Marktführer für Tröpfchenbewässerungstechnik, gibt an, bis 2020 10 Millionen Hektar landwirtschaftliche Flächen mit Bewässerungstechnik ausgestattet zu haben. Die Abschätzungen für Deutschland erscheinen daher realistisch (; <https://www.netafim.de/unternehmen/>, letzter Zugriff am 4.02.2021)..

¹⁹⁸ Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (2020).

¹⁹⁹ <https://www.lfl.bayern.de/ilt/pflanzenbau/marktfruchtanbau/062315/index.php>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

daher oberhalb der durchschnittlichen Litteringraten angenommen. Für die Mehrwegvariante wurden niedrigere Freisetzungsraten angenommen. Sollte sich herausstellen, dass in der Praxis gelegentlich oder regelmäßig keine vollständige Bergung erfolgt, lägen die Emissionen deutlich höher und würden damit eine besonders relevante Quelle.

| Tropfschlauchtyp | Kriterium | | | | Schätzung zur Freisetzungsrate [%] |
|---------------------------|------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|
| | Umwelt-offenheit | Witte-rungs-/Medien-einfluss | Mechani-sche Be-lastung | Abtrenn-barkeit | |
| Einweg (0,2 mm, 1 Jahr) | | | | | 0,32 (0,1 - 1) |
| Mehrweg (1,0 mm, 5 Jahre) | | | | | 0,032 (0,01 - 0,1) |

Tab. 18 Qualitative Abschätzung von Freisetzungsraten im Bereich Tröpfchenbewässerung

Auf Basis der abgeschätzten Freisetzungsraten lassen sich Emissionen gemäß Tab. 19 abschätzen. Dabei wurde angenommen, dass die von der GVM ermittelte Kunststoffmenge für Einwegtropfschläuche korrekt ist und die restliche Fläche bzw. Menge den Mehrwegprodukten zugeordnet werden kann. Es ergibt sich eine emittierte Menge von ca. 36 Tonnen pro Jahr (Spannbreite 11 bis 114 Tonnen pro Jahr). Bezogen auf die insgesamt mit Tröpfchenbewässerung ausgerüstete Fläche von 195 000 Hektar ergäben sich Flächenbelastungen von ca. 0,2 Kilogramm pro Hektar und Jahr.

| Folientyp | Kunststoffverbrauch pro Jahr [t/a] | Menge in Anwendung [t] | Freisetzungsrate [%] | Kunststoffemissionen [t/a] |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Einwegschläuche (0,2 mm, 1 Jahr) | 3 200 | 3 200 | 0,32 | 10,2 |
| Mehrwegschläuche (1,0 mm, 5 Jahre) | 16 300 | 81 500 | 0,032 | 26,1 |
| Gesamt | | | | 36,3 (11,4 – 113,5) |

Tab. 19 Kunststoffemissionen durch Tröpfchenbewässerungssysteme

7.2.2 Pflanzbehälter

Pflanzbehälter werden zur Anzucht, Verpackung, Transport und auch zur dauerhaften Haltung von Pflanzen verwendet. Insbesondere im Bereich der Zierpflanzen, Junggemüse- und Baumschulen werden große Mengen eingesetzt.

7.2.2.1 Kunststoffanwendungen

Als Materialien kommen eine Vielzahl von Werkstoffen infrage: Papier, Pappe, Kokosfasern und Holz, Keramik, Ton (Terracotta) und Beton, Metalle, Kunststoffe und Verbundstoffe. Für den US-Markt wird für 2020 eine Aufteilung des Marktwertes zu etwa 45 % Ton- und Keramiktöpfe, 30 % Kunststofftöpfe, 15 % Metalltöpfe und 10 % Holzbehälter angegeben. Dabei werden vor allem für Ton- und Kunststofftöpfe deutliche Steigerungen prognostiziert. Das europäische Marktvolumen für 2018 wird mit ca. 500 Millionen Euro (595 Millionen US-DollarUSD) angegeben (global ca. 1,43 Milliarden Euro). Die kommerzielle Anwendung dominiert mit 55 %

über der privaten Anwendung mit 45 %. Im Bereich der kommerziellen Anwendung dominiert deutlich das Material Kunststoff.²⁰⁰

Im Bereich der Pflanzbehälter aus Kunststoff werden Pflanztöpfe und Pflanzcontainer unterschieden. Pflanzcontainer werden vor allem in Baumschulen eingesetzt und sind in der Regel größer als Pflanztöpfe, die eher bei Zier- und Jungpflanzen Verwendung finden. Nichtsdestotrotz existiert keine allgemein akzeptierte Abgrenzung der Begriffe. Bei den Pflanzbehältern muss darüber hinaus unterschieden werden, ob sie vor allem als Verpackung dienen - und damit der Beteiligungspflicht an den dualen Systemen unterliegen - oder ob der Topf auch nach dem Kauf als Pflanzbehälter verwendet werden kann.²⁰¹ Letzteres trifft vor allem auf Kunststofftöpfe in Ton-Optik zu.

Nach Daten des Statistischen Bundesamtes wurden 2017 ca. 102,8 Millionen Zimmerpflanzen und 980 Millionen Beet- und Balkonpflanzen verkauft.²⁰² Die typischen Pflanztopfgrößen für die meistverkauften Pflanzen liegen im Bereich von 8 bis 26 Zentimeter Durchmesser, mit einem deutlichen Schwerpunkt im Bereich 9 bis 14 Zentimeter.²⁰³ Es kann davon ausgegangen werden, dass der Erwerbsgartenbau nahezu vollständig Kunststofftöpfe verwendet. Je nach Größe und Herstellungsverfahren variieren die Topfgewichte. Unter der Annahme eines durchschnittlichen Gewichts von 15 Gramm pro Topf ergibt sich eine Verbrauchsmenge an Kunststoffen für Pflanztöpfe im Bereich Zier-, Beet- und Balkonpflanzen von 15 000 bis 25 000 Tonnen pro Jahr.

Kunststofftöpfe werden auch bei der Erzeugung und dem Handel von Kräutern eingesetzt. Die entsprechende Anbaufläche beträgt in Deutschland ca. 8000 Hektar.²⁰⁴ Es wird angenommen, dass ca. 250 bis 500 Millionen Kräuterpflanzen in Töpfen²⁰⁵ mit einem durchschnittlichen Gewicht von 10 Gramm produziert werden, entsprechend ca. 2500 bis 5000 Tonnen pro Jahr.

Auch Baumschulen kultivieren Pflanzen in Kunststoff-Containern. Die Fläche, auf der Containerpflanzen erzeugt werden beträgt 1550 Hektar.²⁰⁶ Die Aufzucht-dauer reicht typischerweise von 2 bis 20 Jahren,²⁰⁷ wobei für Containerkulturen eine durchschnittliche Aufzucht-dauer von drei Jahren angenommen wird. Typische Größen für die Container liegen im Bereich 3 bis 5 Liter, nichtsdestotrotz gibt es kleinere und deutlich größere Container. Unter der Annahme, dass das pro Quadratmeter zwei Containerpflanzen erzeugt werden und das durchschnittliche Gewicht

²⁰⁰ <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/gardening-pots-market>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁰¹ <https://taspo.de/wirtschaft-und-politik/neues-verpackungsgesetz-gartenbau-in-der-pflicht/>, letzter Zugriff am 4.02.2021. <https://taspo.de/wirtschaft-und-politik/neues-verpackungsgesetz-gartenbau-in-der-pflicht/>, Zugriff am: 04.02.2021.

²⁰² <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/GBG-0050440-2017.pdf>, <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/GBG-0050441-2017.pdf>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁰³ <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/GBT-0050196-2017.pdf>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁰⁴ <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/GBT-0050182-2019.pdf>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁰⁵ Es wurde angenommen, dass pro Haushalt und Jahr 6 bis 12 Töpfe gekauft werden. Allein der Hersteller GBZ in Papenburg, laut eigener Auskunft Marktführer bei Topfkräutern, gibt eine Produktionsleistung von 90 Millionen Kräutertöpfen pro Jahr an <https://taspo.de/gruene-branche/gartenbauzentrale-imperium-der-kuechenkraeuter/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁰⁶ <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/GBT-0050197-2017.pdf>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁰⁷ <https://www.gartenbaunrw.de/index.php/gartenbau/baumschulen>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

der Container ca. 200 Gramm beträgt, ergibt sich eine jährliche Verbrauchsmenge für Kunststoffcontainer von ca. 2000 bis 4000 Tonnen.

Für Pflanztöpfe und -container ergeben sich aus diesen Abschätzungen insgesamt jährliche Verbrauchsmengen von 19 500 bis 34 000 Tonnen. Ein führender deutscher Hersteller schätzt die Verbrauchsmenge in Deutschland etwas höher, auf ca. 35 000 Tonnen pro Jahr. In einer Studie der BKV wird die Produktionsmenge mit 24 000 Tonnen angegeben.²⁰⁸

Pflanztöpfe und Container werden zu mehr als 95 % aus Polypropylen (PP) hergestellt. Es werden seit einigen Jahren Töpfe und Container angeboten, die einen hohen Rezyklatanteil aufweisen. In Deutschland beträgt die Rezyklatmenge in der Produktion laut BKV 10.000 Tonnen pro Jahr.²⁰⁸ Die Produktlinie »Pöppelmann Blue« beispielsweise wurde für ihre vollständige Rezyklierbarkeit und die Tatsache, dass der Kunststoffanteil zu 100 % aus Post-Consumer-Rezyklat besteht, mit dem »Blauen Engel« ausgezeichnet.²⁰⁹

Auch bioabbaubare Kunststoffe aus PLA, TPS oder Hanf-Lignin-Verbundwerkstoffen werden entwickelt oder bereits in geringen Mengen eingesetzt.^{210, 211} In Untersuchungen der Universität Wageningen zeigten Töpfe aus PLA und TPS in Kompostierungsanlagen ein gutes Abbauverhalten (vollständiger Abbau in 22 Tagen).²¹² Erfahrungen bei den Topfherstellern zeigen aber, dass Kunststoffe, die ein gutes Abbauverhalten besitzen, in der Nutzungsphase durch zu schnellen Abbau Performance-Verluste aufweisen. Umgekehrt bauen Kunststoffe, die in der Nutzungsphase ausreichend stabil sind, in Böden nicht schnell genug ab.

Pflanzbehälter werden zum Transport üblicherweise auf Minipaletten (Trays) zusammengestellt. Dabei gibt es für unterschiedliche Topfgrößen unterschiedliche Trays. Allein das niederländische Unternehmen Normpack produziert jährlich etwa 180 Millionen Trays mit einem Gesamtgewicht von ca. 23 000 Tonnen pro Jahr. Dies entspricht einem durchschnittlichen Gewicht pro Tray von 127 Gramm. Davon kommen ca. 27,9 % auf den deutschen Markt, entsprechend 6400 Tonnen pro Jahr.²¹³ Vor allem für kleinere Pflanztöpfe kann davon ausgegangen werden, dass sie grundsätzlich in Trays transportiert werden. Unter der Annahme, dass 80 % der Pflanzen in Trays mit einer durchschnittlichen Aufnahmekapazität von acht Pflanzen transportiert werden, ergibt sich ein Bedarf von ca. 110 Millionen Trays pro Jahr. Dabei werden vor allem in Baumärkten und Gartencentern noch vorwiegend

²⁰⁸ BKV GmbH (2020).

²⁰⁹ <https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/alltag-wohnen/recyclingkunststoffe-z-b-abfallsaeckemuelltonnen-bueroartikel-162/poepelmann-blue-teku-produkte-fuer-den-erwerbssgar>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²¹⁰ <https://www.meinwoody.de/products/hanf-pflanztopf>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²¹¹ <https://www.dega-gartenbau.de/Magazin/Archiv/Biologisch-abbaubarer-Pflanztopf-entwickelt,QUIEPTg1MTc2MiZNSUQ9NjE3MzU.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²¹² van der Zee und Molenveld (2020).

²¹³ <https://normpack.nl/de>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

Einwegpaletten eingesetzt, während bei kleineren Gartenbaubetrieben auch Mehrwegsysteme ihre Anwendung finden.²¹⁴ Bislang erreichen die Mehrweglösungen allerdings erst ca. 10-20 % des Gesamtmarktes.^{215, 216} Auf Basis dieser Daten kann die jährliche Verbrauchsmenge für Kunststofftrays auf ca. 10 000 bis 15 000 Tonnen abgeschätzt werden. Alternativen zu Kunststoffpaletten sind solche aus Papier und Pappe, die sich aber kaum als Mehrweglösung etablieren lassen.

Für die Anzucht werden sowohl Anzuchtschalen und Multizellplatten als auch kleinere Töpfe aus Kunststoff verwendet. In vielen Fällen werden die Multizellplatten mit Vlies- oder Presstöpfen oder quellfähigen Plugs (Erdpresstöpfe) befüllt.²¹⁷ Dabei handelt es sich um gepresste Substrate, die häufig aus Torf oder Kokosfasern bestehen. Einer der deutschen Marktführer gibt an, jährlich etwa 400 Millionen Presstöpfe zu vertreiben.²¹⁸ Insgesamt schätzen wir den Markt in Deutschland auf ca. 2 Milliarden Stück pro Jahr, da neben der Anzucht von Zier-, Beet- und Balkonpflanzen auch große Mengen in der Junggemüsezücht verwendet werden. Eine typische Aufnahmekapazität von Multizellplatten beträgt 100 Presstöpfe.²¹⁸ Das typische Gewicht einer Multizellplatte dürfte ca. 250 Gramm betragen. Da viele der Platten in Mehrwegsystemen verwendet werden, sind vier Nutzungszyklen pro Platte wahrscheinlich. Darüber hinaus gibt es für die Multizellplatten noch Zubehör wie Hauben und Untersetzer. Der Kunststoffverbrauch für Multizellplatten kann auf etwa 1000 bis 2000 Tonnen pro Jahr für Deutschland abgeschätzt werden.

Die gepressten und quellfähigen Plugs aus Torf oder Kokosfaser sind häufig von einem dünnen Netz umgeben, das die Quellung begrenzt und für den Zusammenhalt der Ballen sorgt. Presstöpfe mit Papiervlies als Ummantelung werden als vollständig biologisch abbaubar beworben.²¹⁹ Da dabei Bezug auf konventionelle Lösungen genommen wird, kann angenommen werden, dass auch nicht abbaubare Polymere eingesetzt werden. Erfahrungsberichte zu den quellfähigen Plugs legen nahe, dass diese bis heute nicht abbaubar sind.²²⁰ Weiterhin werden bei den Plugs und Presstöpfen häufig Bindemittel zugesetzt, sofern durch die Grundmaterialien Torf, Kokosfaser, Zellulosefaser oder Rinde allein keine ausreichende Festigkeit der Presskörper erreicht werden kann. Typisches Bindemittel sind Tonminerale und Lignin-Sulfonate, die als gut abbaubar angesehen werden können. In der Patentliteratur werden aber auch Lösungen beschrieben, die auf synthetischen Polymeren wie Polyurethanen oder Vinylacetat-Ethylen-Copolymeren basieren. Inwieweit diese Polymere eingesetzt werden, konnte nicht recherchiert werden. Die Vliesgewichte pro Presstopf können auf unter 0,5 Gramm geschätzt werden. Der Anteil von Press- oder Quelltopfen mit polymeren Vliesen wird auf 5 % geschätzt. Es ergibt sich ein Kunststoffverbrauch von ca. 20 bis 50 Tonnen pro Jahr.

Für den Anbau von Gemüse und Obst, insbesondere Tomaten, Gurken, Paprika, Peperoni und Zucchini sowie Erdbeeren werden zunehmend sogenannte Growbags

²¹⁴ Plastic Soup Foundation (2016).

²¹⁵ <https://www.veilingrheinaas.com/newsroom/news/floritrav-neues-mehrwegsystem-fuer-blumen-und-pflanzen/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²¹⁶ <https://www.duh.de/projekte/pflanzenhandel/?&wc=NL>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²¹⁷ <https://www.gruenteam-versand.de/anzucht/anzuchttopfe>; letzter Zugriff am 28.12.2020

²¹⁸ <https://handel.hawita.de/de/produkte/vliestoepfe.php>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²¹⁹ <http://www.jiffypot.com/en/about-jiffy.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²²⁰ <https://www.gardenmyths.com/jiffy-peat-pellets-not-good-for-the-environment/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

eingesetzt. Dabei handelt es sich um Kunststoffsäcke, die mit Kultursubstraten auf Basis von Kokosfasern, Perliten und/oder Torf gefüllt sind. Die Säcke werden mit 15 und 30 Liter Volumen angeboten. Der Folieneinsatz pro Sack wird auf 50 bis 100 Gramm je nach Größe des Growbags abgeschätzt. Die Growbags sind für den Einsatz der Pflanzen und die Drainage umfassend perforiert.²²¹ Üblicherweise werden Growbags in Gewächshäusern für bodenfreie Kulturen eingesetzt. Die für die oben benannten Kulturen relevante Gewächshausfläche (begebar, ohne Minitunnel) beträgt ca. 2500 Hektar. Quantitative Daten zum Anteil der Flächen, auf denen Growbags genutzt werden, liegen nicht vor. Jedoch lässt sich diversen Pressemitteilungen entnehmen, dass die Anwendung durchaus verbreitet ist.²²² Nimmt man an, dass von der Gesamtfläche auf ca. 5 % Growbags mit einer Belegungsichte von einem Sack pro Quadratmeter eingesetzt werden, ergibt sich eine Verbrauchsmenge von Kunststoffen von ca. 50 bis 100 Tonnen pro Jahr.



Abb. 14 Pflanztöpfe²²³, Trays²²⁴, Multizellplatten und Presstöpfe²²⁵, Growbag²²⁶

²²¹ https://erdbeerportal.de/wp-content/uploads/2017/03/Brill_Infoblatt-A4-Growbag-D-2_2017.pdf, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²²² <https://www.dega-gartenbau.de/Themen/A-Z/Nachhaltige-Ideen,QUIEPTY1MTQwMzgmTUIEPTe40TAWMg.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²²³ Michael Jedelhauser, 29.03.2021

²²⁴ Michael Jedelhauser, 29.03.2021

²²⁵ Kim Knoch, 21.04.2011 (CC BY-SA 2.0)

²²⁶ Vegilandscoir, 3.11.2015 (CC BY-SA 4.0)

| Kunststoffprodukt | Kulturtyp/Anwendungsgebiet | Marktdaten | Jährlicher Kunststoffverbrauch [t/a] |
|---|---|--|---|
| Pflanztöpfe | Zierpflanzen, Beet- und Balkonpflanzen | Anzahl (2017): 102,8 Millionen Zierpflanzen und 980 Millionen Beet- und Balkonpflanzen, durchschnittliches Gewicht pro Topf: ca. 15 Gramm Anbaufläche: 7.125 ha; Annahme: ca. 250 Millionen Kräutertöpfe pro Jahr; Gewicht pro Topf: ca. 15 Gramm | 20 000 (15 000 - 25 000) |
| | Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen | 1550 ha Containerfläche; durchschnittlich 2 Container pro qm; ca. durchschnittlich 3 Jahre Aufzuchtdauer Durchschnittlich 0,2 kg pro Container | 3 750 (2500 - 5000) |
| Pflanzcontainer | Baumschulen (Containerware) | Ca. 110 Millionen Trays pro Jahr; Gewicht pro Tray: ca. 127 Gramm; Mehrwegquote: ca. 10 bis 20 % | 3 000 (2 000 - 4 000) |
| Trays | Transport von Pflanzbehältern | Transport von ca. 2 Milliarden Press- und Quelltöpfe pro Jahr; 100 Jungpflanzen pro Multizellplatte; 4 Nutzungszyklen pro Platte; Gewicht pro Platte: ca. 250 Gramm; Aufschläge für Zubehörteile | 12 500 (10 000 - 15 000) |
| Anzuchtschalen und -töpfe, Multizellplatten | Jungpflanzenzucht | Ca. 2 Mrd Press- und Quelltöpfe; davon mit Kunststoffvliesen ca. 10 %; Vliesgewicht pro Press- und Quelltopf: ca. 0,5 Gramm | 1 500 (1000 - 2000) |
| Quelltöpfe mit Netz, Presstöpfe | Jungpflanzenerzeugung inkl. Gemüsegartenbau | Anbaufläche: ca. 125 ha; Belegungsdichte: 1 Bag/m ² ; Folie pro Bag: ca. 50 g/Bag | 35 (20 - 50) |
| Growbags | Erdbeeren und Gemüse | | 75 (50 - 100) |
| Kunststoffeinsatz gesamt | | | 40 860 (30 000 - 51 500) |

Tab. 20 Verbrauch von Kunststoffen für Pflanzbehälter

7.2.2.2 Kunststoffemissionen im Bereich Pflanzbehälter

Pflanztöpfe und -container werden zu Anzucht und Transport sowie bei Zimmer- und Balkonpflanzen auch zur dauerhaften Aufbewahrung genutzt. Sie werden daher in der Regel nur so lange auf landwirtschaftlichen Nutzflächen verbleiben, bis sie in den Verkauf gelangen. Solange sie nicht verspröden und fragmentieren, lassen sie sich auch recht gut von der Pflanze und dem Substrat trennen. Sofern Pflanzen über sehr lange Zeiten in Baumschulen heranwachsen, ggf. auch ein Wechsel der Behältergröße stattfindet oder sich der Marktbedarf ändert, ist es hingegen durchaus denkbar, dass gelegentlich größere Mengen auf landwirtschaftlichen Flächen verbleiben, verspröden und zu Mikroplastik fragmentieren.

Transporttrays und Anzuchtschalen werden nicht auf landwirtschaftlichen Böden eingesetzt, weshalb sie in Bezug auf Emissionen eher unkritisch zu bewerten sind.

Allerdings unterliegen sie durch den Transport einer nicht unerheblichen mechanischen Belastung, die sicherlich gelegentlich zum Bruch führen wird. Es wird allerdings angenommen, dass dadurch keine nennenswerten Emissionen in Böden auftreten, sondern eher in Gewächshäusern oder geschlossenen Infrastrukturen, wo die freigesetzten Kunststoffmengen der Abfallentsorgung zugeführt werden.

Quelltöpfe mit Netzen oder Presstöpfe mit polymeren Bindemitteln dürften nahezu vollständig in den Böden verbleiben. Sie unterliegen starken Witterungseinflüssen und mechanischen Belastungen durch das Wurzelwachstum. Die Abtrennbarkeit ist nach dem Auspflanzen in landwirtschaftliche Flächen kaum noch gegeben.

Growbags werden vor allem in Gewächshäusern oder unter hohen begehbaren Schutzabdeckungen eingesetzt. Es kann davon ausgegangen werden, dass sie nach der Nutzung im Allgemeinen der Abfallentsorgung zugeführt werden. Growbags werden allerdings für das Einbringen der Setzlinge sowie für die Belüftung und Bewässerung perforiert und gelocht. Nach der Nutzungsphase ist die Abtrennung der Säcke von den Pflanzen aufgrund von Durchwurzelung etc. erschwert, auch die Schädigung von Säcken während der Nutzung durch Umpacken, Werkzeuge und die Ernte ist wahrscheinlich. Wir gehen daher davon aus, dass Kunststoffemissionen mit den Pflanzen und Substraten auch auf landwirtschaftliche Böden gelangen können.

| Folientyp | Kriterium | | | | Schätzung zur Freisetzungsrate [%] |
|---|------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|
| | Umwelt-offenheit | Witte-rungs-/Medien-einfluss | Mechani-sche Be-lastung | Abtrenn-barkeit | |
| Pflanztöpfe | Green | Yellow | Yellow | Yellow | 0,032 (0,01 - 0,1) |
| Pflanzcontainer | Red | Red | Yellow | Yellow | 0,32 (0,1 - 1) |
| Trays | Green | Green | Red | Green | 0,032 (0,01 - 0,1) |
| Anzuchtschalen und -töpfe, Multizellplatten | Green | Yellow | Yellow | Green | 0,032 (0,01 - 0,1) |
| Quelltöpfe mit Netz, Presstöpfe | Red | Red | Red | Red | 100 |
| Growbags | Green | Yellow | Red | Red | 0,32 (0,1 - 1) |

Tab. 21 Qualitative Abschätzung von Freisetzungsraten im Bereich Pflanzbehälter

Insgesamt ergibt sich mit den obigen Annahmen zu den Freisetzungsraten eine emittierte Menge von ca. 58 Tonnen pro Jahr (Spannbreite: 18 bis 182 Tonnen pro Jahr, Tab. 22). Die Einträge finden vor allem auf der Gesamtfläche für gärtnerische Kulturen statt, die in Deutschland ca. 229 000 Hektar beträgt.²²⁷ Sofern die Einträge über Quelltöpfe besonders relevant sind, wie die Abschätzungen vermuten lassen, wäre zukünftig zu prüfen, auf welchen landwirtschaftlichen Flächen Jungpflanzen eingesetzt werden.

²²⁷ Statistisches Bundesamt (2019d).

| [t]Kunststoff- produkt | Relevanter Kultur- typ/Anwendung | In Anwendung be- findliche Menge [t] | Freisetzungsrate [%] | Polymer- emission [t/a] |
|--|---|--|-------------------------|------------------------------------|
| Pflanztöpfe | Zierpflanzen, Beet- und Balkonpflan- zen | 20 000 (15 000 - 25 000) | 0,032 (0,01 - 0,1) | 6,4 |
| Pflanztöpfe | Heil-, Duft- und Ge- würzpflanzen | 3 750 (2500 -5000) | 0,032 (0,001 - 0,1) | 1,2 |
| Pflanz- container | Baumschulen (Con- tainerware) | 3 000 (2000 - 4000) | 0,32 (0,1 - 1) | 9,6 |
| Trays | Transport von Pflanzbehältern | 12 500 (10 000 - 15 000) | 0,032 (0,01 - 0,1) | 4,0 |
| Anzucht- schalen und -töpfe, Multi- zellplatten | Jungpflanzenzucht | 6000 (4000 - 8000) | 0,032 (0,01 - 0,1) | 1,9 |
| Quelltöpfe mit Netz, Presstöpfe | Jungpflanzenerzeu- gung inkl. Gemüse- gartenbau | 35 (20 - 50) | 100 | 35,0 |
| Growbags | Erdbeeren und Ge- müse | 75 (50 - 100) | 0,32 (0,1 - 1) | 0,24 |
| Pflanzbehälter gesamt | | 45 360 (33 570 - 57 150) | | 58,3 (18,2 - 182) |

Tab. 22 Kunststoffemissionen durch die Verwendung von Pflanzbehältern

7.2.3 Pflanzhilfen

Neben den Pflanzbehältern ist eine Vielzahl von Hilfsmitteln erforderlich, um Pflanzen gegen Wind zu sichern, Wuchsrichtungen vorzugeben oder vor Schädlingen zu schützen.

7.2.3.1 Kunststoffanwendungen

Pflanzpfähle oder -stäbe aus glasfaserverstärktem Polyamid (PA) finden im Wein- und Obstbau ihren Einsatz. Die hohe Elastizität oder geringe Verformung unter Last sowie das geringe Gewicht sind wichtige anwendungstechnische Vorteile. Ein typischer Stab wiegt ca. 130 Gramm. Die Stäbe sind auch in der Kälte schlagzäh.²²⁸ Ein wichtiger Vorteil gegenüber Holz ist die Witterungsbeständigkeit (UV-Strahlung, Fäulnis) und gegenüber verzinkten Metallstäben, dass sie keine Schwermetalle emittieren. Bilder zu Anwendungen und Umsatzdaten der Hersteller und eine erwartbare Lebensdauer von 7 Jahren lassen einen Verbrauch von ca. 75 bis 150 Tonnen pro Jahr in Deutschland als realistisch erscheinen.

Auch Spann- und Bindedrähte sowie Kleinteile zur Befestigung der Pflanzen an Pfählen, Drähten etc. werden zunehmend aus Kunststoff hergestellt. Spanndrähte haben dabei häufig einen Stahlkern und sind mit einem pigmentierten Harz beschichtet. Darüber hinaus werden auch Drähte, die ausschließlich aus Kunststoff bestehen (hochfestes Polyamid) angeboten.²²⁹ Wichtige Anwendungsgebiete sind der Wein- und Obstbau sowie Baumschulen. Der Hersteller betont als einen Vorteil gegenüber konventionellen gegen Korrosion geschützten Drähten die Reduktion der Zinkoxid-Emissionen.²³⁰ Unter der Annahme, dass auf einer Anbaufläche von ca.

²²⁸ <https://www.vinotto.at/vorteile/>; letzter Zugriff am 21.01.2021

²²⁹ <https://www.weinbau-produkte.de/produkte.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²³⁰ https://barsandrods.arcelormittal.com/repository2/fanny/CrapalColor_DE.pdf, letzter Zugriff am 4.02.2021.

140.000 Hektar in Wein-, Obstbau und Baumschulen Spanndrähte verwendet werden (Stockdichte 5000 pro Hektar, 2 Drähte übereinander) und dass ca. 3 bis 6 % dieser Drähte mit einer 50 µm Kunststoffschicht (ca. 0,4 Gramm pro Meter) versehen sind und 0,5 bis 1 % der Drähte aus Vollkunststoff (ca. 8 Gramm pro Meter) bestehen, ergibt sich bei einer geschätzten Lebensdauer von 7 Jahren eine Verbrauchsmenge für Kunststoff von ca. 20 bis 40 Tonnen pro Jahr.

Bindedrähte oder -bänder dienen dazu, Stämme oder Triebe an Pfählen oder Spanndrähten zu fixieren. Sie werden vor allem im Wein- und Obstbau sowie in Baumschulen eingesetzt. Metalldrähte, Kunststoffbänder und Schläuche sowie Weidenruten - als traditionelles natürliches Bindematerial - stehen zum Teil im Wettbewerb, zum Teil werden sie für andere Aufgaben eingesetzt.

Bindebänder und -schläuche, die auch mittels spezieller Bindezangen appliziert werden, gibt es aus Polyethylen (PE), Polyvinylchlorid (PVC, teilweise phtalatfrei) und aus abbaubaren Kunststoffen. Darüber hinaus werden auch nicht additivierte Polyethylene angeboten, die zügig verspröden und fragmentieren.²³¹ In der Regel werden sowohl Stamm als auch Triebe angebunden. Häufig geschieht dies im Frühjahr. Während die Anbindung des Stammes mehrjährig ist, werden neue Triebe jährlich angebunden. Man geht von bis zu 20 000 Bindungen pro Hektar aus.²³² Es scheint realistisch, dass auf den Anbauflächen für Wein, Baum- und Beerenobst sowie in Baumschulen (ca. 185 000 ha) pro Hektar durchschnittlich 10 000 Trieb- bzw. Rutenbindungen, von denen 5 bis 15 % aus Kunststoff sind, sowie ca. 2.500 Stammbindungen, von denen 25 bis 75 % aus Kunststoff sind, angebracht werden. Pro Trieb- und Rutenbindung wird eine Kunststoffmasse von ca. 0,2 Gramm, für jede Stammbindung etwa 1,5 Gramm angenommen. Es ergibt sich ein Gesamtverbrauch von ca. 150 bis 600 Tonnen Kunststoff pro Jahr für das Anbinden von Weinreben, Obstbäumen, Beerensträuchern und Baumschulpflanzen für Deutschland.

Netze, Hüllen und Säulen schützen die jungen Stämme von Reben, Obstbäumen und Ziergehölzen. Die Gründe für die Anwendung reichen vom Verbisschutz gegen Wild, vom Schutz vor Herbiziden (nur bei geschlossenen Hüllen und Säulen) über den Mäherschutz bis hin zur Reduktion der Schnitt- und Bindearbeit am Stamm. Die Schutzsysteme werden zumeist in den ersten ein bis drei Lebensjahren der Pflanze verwendet. Die Haltbarkeit der Systeme wird mit drei bis sechs Jahren angegeben, sie bestehen üblicherweise aus Polypropylen und Polyethylen und sind UV-stabilisiert. Erfahrungsberichte zeigen, dass Kälte, UV-Strahlung und eine zu lange Nutzung nicht selten zu einem Brechen oder Reißen von Säulen und Netzen führen. Neben den Netzen, Hüllen und Säulen werden häufig auch noch Pflanzstäbe und Kabel zu ihrer Fixierung und Stabilisierung verwendet. Natürliche Alternativen für den Baumschutz sind beispielsweise Matten und Binder aus Kokos, Sisal und Jute. Die Gewichte der Schutzsysteme aus Kunststoff reichen von etwa 10 Gramm bei Netzen bis 260 Gramm bei Säulen. Unter der Annahme, dass im Obst- und Weinbau

²³¹ <https://kme-agromax.de/max-bindeband/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²³² <https://www.pfalz.de/de/pfalz-geniessen/pfalzer-wein/im-weinberg/arbeiten-im-weinberg/reben-biegen-und-binden>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

(167 000 ha) jährlich auf ca. 3 % der Anbaufläche neue Reben und Obstbäume angebaut werden (Stockdichte ca. 5000 pro Hektar), die durchschnittliche Nutzungsdauer ca. 30 Jahre beträgt und dass ein Schutzsystem eine durchschnittliche Masse von 100 Gramm (inkl. Kabelbinder) aufweist, ergibt sich ein Kunststoffverbrauch von ca. 1250 bis 3750 Tonnen pro Jahr. Es kann davon ausgegangen werden, dass in Baumschulen und Forstwirtschaft ebenfalls größere Mengen eingesetzt werden, so dass insgesamt ein Verbrauch von 2500 bis 5000 Tonnen realistisch erscheint.

Neben Pflanzstäben, Drähten und Bindemitteln sowie Produkten zum Stammschutz existiert eine Vielzahl von Kunststoffkleinteilen, die als zusätzliche Hilfsmittel im Gartenbau Verwendung finden.^{233, 234, 235}

Dazu gehören:

- Kabel- oder Schnellbinder, Ankergummis (Blitzbinder)
- Klammern, Haken und Führungen für Drähte
- Baumgurte und Abstandhalter
- Schnüre für Tomaten und Paprika,
- Stützkörbe für Zier-, Beet- und Balkonpflanzen
- Verbisschutzkappen und Manschetten für Nadelbaumspitzen
- Erdnägel
- Stamm-Manschetten zur Unkrautunterdrückung
- Pflanzetiketten

Eine grobe Abschätzung der Mengen aus Umsatzdaten von Unternehmen sowie eine Abschätzung auf Basis von Anbaudaten lassen zusätzliche Verbrauchsmengen von 1500 bis 3000 Tonnen pro Jahr als realistisch erscheinen.

Für den Bereich der Pflanzhilfen schätzen wir insgesamt den jährlichen Kunststoffverbrauch auf ca. 6155 Tonnen (Spannbreite: 4.245 – 8.790, Tab. 23).

²³⁴ <https://gekaho-shop.de/befestigung-zubehoer/?p=1>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²³⁵ <https://www.witasek.com/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

| Kunststoffprodukt | Kulturtyp | Anwendungsdaten | Kunststoffverbrauch [t/a] |
|--|---|---|----------------------------------|
| Pflanzstäbe und -pfähle | Wein-, Obstbau und Baumschulen | GFK auf PA-Basis, 7,5 mm x 1,40 m; ca. 130 g/Stab, Nutzungsdauer: 7 Jahre | 110 (75 - 150) |
| Kunststoffbeschichtete und aus Vollkunststoff bestehende Spann-drähte | Wein-, Obstbau und Baumschulen, Gemüsebau | Auf ca. 140 000 Hektar, Stockdichte 5000 Stück/ha, 2 Drähte übereinander, 3 bis 6 % kunststoffbeschichtet, ca. 0,4 g/m; 0,5 bis 1 % aus Vollkunststoff, ca. 8 g/m; Nutzungsdauer: 7 Jahre | 30 (20 - 40) |
| Bindedrähte, -schläuche und Bindebänder ganz oder teilweise aus Kunststoff | Wein-, Obstbau und Baumschulen | Ca. 185 000 ha Anbaufläche, ca. 10 000 Trieb- bzw. Rutenbindungen, davon 5 bis 15 % aus Kunststoff, 0,2 g/Bindung; 2500 Stamm-bindungen, 25 bis 75 % aus Kunststoff; 1,5 g/Bindung, Nutzungsdauer: 2 Jahre | 375 (150 - 600) |
| Netze, Hüllen und Säulen für den Baum- und Rebschutz | Wein-, Obstbau und Baumschulen | Ca. 167 000 ha relevante Anbaufläche, davon 3 % für Neuanpflanzungen, Stockdichte: 5000 /ha; Nutzungsdauer Reben ca. 30 Jahre, Einsatzquote: 25 bis 75 %, ca. 100 g Masse (inkl. Kabelbinder): pauschaler Aufschlag für Anwendungen in Baumschulen und Fortwirtschaft 1250 t/a; Nutzungsdauer: 2 Jahre Relevante Anbaufläche 200 000 ha, | 3 750 (2 500 - 5 000) |
| Diverse Kleinteile | Wein-, Obstbau und Baumschulen, Gemüsebau | 10 000 Pflanzen pro Hektar; 1 Kunststoffteil pro Pflanze, 2 g Kunststoff pro Kleinteil; durchschnittliche Lebensdauer: 2 Jahre | 2 000 (1 500 - 3 000) |
| Jährlicher Kunststoffverbrauch gesamt | | | 6 155 (4 245 - 8 790) |

Tab. 23 Jährlicher Kunststoffverbrauch für Pflanzhilfen



Abb. 15 Pflanzhilfen:
Baumschutz²³⁶, Schnellbin-
der und Bindedraht²³⁷,
Klammern, Ringe und Ha-
ken; Klammern²³⁸, Schläu-
che und Bindeband²³⁹



²³⁶ Till Zimmermann, 29.03.2020

²³⁷ Jürgen Bertling, 29.03.2021

²³⁸ Jürgen Bertling, 03.05.2021

²³⁹ Michael Jedelhauser, 03.05.2021

7.2.3.2 Kunststoffemissionen durch Pflanzhilfen

Für Pflanzhilfen gibt es bislang keine Untersuchungen dazu, in welchem Umfang sie auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen verbleiben. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass das Einsammeln schwierig und mit hohem Personalaufwand verbunden ist. Grundsätzlich ist eine Rückholung umso unwahrscheinlicher, je kleiner die Kunststoffobjekte sind.

Alle Anwendungen sind vollständig umweltoffen und unterliegen einem starken Witterungseinfluss (UV-Strahlung). Auch der Verbiss durch Schädlinge wird eine relevante Rolle bei der Fragmentierung spielen. Durch die Anwendung, das Wachstum und die Verwendung als Spannsysteme unterliegen die Objekte zum Teil großen mechanischen Belastungen. Die Abtrennbarkeit ist vor allem bei den größeren Objekten wie Stäben, Spanndrähten und Schutzhüllen gegeben. Grundsätzlich gehen wir davon aus, dass die Freisetzungsraten höher sind als der in dieser Studie verwendete Referenzwert für das Littering (Kapitel 8.1).

| Folientyp | Kriterium | | | Schätzung zur Verlustrate [%] | | |
|---|------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|
| | Umwelt-offenheit | Witterungs-/Medien-einfluss | Mechanische Belastung | | Abtrennbarkeit | |
| Pflanzstäbe und -pfähle | [Red] | [Red] | [Yellow] | [Green] | 0,32 (0,1 - 1) | |
| Kunststoffbeschichtete und aus Vollkunststoff bestehende Spanndrähte | | | [Yellow] | [Green] | 0,32 (0,1 - 1) | |
| Bindedrähte, -schläuche und Bänder ganz oder teilweise aus Kunststoff | | | [Red] | [Red] | [Red] | 3,2 (1 - 10) |
| Netze, Hüllen und Säulen für den Baum- und Rebschutz | | | [Red] | [Red] | [Green] | 0,32 (0,1 - 1) |
| Diverse Kleinteile als Pflanzhilfen | | | [Red] | [Red] | [Red] | 3,2 (1 - 10) |

Tab. 24 Qualitative Abschätzung von Freisetzungsraten im Bereich Pflanzhilfen

Basierend auf der Nutzungsdauer der einzelnen Anwendungen wurde in Tab. 25 die in Anwendung befindliche Kunststoffmasse bestimmt und unter Verwendung der Freisetzungsraten die Polymeremission abgeschätzt. Es ergibt sich eine Gesamtemission von ca. 179 Tonnen pro Jahr (Spannbreite: 56 bis 560 Tonnen pro Jahr, Tab. 24). Bezogen auf die gartenbauliche Nutzfläche für Wein, Obst- und Beerenbau sowie Baumschulen von 185 000 Hektar²⁴⁰ ergibt sich eine Flächenbelastung von 0,97 Kilogramm pro Hektar.

| Kunststoffprodukt | Relevanter Kulturtyp/Anwendung | In Anwendung befindliche Masse [t/a] | Freisetzungsrate [%] | Polymeremission [t/a] |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------------|
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------------|

²⁴⁰ Statistisches Bundesamt (2019d).

| | | | | |
|--|---|--|-------------------|-----------------------------------|
| Pflanzstäbe und -pfähle | Wein-, Obstbau und Baumschulen | 770 (525 - 1 050) | 0,32 (0,1 - 1) | 2,5 |
| Kunststoffbeschichtete und aus Vollkunststoff bestehende Spanndrähte | Wein-, Obstbau und Baumschulen, Gemüsebau | 210 (140 - 280) | 0,32 (0,1 - 1) | 0,7 |
| Bindedrähte, -schläuche und Bindebänder ganz oder teilweise aus Kunststoff | Wein-, Obstbau und Baumschulen | 750 (300 - 1 200) | 3,2 (1 - 10) | 24 |
| Netze, Hüllen und Säulen für den Baum- und Rebschutz | Wein-, Obstbau und Baumschulen, Forstwirtschaft | 7 500 (5 000 - 10 000) | 0,32 (1 - 10) | 24 |
| Diverse Kleinteile | Wein-, Obstbau und Baumschulen, Gemüseanbau | 4 000 (3 000 - 6 000) | 3,2 (1 - 10) | 128 |
| Pflanzhilfen gesamt | | 13 230 (8 975 - 18 850) | | 179,2 (56 - 560) |

Tab. 25 Kunststoffemissionen durch die Verwendung von Pflanzhilfen

7.2.4 Sonstige Kunststoffprodukte für Landwirtschaft und Gartenbau (nicht quantitativ betrachtet)

Es gibt eine Reihe weiterer Anwendungen für Kunststoffe in der Landwirtschaft, die allerdings im Rahmen der vorliegenden Studie nicht detailliert betrachtet werden konnten. Dazu gehören bspw. die folgenden Produkte:

- Gewächshausplatten und -verbinder, Clips für Foliengewächshäuser
- Insektenfallen (Baumzünslerfallen)
- Stecketiketten, Pflanzenetiketten
- Weihnachtsbaumnetze und -kordeln
- Stammschutzfarbe
- Schattenmatten aus PE-Bast
- Wildschutzzäune aus Kunststoff
- Rhizomsperren
- Kunststoffeimer
- Kartoffelkörbe
- Laubsäcke aus PP-Bändchengewebe
- Schubkarrenräder
- Bewässerungssäcke (zur Tröpfchenbewässerung, aus PVC)

Sämtliche dieser Produkte können durch Littering, Abrieb oder Verwitterung in landwirtschaftliche Böden gelangen.

7.2.5 Rechtliche Situation

Für den Eintrag von Kunststoffen durch Pflanzbehälter, Pflanzhilfen sowie Bewässerungssysteme existieren keine spezifischen Regelungen. Die Produkte und Anwendungen fallen in den Geltungsbereich des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und der Gewerbeabfallverordnung, wenn sie zu Abfall werden. Das Einbringen von Pflanzhilfen in den Boden und der Verbleib von Pflanzhilfen im Boden fallen darüber hinaus in den Geltungsbereich des BBodSchG und der BBodSchV, sofern das Aufbringen und der Verbleib schädliche Bodenveränderungen zur Folge haben. Kunststoffe werden bis heute allerdings nicht explizit benannt.

Pflanzhilfen und -töpfe dürfen nicht im Boden verbleiben, wenn diese gemäß § 3 KrWG zu Abfall geworden sind, sondern müssen als Kunststoffabfall gemäß § 3 Abs. 1 GewAbfVO getrennt gesammelt und der Verwertung zugeführt werden. Diese Rechtspflicht richtet sich an die erzeugende oder besitzhabende Person der zu Abfall gewordenen Pflanzhilfen bzw. -töpfe.

| Relevante Rechtsakte | Anforderungen | |
|---|---|----------------------------|
| | an Eintrags- und Verbleibsmengen | an den Eintragsmechanismus |
| Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) ²⁴¹ Gewerbeabfallverordnung (GewAbfVO) ²⁴² | Pflanzhilfen/-töpfe dürfen nicht im Boden verbleiben, wenn diese gemäß § 3 KrWG zu Abfall geworden sind, sondern müssen als Kunststoffabfall gemäß § 3 Abs. 1 GewAbfVO getrennt gesammelt und der Verwertung zugeführt werden | Keine Anforderungen |
| Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) ²⁴³ Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) ²⁴⁴ | Keine Anforderungen | Keine Anforderungen |

Tab. 26 Relevante Rechtsakte und rechtliche Anforderungen für Bewässerungssysteme, Pflanzbehälter und -hilfen

7.2.6 Freiwillige Standards

Im Bereich der Pflanzhilfen bestehen Anforderungen an den Gebrauch von Materialien beispielsweise für den Zierpflanzenanbau sowie für Stauden und Gehölze in den Richtlinien verschiedener Erzeugergemeinschaften wie Naturland, Bioland und Demeter. Eine Übersicht der relevanten Standards ist in Tab. 32 gegeben.

Die Richtlinien von Demeter geben für »Zierpflanzenbau, Stauden und Gehölze« folgendes vor: »Anzustreben ist eine Produktion mit nachhaltigen und verrottbaren Materialien wie z.B. Papier, Flachs, Jute, Hanf, Ton oder auch kompostierbaren bzw. recycelbaren Verbundstoffen.« Für die weiteren unterhalb des Eintragspfads betrachteten Quellen bestehen keine konkreten Vorgaben.

Auch Bioland stellt Anforderungen an den Umgang mit Pflanzhilfen, insbesondere an Pflanztöpfe (bzw. Kulturgefäße): »Anzustreben sind Kulturgefäße aus verrottbaren Materialien (z.B. Altpapier, Holzfasern, Flachs, Jute, Hanf), oder aus Ton. Kunststofftöpfe und -schalen müssen aus stabilem Material sein, die eine Mehrmalsverwendung ermöglichen, und sie müssen recyclebar sein. Gefäße aus PVC sind nicht zugelassen. Vorhandene Töpfe, die diesen Vorgaben nicht entsprechen, dürfen innerhalb der Umstellungszeit aufgebraucht werden.« Für die weiteren unterhalb des Eintragspfads betrachteten Quellen bestehen keine konkreten Vorgaben.

²⁴¹ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808).

²⁴² Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV) vom 18. April 2017 (BGBl. I S. 896), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 3 des Gesetzes vom 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234).

²⁴³ Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502) zuletzt geändert durch Artikel 3 Absatz 3 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465).

²⁴⁴ Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554) zuletzt geändert durch Artikel 3 Absatz 4 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465).

Ähnlich wie Bioland stellt auch Naturland Anforderungen an Pflanztöpfe im Bereich des Gemüsebaus (Teil B; III. Gemüsebau – 4. Kulturgefäße): *»Anzustreben sind verrottbare Materialien wie z.B. Altpapier, Flachs, Jute, Hanf oder auch Ton, soweit diese eine vernünftige ökologische Kultivierung zulassen. Kunststofftöpfe, -schalen etc. müssen aus stabilen Materialien sein, die eine Mehrfachnutzung ermöglichen und recycelbar sind. PVC ist nicht zugelassen. Vorhandene Töpfe, die diesen Vorgaben nicht entsprechen, dürfen in der Umstellungszeit aufgebraucht werden.«*

Zusätzlich gibt es innerhalb der Naturland-Richtlinien ein Verbot synthetischer Trägermaterialien und Substrate für die Sprossen- und Keimlingsproduktion (Teil B; IV. Sprossen- und Keimlingsproduktion – 3. Substrat und Trägermaterialien): *»Eventuell verwendete Substrate und Trägermaterialien müssen im Sinne dieser Richtlinien zulässig und unbedenklich sein, was im Zweifelsfall mit Naturland abzuklären ist. Alle synthetischen Trägermaterialien und Substrate, wie Styropor, Steinwolle u.ä., sind nicht zugelassen.«*

Als relevantes Umweltzeichen ist einzig das Gütezeichen »Blauer Engel« für kompostierbare Pflanztöpfe und Formteile RAL-UZ 17 zu nennen. Die Vergabekriterien beinhalten Anforderungen an die biologische Abbaubarkeit der Ausgangsmaterialien (zu 100 %) und Stoffverbote für Synthetikunststoffe, Plastifikatoren und PVC-haltige Materialien. Die Vergabekriterien enthalten bislang keine Prüfverfahren zur Bestimmung der Kompostierbarkeit.

7.2.7 Defizite bei freiwilligen Standards und der Regulierung

Die Bioverbände Demeter, Bioland und Naturland fordern, dass eine Verwendung von nachhaltigen und verrottbaren Materialien »angestrebt wird«. Hier wären verbindlichere Vorgaben dazu geeignet, Mikroplastikeinträge zu reduzieren. Dies würde auch eine konkrete Festlegung beinhalten, was unter »nachhaltigen« Materialien zu verstehen ist, welchen Abbaukriterien »verrottbare« Werkstoffe genügen sollen sowie eine Pflicht, nicht abbaubare Abfälle zu sammeln und einer Verwertung zuzuführen.

Sofern Pflanzhilfen zu Abfall werden, fallen sie in den Geltungsbereich des KrWG und der GewAbfV, woraus sich unmittelbar eine Rechtspflicht ergibt, diese getrennt zu sammeln und der Verwertung zuzuführen und somit aus dem Boden zu entfernen. Jedoch besteht die Schwierigkeit darin, zu bestimmen, ob es sich entsprechend der Legaldefinition um Abfall handelt oder nicht. Daher hätten die entsprechenden Bestimmungen dieser beiden Rechtsakte zwar grundsätzlich das Potenzial, die Verbleibsmengen von Pflanzhilfen in Böden zu reduzieren, finden in der Praxis und im Vollzug jedoch kaum bis gar keine Anwendung.

7.2.8 Maßnahmenvorschläge zur Reduktion der Einträge

7.2.8.1 Alternative Praktiken und Werkstoffe

In Bezug auf Bewässerungssysteme wäre zu analysieren, inwieweit dickwandigere mehrjährige Systeme gegenüber dünnwandigen Lösungen zu bevorzugen sind. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, wie eine Versprödung durch hohe UV-Einstrahlung vermieden werden kann.

Pflanzbehälter und –transportpaletten werden in der Regel nicht umweltoffen angewendet, hier sollte bei der Optimierung der Produkte eher Aspetke der Kreislauf-führung und Ressourceneffizienz die Wahl der technischen Lösungen bestimmen.

Bei Quelltöpfen sollten ausschließlich natürliche Polymere oder sehr gut abbaubare Polymere eingesetzt werden. Die Produkte sollten darauf hinweisen, ob synthetische Polymere (Hydrogele, Gewebe) eingesetzt werden und wie gut diese abbaubar sind. Dies gilt auch für modifizierte Cellulosen und andere halbsynthetische Polymere. Für Growbags sollten Mehrwegalternativen entwickelt werden, vor allem die Lochung und Perforierung und die Gefahr der Durchwurzelung müssten vermieden werden.

Pflanzhilfen aus Kunststoff sollten nur dann verwendet werden, wenn sie auch nach mehrjährigen Anwendungen zurückgeholt werden. Dies muss durch ein entsprechendes Produktdesign und Information der Anwender sichergestellt werden. Pflanzhilfen sollten in unnatürlichen Farben eingefärbt sein, um sie schnell identifizieren und einsammeln zu können. Pflanzhilfen, deren Verbleib in der Umwelt intendiert ist, müssen aus natürlichen, ortstypischen Werkstoffen bestehen oder schnell biologisch abbaubar sein.

7.2.8.2 Weiterentwicklung rechtlicher Instrumente und bestehender Rücknahmesysteme

Einträge von Mikro- und Makroplastik in die Umwelt aus der Verwendung von Pflanztöpfen und Pflanzhilfen ergeben sich durch nichterfolgte Rückholung aus der Umwelt (Pflanztopf verbleibt im Boden), unsachgemäße Entsorgung, Verwehung etc. Dies erfolgt jedoch in relativ geringem Maßstab. Ähnlich wie es sich für die Folien/Bahnenware darstellt, handelt es sich hier wiederum um ein Defizit, das sich im Prinzip durch einen effektiveren und konsequenten Vollzug des Kreislaufwirtschaftsrechts adressieren ließe, wobei sich in der Praxis die Frage der Verhältnismäßigkeit (Kosten zu Nutzen) stellt. Strengere und häufigere Kontrollen durch Vollzugsbehörden dürften sich zwar grundsätzlich eignen, um Fälle unsachgemäßer Entsorgung und Anwendung festzustellen und zu ahnden; ob hierdurch jedoch in der Breite eine nennenswerte Reduktion erreicht werden kann, ist fraglich.

Zunächst wäre es daher sinnvoll und angemessen, über geeignete informatorische Instrumente und Maßnahmen für eine hinreichende Aufklärung von Landwirtschaftsbetrieben bzw. Gartenbaubetrieben bezüglich ihrer jeweiligen Rechtspflichten Sorge zu tragen.

7.3 Saatgut, Düngemittel, Bodenverbesserer und Pflanzenschutzmittel

7.3.1 Saatgut

In vielen Ländern wird Saatgut nach der Ernte bzw. vor der Aussaat aufbereitet. Neben den Aufbereitungsschritten Trocknung, Sortierung und Reinigung erfolgt dabei zumeist auch eine Behandlung mit Pflanzenschutzmitteln und Insektiziden – Beizung genannt. Die Mittel werden in Form einer Beschichtung auf das Saatgut aufgetragen. Häufig werden der Beschichtung weitere Zusatzstoffe hinzugefügt, beispielsweise Nährstoffe, Bakterien, Pilze oder Enzyme. Beschichtetes Saatgut ist auch häufig gefärbt, um eine bessere Differenzierung verschiedener Produkte und Marken zu erleichtern.

7.3.1.1 Kunststoffanwendungen

Zur besseren Bindung und für eine gleichmäßige Beschichtung werden zusätzlich bei den meisten Beschichtungssystemen auch Polymere eingesetzt. Polymere erfüllen in der Saatgutbeschichtung mehrere Funktionen. Sie fungieren als Bindemittel, Filmbildner und Stabilisator, Schutzschicht und regulieren die Nährstoff- sowie die Wasserzufuhr zum Saatkorn. Insbesondere bei hochgezüchteten Sorten wie Mais, Sonnenblumen, Lein-/Ölsamen und Gemüsesamen kommen komplexe Mehrschichtsysteme zum Einsatz.

Die Beschichtung kann den Keimerfolg erhöhen sowie die Rieselfähigkeit und die Vereinzelung des Saatguts verbessern. Letzteres ist vor allem für die maschinelle Ausbringung von Bedeutung. Darüber hinaus reduziert die Beschichtung die Staubneigung und bindet Biozide, die dem Saatgut zugemischt werden, um Schädlingsbefall zu verhindern. Die Minderung sogenannter Beizstäube erhöht vor allem die Arbeitssicherheit²⁴⁵ und kann beispielsweise Bienen schützen.²⁴⁶

Das aufbereitete Saatgut wird von den Landwirten zumeist von Saatgutherstellern bezogen. Wird das Saatgut nicht vom Hersteller bezogen, so erfolgt die Saatgutbehandlung meist durch den Landwirt selbst oder sie wird von Lohndienstleistern durchgeführt.

Nach Angaben der European Seed Association (ESA) lassen sich drei Arten von Saatgutbeschichtungen²⁴⁷ unterscheiden:

- Fließfähige Suspensionen, die geringe Mengen Polymeren enthalten und vor allem bei Weizen und Gerste eingesetzt werden
- Filmbildende Beschichtungen, die Nährstoffe, Insektizide und Fungizide auf dem Saatgut in geschlossenen Schichten binden und die vor allem bei Sonnenblumen und Mais eingesetzt werden
- Pilliertes Saatgut mit dickeren Schichten (bis 500 Gew.-% bezogen auf die Masse des Samenkorns), das eingesetzt wird, um die Handhabung zu verbessern und um Nährstoffe, Insektizide und Fungizide zu binden, z. B. bei Zuckerrüben und Gemüse

7.3.1.2 Eingesetzte Kunststoffmengen und Kunststoffemissionen

Es gibt insgesamt nur wenig Informationen darüber, bei welchen Saatgutsorten welche Beschichtungen und Polymertypen eingesetzt werden. Der Markt ist hoch kompetitiv, von Konzentrationstendenzen geprägt und wenig transparent.²⁴⁸

Typische Polymere für die Saatgutbeschichtung sind Methyl- und Ethylcellulose, Polyethylenglykol, Chitosan, Gummi arabicum, carboxylierte Styrol-Butadien- oder

²⁴⁵ Die Staubneigung ist ein wichtiger Parameter und wird im sogenannten Heubachtest bestimmt. Vgl. <https://www.julius-kuehn.de/at/ab/beizstellen-und-saegeraete/heubachtest/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁴⁶ https://www.aurelia-stiftung.de/downloads/Offener_Brief_BMEL_Cyantraniliprol.pdf, letzter Zugriff am 29.03.2021.

²⁴⁷ ECHA (2019).

²⁴⁸ Pedrini et al. (2017).

Polyurethan-Dispersionen, Formaldehyd-Harnstoff-Harze, gelartige Polyacrylamide (Superabsorber) oder wasserlösliche Polyvinylalkohole.^{249, 250, 248}

Die Mengen an Saatgut lassen sich beispielsweise aus Angaben zu den Saatgutvermehrungsmengen des Bundessortenamtes abschätzen. Allerdings sind hier die von den landwirtschaftlichen Betrieben für die Saat zurückbehaltenen Erntemengen für die Folgesaison (Nachbau) nicht enthalten. Alternativ bietet sich daher eine Abschätzung über die Saatgutmenge an. Letztere wird aus den Anbauflächen²⁵¹ sowie den typischen Saatgutauftragsmengen²⁵², die pro Fläche ausgebracht werden, berechnet (vgl. Anhang 0).

Nach Schätzungen der Syngenta AG sind etwa 50 % des in Westeuropa verwendeten Saatgutes beschichtet, abhängig von der Sorte des Saatguts und der technischen Entwicklung des Landes, in dem es eingesetzt wird. Weiterhin geht Syngenta davon aus, dass es auch polymerfreie Beschichtungen gibt, sodass die insgesamt mit Polymeren beschichtete Menge unter 50 % liegen sollte.²⁵³ Nach Schätzungen der ESA werden hingegen von der jährlich in der EU kultivierten Saatgutmenge von etwa 10,34 Millionen Tonnen bis zu ca. 80 % gebeizt oder beschichtet.²⁵⁴ Zu den (teilweise) auch ohne Beschichtung verwendeten Sorten zählen zum Beispiel Weizen, Gerste, Hafer und Reis. Neben der Beschichtung wird Saatgut auch mittels Elektronen bestrahlt, um Pathogene auf der Schale zu eliminieren.

In Tab. 27 sind die in Deutschland insgesamt ausgebrachten Saatgutmengen (zur Berechnung vgl. Anhang 0) zusammengestellt. Gemeinsam mit den von der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) mitgeteilten impliziten Polymeranteilen²⁵⁵ (Durchschnittswerte je Saatgutsorte und insgesamt ausgebrachter Saatgutmenge) lassen sich so die Kunststoffemissionen für Deutschland berechnen. Vor allem bei Zuckerrüben, Sonnenblumen und Raps sind die eingesetzten Polymermengen besonders hoch. Dies lässt darauf schließen, dass diese Sorten pilliert werden, um Pflanzenschutzmittel (bspw. Neonicotinoide) in die Beschichtung einzubringen und die maschinelle Vereinzelnung der Körner bei der Aussaat zu erleichtern.

Insgesamt lassen sich die Kunststoffemissionen durch Saatgutbeizung auf ca. 87 Tonnen pro Jahr (Spannbreite: 33 bis 130 Tonnen pro Jahr, Tab. 27) abschätzen. Die größten Beiträge stammen dabei von Mais, Raps, Hülsenfrüchten und Zuckerrübe. Die Getreidesorten spielen bezüglich des Kunststoffeintrags eher eine untergeordnete Rolle.

Die Polymerbestandteile des Saatgutes werden dabei vollständig als Kunststoffemission gewertet. Verluste in der Produktion, Fehlchargen etc. werden vernachlässigt. Inwieweit bestimmte polymere Beschichtungen aufgrund eines schnellen Abbauverhaltens von der Kunststoffemission ausgenommen werden könnten, ist

²⁴⁹ <https://kingsagriseeds.com/seed-treatment-and-coating-information/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁵⁰ <https://www.seedgrowth.bayer.com/~media/d3ed77a4560740d8a568fa06f50129dc.ashx>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁵¹ Statistisches Bundesamt (2019b).

²⁵² Lucchesi, Zlof und Heimbach (2016).

²⁵³ Persönliche Auskunft A. Eckert, Syngenta Crop Protection AG; Email vom 2.02.2020.

²⁵⁴ ECHA (2019).

²⁵⁵ European Chemicals Agency (22. August 2019).

unklar, da zum Abbauverhalten der eingesetzten Polymere kaum Daten vorliegen.²⁵⁶

In einer neueren Arbeit haben Accinelli et al. das Abbauverhalten einer konventionellen Polymerbeschichtung und einer biobasierten Beschichtung (auf Basis von Stärke und Chitin) in Bodenproben aus Norditalien (Bologna) untersucht. Sie ermittelten relativ schnelle Abbauezeiten von < 48 Tagen für die konventionelle und < 32 Tagen für eine biobasierte Beschichtung. Im Weiteren stellten sie fest, dass die biobasierte Beschichtung auch den Abbau zweier Insektizide beschleunigt.²⁵⁷ Die Analyse erfolgte allerdings anhand von Flächenanalysen und nicht als direkter Nachweis eines chemischen Abbaus (CO₂-Bildung, Sauerstoffverbrauch oder Isotopenanalyse) und ist daher in Bezug auf eine vollständige Mineralisierung nur begrenzt aussagekräftig.

| Kulturtyp | Saatgutmenge [t/a] | Polymertyp | (impliziter) Polymeranteil [ppm] | Kunststoffemission [t/a] |
|--------------------|--------------------|---|----------------------------------|--------------------------|
| Weizen | 576 540 | Methyl- und Ethylcellulose, Polyethylenglykol, | 3 | 1,7 |
| Gerste | 243 000 | Chitosan, Gummi arabicum, carboxylierte Styrol-Butadien- oder | 4 | 1,0 |
| Sonstiges Getreide | 174 450 | Polyurethan-Dispersionen, Formaldehyd-Harnstoff-Harze, gelartige Polyacrylamide (Superabsorber) oder wasserlösliche Polyvinylalkohole | 10 | 1,7 |
| Mais | 75 800 | | 347 | 26,3 |
| Hülsenfrüchte | 72 900 | | 207 | 15,1 |
| Raps | 6 540 | | 3 692 | 24,1 |
| Sonnenblumen | 120 | | 1 762 | 0,2 |
| Zuckerrübe | 1 221 | | 12 000 | 14,7 |
| Soja | 2 880 | | 222 | 0,6 |
| Gemüse | 1 290 | | 1 200 | 1,6 |
| Gesamt | 1 154 741 | | | 87,0 (33 - 130) |

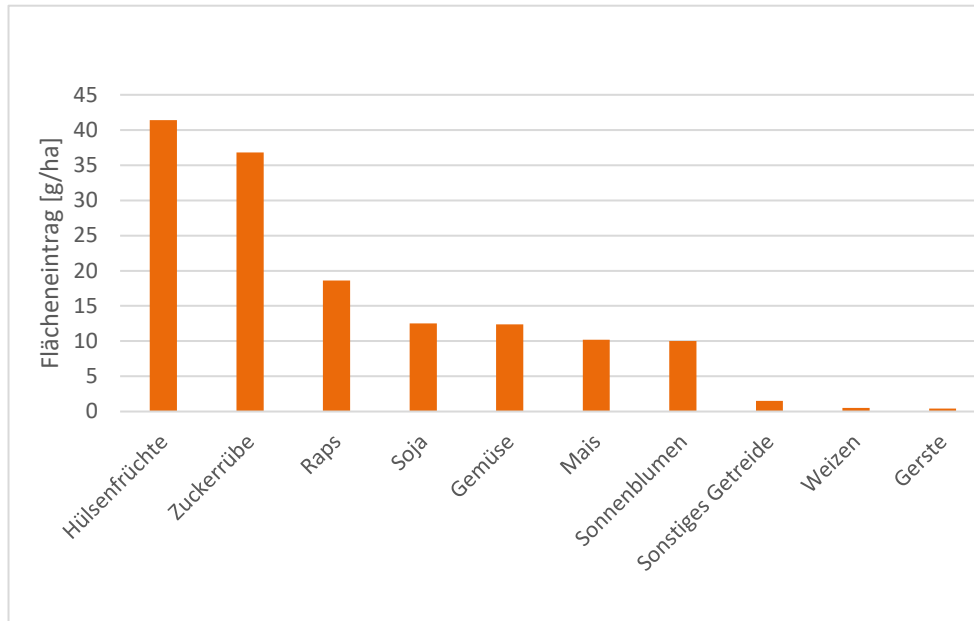
Tab. 27 Kunststoffemissionen durch umhülltes Saatgut

Die Einträge des Kunststoffs bezogen auf die landwirtschaftliche Nutzfläche sind je nach Kulturtyp sehr unterschiedlich. Die höchsten Werte erreicht das Saatgut von Hülsenfrüchten (42 Gramm pro Hektar) und Zuckerrüben, gefolgt von Raps, Soja, Gemüse, Mais und Sonnenblumen. Getreide spielen auch hinsichtlich der Flächeneinträge eine eher untergeordnete Rolle (Abb. 16).

²⁵⁶ Pedrini et al. (2017).

²⁵⁷ Accinelli et al. (2019).

Abb. 16 Flächeneinträge von Kunststoff nach Kulturtyp



7.3.2 Umhüllte Düngemittel²⁵⁸

Die Kreislaufführung und lokale Verteilung der Nährstoffe im Boden sind nicht optimal für die Anforderungen der modernen Landwirtschaft. Die Zuführung der Nährstoffe über Düngemittel soll diesen Mangel ausgleichen. Langzeitdünger werden eingesetzt, um Düngemittel einzusparen und die Düngemittelgabe besser an den Bedarf der Pflanze anzupassen. Neben finanziellen können so auch ökologische Vorteile erzielt werden. Dazu gehören die Verringerung der Auswaschung der Nährstoffe (insbesondere Stickstoff) in Gewässer und Grundwasser oder die Reduktion von Treibhausgasemissionen (Bildung von Distickstoffoxid aus Überschussstickstoff sowie produktions- und transportbedingte Emissionen).

7.3.2.1 Kunststoffanwendungen

Eine Langzeitabgabe des Stickstoffs kann durch die Verwendung einer organisch gebundenen Nährstoffform (bspw. Hornspäne), die Zugabe von mikrobiologisch wirksamen Hemmstoffen (Urease- oder Nitrifikationshemmer) oder die Umhüllung mineralischer Düngemittel mit einer zumeist polymeren Schicht erreicht werden.

Typische Anwendungen für Langzeitdünger finden sich bei Rasenpflege, im Zierpflanzenbau sowie in Baumschulen insbesondere in Topf- und Containerkulturen (vgl. Kapitel 7.2.2). Die herstellenden Unternehmen bewerben allerdings auch intensiv ackerbauliche Anwendungen wie Pflücksalate, Kohl, Kartoffeln, Mais, Zwiebeln, Weihnachtsbäume, Erdbeeren und Heidelbeeren.²⁵⁹

7.3.2.2 Eingesetzte Kunststoffmengen und Kunststoffemissionen

²⁵⁸ Kompost und Klärschlämme werden separat behandelt (vgl. Kapitel 7.4).

²⁵⁹ ICL specialty Fertilizers (2017).

Aus Sicht der Kunststoffemissionen sind Dünger mit einer Polymerhülle von Bedeutung. Sie werden als beschichtete Granulate, Tabletten oder Stäbchen angeboten. Tung et al. schätzten 2017 die weltweite Produktionskapazität auf 3 Millionen Tonnen und sehen ein starkes Wachstum vor allem aufgrund des Zubaus neuer Produktionskapazitäten in China.²⁶⁰ Im Wesentlichen werden Volldünger und Stickstoffdünger verkapselt. Da der Anteil Deutschlands am weltweiten Stickstoffverbrauch für landwirtschaftliche Anwendungen bei ca. 1,0 % liegt,²⁶¹ übernehmen wir diesen Wert auch für die Berechnung der Einsatzmenge für polymerumhüllte Dünger in Deutschland. Es ergibt sich eine untere Grenze von 30 000 Tonnen pro Jahr. Da zu erwarten ist, dass der Verbrauch von umhüllten Düngern in Deutschland höher ist als im interantionalen Durchschnitt, erscheint eine obere Grenze von 90 000 Tonnen pro Jahr (3 %) realistisch. Den Anteil von Landwirtschaft, Gartenbau und Baumschulen schätzen wir – ohne dabei auf Daten zurückgreifen zu können – auf ca. 80 %.²⁶² Für eine detaillierte Aufschlüsselung nach Kulturart gibt es bislang keine ausreichende Datengrundlage. Eine alternative Abschätzung, die von den im Baumschul- und Zierpflanzenbereich eingesetzten Substratmengen ausgeht, legt für diesen Bereich Mengen an Depotdünger von nur ca. 3250 Tonnen pro Jahr nahe.²⁶³ Da Daten zur tatsächlichen Menge und Verteilung von Langzeitdüngern nach Kulturart nicht verfügbar sind, wird der globale Berechnungsansatz weiterverfolgt.

Als Hüllmaterialien wird eine Vielzahl von Polymeren eingesetzt.²⁶⁴ In der Praxis spielen vor allem Polyurethanharze und biobasierte Sojharze eine große Rolle.^{259,265,266,267} Der Polymeranteil bei umhüllten Düngemitteln beträgt zwischen 1 und 15 % und steigt mit der angestrebten Freisetzungsdauer.²⁶⁴ Nimmt man Werte von 3 bis 7,5 % für den mittleren Beschichtungsanteil an und geht davon aus, dass die Hüllmaterialien vollständig in der Umwelt verbleiben, ergibt sich für Deutschland eine emittierte Kunststoffmenge von 3150 Tonnen jährlich (Spannbreite: 900 bis 6750 Tonnen pro Jahr, Tab. 27). und eingeschränkt auf Landwirtschaft und Gartenbau von 2520 Tonnen jährlich (Spannbreite: 720 bis 5400 Tonnen pro Jahr, Tab. 27).²⁶⁸

Die verwendeten Polymere können nicht zurückgewonnen werden und werden daher in Gänze als Kunststoffemission gewertet. Die Abbaupzeit für das Hüllpolymer wird von Herstellern mit ca. 10 Jahren angegeben.^{269,270} Besser abbaubare Alternati-

²⁶⁰ Szu-Ying Tung, Noriaki Harada, Yuichi Sekiguti, and Hiroshi Aoki (2017).

²⁶¹ Industrieverband Agrar e.V. Pflanzenernährung (2018).

²⁶² Weitere Anwendungen finden sich vor allem im privaten Bereich (Rasen, Balkonpflanzen etc.).

²⁶³ Persönliche Auskunft: Heinrich Beltz, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 21.01.2021

²⁶⁴ Trenkel (2010).

²⁶⁵ ASK Chemicals (2020).

²⁶⁶ Nutrien Ltd. (2018).

²⁶⁷ ICL specialty Fertilizers (2018).

²⁶⁸ Setzt man diese Werte in Bezug zur Bevölkerungszahl, sind sie tendenziell etwas höher als die seitens der europäischen Chemikalienagentur (ECHA) und im Rahmen einer polnischen Stellungnahme zur Kommentierung des Beschränkungsvorschlags für Mikroplastik übermittelten Werte für Europa bzw. Polen: vgl. dazu ECHA (2019).; Kommentierung Nr. 2726 zum Beschränkungsvorschlag der ECHA für Mikroplastik (Verfügbar unter <https://echa.europa.eu/de/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18244cd73>, letzter Zugriff am 4.02.2021; Amec Forster Wheeler Environment & Infrastructure UK Limited (2017);

²⁶⁹ ECHA (2019).

²⁷⁰ Stamicarbon (2019).

ven mit gleicher Performance werden erforscht, sind bislang aber noch nicht verfügbar.²⁷¹ Interessant ist, dass die Abbauzeiten der Polymere aus der Saatgutbehandlung und der Düngerumhüllung offenbar deutlich differieren.

| Kulturtyp | Anwendung | Region (Datenquelle) | Polymertyp | Polymeremission [t/a] |
|---|----------------|---|---|----------------------------|
| | | Westeuropa | | 8 000 |
| Rasen, Gartenbau, Baumschulen, Zierpflanzenbau, Salate, Kohl, Raps, Mais, Weizen, Kartoffeln, Erdbeeren, Heidelbeeren | Langzeitdünger | EU | Polyurethane, Sojharze, Harnstoffharze, | 10 000 (1 000 - 17 000) |
| | | Polen | Polysulfone, Polyester, | 300 - 600 |
| | | Deutschland | Polyacrylnitril, Polyvinylidenchlorid-Copolymere, | 3 150 (900 - 6 750) |
| | | davon | Celluloseacetat, Polyolefine | 2 520 (720 - 5 400) |
| | | Landwirtschaft, Gartenbau und Baumschulen | | |

Tab. 28 Kunststoffemissionen durch die Anwendung umhüllter Düngemittel

7.3.3 Bodenverbesserer

Böden stellen den belebten Teil der oberen Erdkruste dar. Sie haben eine Mächtigkeit von wenigen Zentimetern bis zu vielen Metern. Sie bestehen aus Mineralien und organischer Substanz (Humus), die gemeinsam das Bodengefüge bilden. In den Hohlräumen des Bodens befinden sich Wasser und Luft.²⁷² Um die Speicherfähigkeit und Durchlässigkeit für Luft und Wasser so zu beeinflussen, dass für die angebauten Pflanzen optimale Bedingungen existieren, werden eine Vielzahl mineralischer (Ton, Perlit, Vermiculite, Sand, Bimsstein etc.) und organischer Substrate (Torf, Holz- und Kokosfasern, Rinde, Spelzen und Schäben, Xylit) sowie Zusatzstoffe (Dünger, Kalk, Tenside, Pflanzenstärkungs- und Pflanzenschutzmittel) zugesetzt. Darüber hinaus werden auch synthetische Polymere in Form von Schaumkunststoffen, Hydrogelen und Bindemitteln eingesetzt.

7.3.3.1 Kunststoffanwendungen

Geschlossenzellige Schaumstoffe auf Basis von Polystyrol (bspw. Styromull®) verringern die Schüttdichte des Bodens. Sie werden eingesetzt bei Pflanzen, die ein sehr lockeres Substrat benötigen. Offenzellige Hartschäume auf Basis von Harnstoffharzen (Hygromull®) sollen die Wasser- und Nährstoffspeicherung begünstigen. Der Stickstoff des Harnstoffharzes kann durch einen langsamen Abbau freigesetzt werden. Laut Schmilewski werden beide Schaumstofftypen aber heute nicht mehr eingesetzt.²⁷² Gleichwohl wird Hygromull noch als Produkt zur Bodenverbesserung angeboten.²⁷³

Superabsorber auf Basis von Hydrogelen (Stocksorb®, Geohumus® etc.) dienen der Steigerung der Wasserspeicherkapazität und einer gleichmäßigen Wasserversorgung der Pflanzen. Dabei speichert das Hydrogel eine Wassermenge, die dem 300-fachen des Eigengewichts entspricht. Der Einsatz der Hydrogele kann Trockenstress bei Pflanzen vermindern, den Keimerfolg steigern und den Aufwand für die

²⁷¹ Persönliche Auskunft: J. Klesing; ASK-Chemicals, Email vom 17.12.2019.

²⁷² Schmilewski (2018).

²⁷³ <https://www.nitsch-gartenbautechnik.de/produkte/kat/bodenverbesserungsmittel/produkt/hygromull.html>; https://www.raiffeisen.com/agrar_sdb/detail/4584, letzter Zugriff am 4.02.2021.

Bewässerung minimieren. Hydrogele werden darüber hinaus auch für das sogenannte Root-Dipping eingesetzt. Dabei werden Pflanzenwurzeln in das wasserbeladene Hydrogel getaucht, um ihnen die notwendige Feuchtigkeit für Transporte und nach dem Auspflanzen zur Verfügung zu stellen.

Weitere relevante polymere Zusatzstoffe für Böden konnten nicht recherchiert werden.²⁷⁴

7.3.3.2 Eingesetzte Kunststoffmengen und Kunststoffemissionen

Als superabsorbierende Hydrogele werden vernetzte Polyacrylamid/Polyacrylat-Copolymere oder Polyacrylat-Homopolymere eingesetzt. Zur Steigerung der Aufnahmefähigkeit für Wasser werden die Polyacrylate mit Kalium oder Natrium teilneutralisiert. Die mit Natrium teilneutralisierten Hydrogele stehen in der Kritik, in den Böden zu einer Versalzung beizutragen.²⁷⁵

Neben Anwendungen im Bereich Health Care und Personal Care stellt der Bereich der Landwirtschaft das drittgrößte Segment für Superabsorber dar. Das globale Marktvolumen in diesem Segment betrug 2014 ca. 185 Millionen US-Dollar und wird für 2023 mit ca. 330 Millionen US-Dollar angegeben.²⁷⁶ Durchschnittliche Endabnehmerpreise betragen ca. 5 bis 15 Euro pro Kilogramm. Bei Annahme eines durchschnittlichen Verkaufspreises von 10 Euro pro Kilogramm ergäbe sich eine globale Marktmenge für landwirtschaftliche Anwendungen von ca. 25 000 Tonnen pro Jahr. Für den Wirtschaftsraum EMEA²⁷⁷ wird die Marktmenge für polyacrylatbasierte Superabsorber von Experten auf 4500 Tonnen pro Jahr geschätzt. Neben Europa ist dabei Südafrika ein wichtiger Teilmarkt.²⁷⁸ Die Marktmenge für Deutschland nehmen wir zu ca. 540 Tonnen pro Jahr an (Spannbreite: 360 bis 720 Tonnen pro Jahr).²⁷⁹ Das Marktvolumen schätzen wir auf ca. 5 Millionen Euro pro Jahr. Der größte Teil dieser Menge wird im Landschaftsbau (Stadt Begrünung, Bauminseln etc.) eingesetzt. Den in der Landwirtschaft eingesetzten Anteil schätzen wir auf Basis von Gesprächen mit Fachleuten auf lediglich 20 % (Spannbreite: 15 bis 25 %) entsprechend ca. 110 Tonnen pro Jahr (Spannbreite: 55 bis 180 Tonnen, Tab. 29).^{278, 280} Als Anwendungsgebiete werden in den Datenblättern der Hersteller insbesondere Erdbeeren (4 g/Pflanze), Gemüsejungpflanzen (3-5 g/Pflanze) und Spargel (15-20 g/Pflanze) angegeben.²⁸¹ Bei Annahme einer Flächenaufbringung von 40 Gramm pro Quadratmeter ergibt sich eine Anwendungsfläche von ca. 270 Hektar in Deutschland.

²⁷⁴ Eine Nachfrage beim LUFÄ Nord-West, Hr. Eilers, ergab ebenfalls keine Informationen zu weiteren Polymeren.

²⁷⁵ <https://www.gefafabritz.de/fag>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁷⁶ <https://www.alliedmarketresearch.com/super-absorbent-polymers-market>; <https://www.transparencymarketresearch.com/pressrelease/sap-market.htm>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁷⁷ Europe, Middle East and Africa.

²⁷⁸ Persönliche Auskunft C. Riedl; Evonik Industries.

²⁷⁹ Anteil Europa an EMEA: 80%, Anteil D an Europa: 15 (10 – 20) %.

²⁸⁰ Persönliche Auskunft: M. Wiede, GeFa Produkte Fabritz GmbH, E-Mail vom 13.07.2020.

²⁸¹ https://belchim-agro.de/pdf/Produktinfo/PI_Stockosorb_DE_2020.pdf, letzter Zugriff am 4.02.2021.

Superabsorber werden als Pulver, als Gemisch mit Gesteinsmehlen oder als Wasserkapsel angeboten.^{281, 282, 283} Darüber hinaus werden Superabsorber auch als Beschichtung für Saatgut eingesetzt. Insbesondere Rasensamen werden mit einer entsprechenden Beschichtung ausgestattet.²⁸⁴

Die Abbaurrate von Superabsorbent wird mit 5 bis 15 % pro Jahr angegeben.²⁸⁵⁻²⁸⁶⁻²⁸⁷ Gleichzeitig sollen über die ersten 5 Jahre keine Performanceverluste auftreten.²⁸⁰

| Kulturtyp | Anwendung | Region (Datenquelle) | Polymertyp | Polymeremission [t/a] |
|--|---|--|---|--------------------------|
| Landwirtschaft, Garten- und Landschafts- bau | Wasserspei- cherung, Root Dipping | Europe, Middle East, Africa (EMEA) | Kalium-Polyacrylate, Natrium-Polyacry- lat/Polyacrylamid, chem. modif. Polysac- charide | 4000 - 4500 |
| | | Deutschland | | 360 - 720 |
| Landwirtschaft (Erdbeeren, Gemüse, Spar- gel) | Wasserspei- cherung | Deutschland | | 110 (55 - 180) |

Tab. 29 Kunststoffemissionen durch Bodenverbesserer

Eine mögliche Alternative zu polyacrylatbasierten Hydrogelen sind solche auf Basis von chemisch modifizierten und vernetzten Polysacchariden, die zurzeit erforscht werden.²⁸⁸ Inwieweit diese nach ihrer chemischen Modifizierung in Performance und Abbaubarkeit den Polyacrylaten tatsächlich überlegen sind und ob sie sich auch als ökologisch vorteilhaft erweisen, ist noch offen.

7.3.4 Pflanzenschutzmittel

7.3.4.1 Kunststoffanwendungen

Pflanzenschutzmittel sind chemische oder biologische Wirkstoffe bzw. Wirkstoffgemische, die dazu dienen, Pflanzen vor Schadorganismen zu schützen oder das Wachstum unerwünschter Nebenpflanzen zu unterbinden.

Polymere kommen in Pflanzenschutzformulierungen insbesondere als Bindemittel, Verdicker, Trägerstoff und Haftmittel, Emulgierhilfe oder als Verkapselungsmaterial zum Einsatz. Sie können als Beistoffe direkt der Pflanzenschutzformulierung zugesetzt werden oder als Zusatzstoffe zum Zeitpunkt der Anwendung mit den Pflanzenschutzmitteln vermischt werden.

²⁸² <https://www.geohumus.com/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁸³ <https://www.fluegel-gmbh.de/produkte/pflanzenstaerkung/>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁸⁴ <https://www.freudenberger.net/seed-sorb-01.asp>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁸⁵ Neethu, Dubey und Kaswala (2018).

²⁸⁶ Hennecke et al. (2018).

²⁸⁷ Wolter und Martin .

²⁸⁸ Guilherme et al. (2015).

In der vom Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittel (BVL) herausgegebenen Liste der zugelassenen Beistoffe (Formulierungshilfsstoffe) für Pflanzenschutzmittel²⁸⁹ ergibt eine Recherche nach »Poly« und „mer“ die folgenden polymeren Beistoffe: Agrimer und Polyplasdon (Polyvinylpyrrolidone), Carbowax (PE-Wachse), Carbopol (Polyacrylate), Celvol (Polyvinylalkohol-Copolymer), Dimethylsiloxane-Ethylenoxide-Block-Copolymer, iPoly50 (Methacrylat-Copolymer), Polyethylenglykol, Formurea, Polyurea (Kapselwandmaterialien), Polyvinylalkohol, Hypermer (polymeres Tensid). In der Liste der unerwünschten Beistoffe sind keine Polymere enthalten.²⁹⁰

Pflanzenschutzmittel werden in zahlreichen Formulierungen angeboten: Pulver, Granulate, Dispersionen, Lösungen. Typische Polymere enthaltende Formulierungen sind Kapselsuspensionen, Matrixrelease-Systeme, Gele oder auch feste Formen bspw. als Stäbchen.

Als Mikroplastik sind insbesondere Kapselsuspensionen (CSP) in den Blick geraten. CSP haben analog zu umhüllten Düngemitteln die Aufgabe, das Pflanzenschutzmittel über längere Zeit gezielt abzugeben. Man erwartet sich von diesem Formulierungstyp Vorteile in Bezug auf Arbeitssicherheit aufgrund niedriger Kontakttoxizität, geringere Verluste durch flüchtige Bestandteile, eine verbesserte UV-Stabilität sowie eine erleichterte Dosierung. Letztlich wird eine Reduktion der Menge an Pflanzenschutzmitteln durch CSP erwartet. Dennoch werden auch negative Effekte wie die Überdosierung, um Wirksamkeit zu erreichen oder Resistenzbildung berichtet. Gleichzeitig wurde bereits im Jahr 1990 der Verbleib und die Wirkung der polymeren Matrix und ihrer Additive in den Umweltmedien hinterfragt.²⁹¹

7.3.4.2 Eingesetzte Kunststoffmengen und Kunststoffemissionen

Der Weltmarkt für Pflanzenschutzmittel betrug 2018 ca. 48 Milliarden Euro; der Anteil der EU beträgt ca. 22,6 %. Der Nettoinlandsumsatz in Deutschland liegt bei ca. 1,3 Milliarden Euro (2,7 %).²⁹² Der Anteil am weltweiten Umsatz mit Pflanzenschutzmitteln wird global mit ca. 2,8 % angegeben.²⁹³

Das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) gibt für das Jahr 2018 eine Inlandsabgabe von Pflanzenschutzmittelzubereitungen (ohne inerte Gase für die Vorratshaltung) von 89 262 Tonnen an. Der Anteil für professionelle Verwender, also vor allem die Landwirtschaft, beträgt 93,9 %.²⁹⁴ Von der Gesamtmenge sind heute ca. 6909 Tonnen im ökologischen Landbau einsetzbar.²⁹⁵

²⁸⁹

https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/zul_info_liste_beistoffe.pdf?blob=publicationFile&v=4, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁹⁰

https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/08_Produktchemie/01_BeistoffeFormulierungschemie/03_ListeUnerwünschterBeistoffe/psm_BeistoffeFormulierungschemie_ListeUnerwünschterBeistoffe_node.html, letzter Zugriff am 4.02.2021.

²⁹¹ Bahadir und Pfister (1990).

²⁹² Industrieverband Agrar e.V. Pflanzenernährung (2018).

²⁹³ European Chemicals Agency (22. August 2019).

²⁹⁴ Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (2020).

²⁹⁵ Mittel, die ausschließlich Wirkstoffe enthalten, die entsprechend der Verordnung (EG) Nr. 834/2007 in Anhang II der Verordnung (EG) Nr. 889/2008 aufgeführt sind.

Die Wirkstoffmenge in den Pflanzenschutzmittelzubereitungen beträgt 29 591 Tonnen (3684 Tonnen im ökologischen Landbau). Wie sich die Beistoffe in einer Menge von 59 671 Tonnen zusammensetzen, ist bislang unbekannt.²⁹⁶

Die ECHA beschränkt sich in ihrer Analyse auf CSP und schätzt den Verbrauch in der EU auf 500 Tonnen pro Jahr (Spannbreite: 100 bis 700 t/a). Dabei wurde angenommen, dass der mengenmäßige Anteil der verkapselten Pflanzenschutzmittel etwa gleich dem Marktanteil (2,8 %) oder etwas niedriger ist und die Polymerkonzentration zwischen 1 und 6 % beträgt. In den verschiedenen Formulierungen eines Herstellers beträgt der Polymeranteil für die Kapselwand ca. 20 bis 100 g/L.²⁹⁷

Überträgt man die Annahmen der ECHA auf Deutschland und bezieht sie auf die seitens des BVL erhobenen Mengen, ergäben sich allein durch CSP Kunststoffemissionen von ca. 90 Tonnen (Spannbreite 25 bis 150 Tonnen) pro Jahr.

| Kulturtyp | Anwendung | Region | Polymertyp | Polymeremission [t/a] |
|--------------------|-----------|-------------|---|-----------------------|
| Nicht spezifiziert | CSP | EU | Polyharnstoffe, Polyurethane, Aminoharze, | 500 (100 - 700) |
| | | Deutschland | Polyamide, Chitosan, Gelatin | 90 (25 - 150) |

Tab. 30 Kunststoffemissionen durch die Anwendung von CSP

Mit dem vom Umweltbundesamt angegebenen durchschnittlichen Pflanzenschutzmitteleinsatz von 8,8 Kilogramm pro Hektar und Jahr ergibt sich bei Annahme eines Polymeranteils von 3,5 % eine Menge von 0,31 Kilogramm pro Hektar und Jahr. Bei gegenüber Schädlingen besonders anfälligen Kulturen kann der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln ein Vielfaches dieses Wertes erreichen. Andererseits kann erwartet werden, dass die formulierungstechnisch aufwendigeren Kapselsuspensionen vor allem bei sehr wirksamen Pflanzenschutzmitteln, die eher in kleineren Mengen verwendet werden, eingesetzt werden.

7.3.5 Rechtliche Situation

7.3.5.1 Saatgut

Maßgeblich im Bereich des Saatgutrechts sind in Deutschland die Saatgutverordnung und das Saatgutverkehrsgesetz.

Das Saatgutverkehrsgesetz (SaatG) macht Vorgaben zur Inverkehrbringung von Saatgut. Vorgaben, die sich auf Kunststoffbestandteile beziehen bzw. sich auf potenzielle Kunststoffeinträge auswirken, finden sich im SaatG dabei nicht. Das SaatG stellt die Ermächtigungsgrundlage für die Saatgutverordnung dar.

Die Saatgutverordnung (SaatV) gilt für Saatgut landwirtschaftlicher Arten außer Kartoffeln und Reben und für Saatgut von Gemüsearten. Vorgaben bezüglich des Gehalts an Kunststoffen bzw. Polymeren oder Mikroplastik werden hier ebenfalls nicht gemacht. Es gibt lediglich Vorgaben zum Gehalt an »unschädlichen Verunrei-

²⁹⁶ Das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit hatte zu diesem Sachverhalt Informationen zugesagt, die bis zur Fertigstellung der Studie aber nicht vorlagen.

²⁹⁷ <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/formulation/119/119-02444-01-capsule-suspension-cs-formulations-guide.pdf?iframe=true>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

nigungen« (je nach Saatgutart unterschiedliche, jedoch max. 1 %) und zur Sortenreinheit. Intendiert hinzugefügtes Mikroplastik stellt keine Verunreinigung im rechtlichen Sinne dar und ist in SaatG und SaatV nicht geregelt.

7.3.5.2 Pflanzenschutzmittel

Für Zulassung, Inverkehrbringen, Verwendung und Kontrolle von Pflanzenschutzmitteln in der EU ist die EU-Pflanzenschutzmittelverordnung²⁹⁸ maßgeblich. Die Verordnung beinhaltet keine Vorgaben zu Kunststoffgehalten. Zu unzulässigen Beistoffen (s. Art. 27) wird lediglich gesagt, dass diese nicht zugelassen werden wenn festgestellt wird, dass durch ihre »*Verwendung nach guter Pflanzenschutzpraxis und unter der Voraussetzung realistischer Verwendungsbedingungen entstandenen Rückstände schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch oder Tier oder auf das Grundwasser oder unannehmbare Auswirkungen auf die Umwelt haben oder [...] nach der guten Pflanzenschutzpraxis und unter der Voraussetzung realistischer Verwendungsbedingungen schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch oder Tier oder unannehmbare Auswirkungen auf Pflanzen, Pflanzenerzeugnisse oder die Umwelt hat.*«.

7.3.5.3 Düngemittel und Bodenverbesserer

In diesem Kapitel werden sowohl beschichtete Düngemittel, Bodenverbesserer als auch Komposte und Gärreste – sofern sie als Dünger eingesetzt werden – behandelt. Die Quellen- und Mengenanalyse zu Komposten und Gärresten folgt aber erst in Kapitel 7.4.

Die neue europäische Düngeprodukteverordnung regelt das Inverkehrbringen von polymerbeschichteten Düngeprodukten.²⁹⁹ Zukünftig sind nur noch Düngeprodukte zugelassen, deren polymere Beschichtung 48 Monate nach Ende der Wirkzeit zu mindestens 90 % biologisch abgebaut sind.³⁰⁰

Düngemittel dürfen in Deutschland nach der EU-Düngeprodukteverordnung³⁰¹ oder entsprechend der nationalen Gesetzgebung, d. h. entsprechend den Vorgaben des

²⁹⁸ Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln und zur Aufhebung der Richtlinien 79/117/EWG und 91/414/EWG des Rates.

²⁹⁹ Düngeprodukt ist hierbei definiert als Stoff, Gemisch, Mikroorganismus oder jegliches andere Material, „der/das entweder als solcher/solches oder gemischt mit einem anderen Material zur Versorgung von Pflanzen oder Pilzen mit Nährstoffen oder zur Verbesserung ihrer Ernährungseffizienz auf Pflanzen oder deren Rhizosphäre oder auf Pilzen oder deren Mykosphäre angewendet wird oder angewendet werden soll oder deren Rhizosphäre bzw. Mykosphäre bilden soll“; (Organische sowie anorganische) Bodenverbesserungsmittel fallen ebenfalls hierunter.

³⁰⁰ EU-Kommission und EU-Parlament (8. Mai 2019).

³⁰¹ Verordnung (EU) 2019/1009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003.

deutschen Düngegesetzes³⁰² und der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV)³⁰³ in Verkehr gebracht werden.

Die EU-Düngeprodukteverordnung regelt das Inverkehrbringen von Düngeprodukten in der EU. Düngeprodukte, die der Verordnung entsprechen, können als „EU-Düngeprodukt“ gekennzeichnet und mit einer CE-Kennzeichnung versehen werden und sind in der EU frei verkehrsfähig.

Hier stellt das Düngemittelrecht insofern einen Sonderfall dar, als dass die EU-Verordnung zwar Vorgaben zur Produktharmonisierung macht und Düngemittel, die diesen Vorgaben entsprechen, in der EU frei verkehrsfähig sind. Gleichzeitig dürfen national jedoch auch nicht-harmonisierte Düngemittel in Verkehr gebracht werden, wenn diese der nationalen Rechtssetzung entsprechen. Begründet wird dies mit der lokalen Begrenztheit von Märkten.³⁰⁴ Für Deutschland bedeutet dies konkret, dass Düngemittel

- entweder den Anforderungen der EU-Verordnung
- oder den Vorgaben von deutschem Düngemittelgesetz und -verordnung entsprechen müssen oder
- in einem anderen EU-Mitgliedsstaat oder der Türkei zugelassen sind, d. h. den dort jeweils national geltenden Gesetzen und Verordnungen entsprechen

Zwar ist der dritte Fall mit der Auflage verbunden, dass die Düngemittel den Anforderungen zum Schutz vor Gefahren für die Gesundheit von Mensch oder Tier oder den Naturhaushalt gleichermaßen wie inländische Stoffe genügen. Hierzu heißt es im deutschen Düngegesetz konkret, dass Stoffe nach § 2 Nr. 1 und 6 bis 8,³⁰⁵ die nicht als »EG-Düngemittel« bezeichnet sind, in Verkehr gebracht werden dürfen, wenn sie dazu dienen

- »das Wachstum von Nutzpflanzen wesentlich zu fördern,
- ihren Ertrag wesentlich zu erhöhen,
- ihre Qualität wesentlich zu verbessern oder
- die Fruchtbarkeit des Bodens, insbesondere den standort- und nutzungstypischen Humusgehalt, zu erhalten oder nachhaltig zu verbessern,

³⁰² „Düngegesetz *) vom 9. Januar 2009 (BGBl. I S. 54, 136), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1068) geändert worden ist.

³⁰³ Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist.

³⁰⁴ Hierzu heißt es in der EU-Düngeprodukteverordnung: „Im Unterschied zu den meisten anderen Maßnahmen zur Produktharmonisierung im Unionsrecht verhindert die Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 nicht, dass nicht harmonisierte Düngemittel auf dem Binnenmarkt bereitgestellt werden können, sofern das nationale Recht und die allgemeinen Freizügigkeitsbestimmungen des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union (AEUV) beachtet werden. In Anbetracht der Tatsache, dass einige Produktmärkte lokal sehr begrenzt sind, sollte diese Möglichkeit bestehen bleiben. Die Übereinstimmung mit harmonisierten Regeln sollte daher optional bleiben und nur für Produkte zur Nährstoffversorgung der Pflanzen oder zur Verbesserung der Ernährungseffizienz der Pflanzen gelten, die bei ihrer Bereitstellung auf dem Markt mit einer CE-Kennzeichnung versehen sind. Diese Verordnung sollte daher nicht für Produkte gelten, die zum Zeitpunkt der Bereitstellung auf dem Markt nicht mit der CE-Kennzeichnung versehen sind“.

³⁰⁵ D.h. Düngemittel, Bodenhilfsstoffe, Pflanzenhilfsmittel, Kultursubstrate.

- und bei sachgerechter Anwendung die Gesundheit von Menschen und Tieren nicht schädigen und den Naturhaushalt nicht gefährden«

Diese breite Öffnung widerspricht jedoch der lokalen Begrenztheit der Düngemittelmärkte, welche als Begründung für die Möglichkeit der Abweichung von der harmonisierten Regelung herangezogen wird.

Die EU-Düngemittelverordnung macht in Bezug auf die rechtlichen Anforderungen eine Reihe von Vorgaben bezüglich Verunreinigungen sowie zu intendiert hinzugefügten Kunststoffen. Für die Verunreinigungen bestehen Grenzwerte (max. 0,3 % bzw. 0,25 % ab 2026 bezogen auf Komposte und Gärrückstände als Bestandteil des Düngers)³⁰⁶, die den Kunststoffeintrag reduzieren; für die intendiert hinzugefügten Kunststoffe wird die biologische Abbaubarkeit verlangt. Letzteres tritt ab 16. Juli 2026 in Kraft. Die Kriterien zur Bewertung werden zwei Jahre vorher durch die EU Kommission festgelegt. Hier besteht also ab 2026 eine Anforderung, die darauf abzielt, die Abbaubarkeit (intendierter) Mikroplastikeinträge sicherzustellen. Gleichwohl ist hier keine abschließende Bewertung möglich, da die Kriterien zur Bewertung der biologischen Abbaubarkeit bislang nicht vorliegen.

Für Düngemittel, die nicht nach EU-Verordnung, sondern nach nationalen Vorgaben in Verkehr gebracht werden, bestehen in der deutschen Rechtssetzung Anforderungen an den Kunststoffgehalt, die jedoch deutlich weniger weitreichend im Vergleich zu den Vorgaben der EU-Verordnung sind:

- Düngemittel dürfen nach DüMV synthetische Polymere als Haupt- oder Nebenbestandteile beinhalten, d. h. sie dürfen intendiert hinzugefügt werden, sofern sie dem Zweck der Verbesserung der Wasserhaltefähigkeit von Böden dienen. Solche Düngemittel sind mit Hinweisen zu versehen, dass sie synthetische Polymere enthalten und die maximal aufzubringende Menge auf 150 Kilogramm pro 10 Jahre und Hektar bzw. 4 kg pro Pflanzgrube begrenzt ist³⁰⁷
- Wirtschaftsdünger dürfen nach DüMV maximale Verunreinigungen durch Altpapier, Karton, Glas, Metalle und plastisch nicht verformbare Kunststoffe als Fremdbestandteile über 1 Millimeter Siebdurchgang mit einem maximalen Anteil von 0,4 % (bezogen auf Trockenmasse) enthalten sowie sonstige Kunststoffe mit einem Anteil von maximal 0,1 %³⁰⁸

Die EU-Verordnung macht hier also (insbesondere durch die verlangte biologische Abbaubarkeit) Vorgaben, die deutlicher auf eine Vermeidung des Eintrags von Mikroplastik in die Umwelt hinwirken (bzw. deren Abbaubarkeit sicherstellen) als dies im deutschen Rechtsrahmen geschieht.

Die Vorgaben bzgl. des maximalen Fremdstoffgehaltes (einschließlich Kunststoffe) sind in der EU-Verordnung ebenfalls strenger als in der deutschen Gesetzgebung –

³⁰⁶ Komposte sind zwar im Kontext dieser Studie als separate Quellkategorie betrachtet worden. Einträge aus Komposten ergeben sich aber dann, wenn diese als Düngemittel eingesetzt werden. Dieser Einsatz ist im Düngemittelrecht reguliert.

³⁰⁷ Siehe DüMV Tabelle 7.

³⁰⁸ DüMV §4 Abs 4.

auch wenn die jeweiligen Vorgaben sich auf unterschiedliche Düngemittel(-bestandteile) beziehen (0,3 % nach EU-Verordnung bzw. 0,25 % ab 2026 bezogen auf Komposte und Gärreste und 0,4 % nach DüMV bezogen auf Wirtschaftsdünger). In beiden Fällen jedoch beziehen sich diese Anforderungen nur auf Fremdbestandteile über 2 Millimeter, was in Bezug auf eine Reduzierung des Eintrags von Mikroplastik als nicht ausreichend erscheint.

Die sich aus den beschriebenen Rechtsakten ergebenden rechtlichen Anforderungen sind in Tab. 31 zusammengefasst.

| Relevante Rechtsakte | Anforderungen |
|---|---|
| EU-Düngeprodukte-Verordnung | Grenzwerte bzgl. Verunreinigungen bestimmter Bestandteile (Kompost, Gärückstände): 3 g/kg (Glas, Metall oder Kunststoff) über 2 mm (ab 16.07.2026: 2,5 g/kg) Begrenzung der maximal eingesetzten Menge pro Hektar und Zeit bei Düngemitteln mit Polymeren als Haupt- oder Nebenbestandteil sowie entsprechender Hinweise auf den Produkten |
| Düngemittelgesetz (DünG), Düngemittel-Verordnung (DüMV) | Bei Wirtschaftsdüngern maximale Verunreinigung von 0,4 % Fremdstoffen einschließlich plastisch nicht verformbare Kunststoffe (bezogen auf Trockenmasse) sowie 0,1 % sonstige Kunststoffe |

Tab. 31 Düngemittel: relevante Rechtsakte und rechtliche Anforderungen

7.3.5.4 EU-Öko-Verordnung

Mit der EU-Öko-Verordnung³⁰⁹ bestehen Rechtsvorschriften für den ökologischen Landbau. Hier wird definiert, wie landwirtschaftliche Erzeugnisse und Lebensmittel, die als Ökoprodukte gekennzeichnet werden dürfen, erzeugt und hergestellt werden müssen. In diesem Zusammenhang werden Bedingungen für den Einsatz von Düngemitteln und Bodenverbesserern gestellt. Die neue Öko-Verordnung ist am 17. Juni 2018 in Kraft getreten, gilt ab dem 1. Januar 2021 und löst dann die Vorgängerverordnung 834/2007 ab. Die neue Öko-Verordnung hat unter anderem einen breiteren Geltungsbereich, so wurde Saatgut nun in den Geltungsbereich aufgenommen.

Relevanz in Bezug auf potenzielle Mikroplastikeinträge aus dem Einsatz von Düngemitteln, Saatgut und Bodenverbesserern ergeben sich zum einen aus Artikel 24, welcher der Kommission das Recht einräumt, Düngemittel und Bodenverbesserer für den Einsatz in der ökologischen Landwirtschaft (nicht) zuzulassen – entsprechend den Anforderungen der Öko-Verordnung. Anforderungen zum Kunststoffgehalt gibt es hierbei jedoch nicht.

Für die bereits unter der alten Öko-Verordnung geregelten Düngemittel werden in der »FIBL Betriebsmittelliste für den ökologischen Landbau in Deutschland« rund

³⁰⁹ Verordnung (EU) 2018/848 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates.

1500 nach VO 834/2007 zugelassene Produkte gelistet (zur Einordnung: Für Demeter als anspruchsvollem Bio-Anbauverband sind hiervon rund 1100 Produkte zugelassen).

Bezüglich der Praxis der Bodenbewirtschaftung und Düngung in der ökologischen Landwirtschaft gilt zudem grundsätzlich (Anhang II 1.9), dass

- Bodenbearbeitungs- und Anbauverfahren angewendet werden müssen, die die organische Bodensubstanz erhalten oder vermehren, die Bodenstabilität und die biologische Vielfalt im Boden verbessern und Bodenverdichtung und Bodenerosion verhindern,
- mehrjährige Fruchtfolgen genutzt werden, die obligatorisch Leguminosen als Hauptfrucht oder Untersaat für Fruchtfolgenpflanzen und andere Gründüngungspflanzen einschließt,
- aus ökologischer/biologischer Produktion stammende Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft oder organische Substanzen, die vorzugsweise kompostiert sind, eingesetzt werden.

Soweit durch diese Maßnahmen der Nährstoffbedarf nicht gedeckt ist, dürfen lediglich Düngemittel und Bodenverbesserer, die nach Artikel 24 für die Verwendung in der ökologischen/biologischen Produktion zugelassen sind, „nur in dem erforderlichen Maße verwendet werden“ (Anhang II 1.9.3). Die Verwendung ist zu dokumentieren.

7.3.6 Freiwillige Standards

Auf europäischer Ebene gibt es das EU-Ecolabel für »Kultursubstrate, Bodenverbesserer und Mulch«.³¹⁰ Durch dieses Umweltzeichen sollen Produkte der genannten Kategorien ausgezeichnet werden, die entlang ihres Lebenszyklus vergleichsweise geringe Umweltwirkungen aufweisen.

Die Vergabekriterien des Umweltzeichens stellen Anforderungen an die Herkunft, an Inhaltsstoffe, mineralische Zusatzstoffe, Stabilität, Hygiene und den zulässigen Gehalt an Fremdstoffen. Zulässige Inhaltsstoffe sind nur organische Ausgangsstoffe aus der getrennten Sammlung; somit werden stark verunreinigte biologische Abfallfraktionen, wie sie durch eine gemischte Sammlung mit anderen Siedlungsabfällen entstehen, ausgeschlossen. Der Gehalt an Glas, Metall und Kunststoffen, welche bei einer Siebung mit einer Maschenweite von 2 Millimeter abgetrennt werden, darf nicht mehr als 0,5 Gew.-% (bezogen auf Trockenmasse) betragen. Weitere bzw. sonstige Anforderungen mit Relevanz in Bezug auf potenzielle (Mikro-)Plastikeinträge in die Umwelt werden nicht gestellt.

Auf deutscher Ebene gibt es eine Reihe weiterer potenziell relevanter Gütezeichen des Deutschen Instituts für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V. (RAL). Mehrere, auf Produktgruppen spezialisierte Gütegemeinschaften entwerfen hierfür die Kriterien und geben die entsprechenden Gütezeichen heraus. Im Folgenden findet

³¹⁰ Siehe BESCHLUSS (EU) 2015/2099 DER KOMMISSION vom 18. November 2015 zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des EU-Umweltzeichens für Kultursubstrate, Bodenverbesserer und Mulch.

sich eine Zusammenstellung der relevanten Gütezeichen der RAL mit Relevanz für die hier betrachteten Produkte mit intendierter Ausbringung und Sekundärquellen.

Das **RAL-GZ 252** gilt für **weiter aufbereitete Dünger aus der Kreislaufwirtschaft**, z. B. für Aschen aus der Biomasseverbrennung oder Recycling-Phosphat. Die Anforderungen an den Fremdstoffgehalt sind wenig genau spezifiziert. So heißt es hier »frei oder weitgehend frei von Fremdstoffen« gemäß den Festlegungen der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. (BGK) ohne die Begrenzung auf 0,5 % der Trockenmasse für Fremdstoffe > 2 Millimeter.

RAL-GZ 245 gilt für **Gärprodukte bzw. Dünge- und Bodenverbesserungsmittel** aus den anaeroben Behandlungsanlagen von organischen Abfällen und wird ebenfalls von der BGK herausgegeben. Es bestehen Anforderungen an den zulässigen Gehalt von Fremdstoffen > 2 Millimeter. Anders als für (AS-) Dünger dient die maximale Flächensumme der ausgelesenen Fremdstoffe über 2 Millimeter als Grenzwert. Diese darf seit dem 1.07.2018 15 cm²/l Frischsubstanz (FS) nicht überschreiten. Die Methoden zur Durchführung von Probenahmen und Untersuchungen werden vom Güteausschuss bestimmt und sind gemäß den Unterlagen des BGK durchzuführen. Das **RAL-GZ 246** für **Gärrückstände aus Biogasanlagen**, welche sowohl fest als auch flüssig sein können und als NawaRo-Gärprodukte zusammengefasst werden, wird vom BGK herausgegeben und enthält die gleichen Grenzwerte bezogen auf die Flächensumme der Fremdstoffe, welche für Gärprodukte gelten.

RAL-GZ 251 gilt für **Kompost aus Bioabfällen**, wobei Frischkompost, Fertigkompost und Substratkompost eingeschlossen sind und wird ebenfalls von der BGK herausgegeben. Es bestehen Anforderungen an den zulässigen Gehalt von Fremdstoffen > 2 Millimeter. Die maximale Flächensumme der ausgelesenen Fremdstoffe über 2 Millimeter dient als Grenzwert. Für Fertigkomposte darf seit dem 1.07.2018 die Flächensumme 15 cm²/l Frischsubstanz (FS) nicht überschreiten. Für Substratkomposte gilt ein Grenzwert von 10 cm²/l FS. Zudem gelten für Kunststoffe relevante Anforderungen an den zulässigen Gehalt von Fremdstoffen > 5 mm, welcher maximal 0,1 Gew.-% betragen darf. Die Methoden zur Durchführung von Probenahmen und Untersuchungen werden vom Güteausschuss bestimmt und sind gemäß den Unterlagen der BGK durchzuführen.

Das **RAL-GZ 250** für **Substrate für Pflanzen**, insbesondere für Rinde für Pflanzenbau, Baumsubstrate, Blumenerde, Kultursubstrate, Substratausgangsstoffe, Blähton und Dachsubstrate, wird von der Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzen e. V. herausgegeben. Für Rinde bzw. Rindenumus besteht ein generelles Verbot von Fremdstoffen > 2 Millimeter, für Kompost ein Grenzwert von 5 Gew.-% für Fremdstoffe > 2 Millimeter und 0,1 Gew.-% für Fremdstoffe > 5 Millimeter. Als Nachweismethode wird für Rinde und Rindenumus zur visuellen Beurteilung das Auslesen von Hand angeführt, für Kompost die optische Prüfung.

Die beschriebenen freiwilligen Standards und ihre Anforderungen sind in Tab. 32 zusammengefasst (Einige der in der TAbelle aufgeführten Umweltzeichen werden erst später in Kapitel 7.4.5 erläutert.).

| Label / Standard | Produkt-Scope | Herausgeber | Anforderungen an eingesetzte Kunststoffe |
|--|---|--|---|
| RAL-GZ 503 Boden- verbesserung | Die Bodenbehandlung mit Bindemittel ist eine Bauweise um die Einbaufähigkeit und Verdichtbarkeit von Böden zu verbessern oder die bodenphysikalischen Eigenschaften von Böden hinsichtlich der Beanspruchung durch Witterung und Verkehr zu erhöhen | Gütegemeinschaft Bodenverfestigung und Bodenverbesserung e. V. (GVB) | Keine Anforderungen an die eingesetzten Bindemittel oder die Nutzung von Kunststoffen allgemein, aber Kontrolle der Bindemittelart über Lieferschein in Tagesprotokoll |
| RAL-GZ 247 AS-Düngung | Landwirtschaftliche Verwertung von Abwasserschlämmlamm | Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) e. V. | Fremdstoffe > 2 mm dürfen max. 0,5 Gew.-% Trockenmasse ausmachen (für zulässige Mischkomponenten) |
| RAL-GZ 252 Dünger | Für weiter aufbereitete Dünger aus der Kreislaufwirtschaft, z. B. mit Aschen aus der Biomasseverbrennung oder Recycling-Phosphat | Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) e. V. | Frei oder weitgehend frei von Fremdstoffen gemäß Festlegungen des Bundesgüteausschusses. |
| RAL-GZ 245 Gärprodukte | Für Dünge- und Bodenverbesserungsmittel aus den anaeroben Behandlungsanlagen von organischen Abfällen | Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) e. V. | Anforderungen an die maximale Flächensumme der ausgelesenen Fremdstoffe über 2 mm: - 25 cm ² /l Frischsubstanz (FS), ab 1.07.2018: - 15 cm ² /l FS Für Fertigungskompost: Anforderungen an die maximale Flächensumme der ausgelesenen Fremdstoffe über 2 mm: - 25 cm ² /l Frischsubstanz (FS), ab 1.07.2018: - 15 cm ² /l FS |
| RAL-GZ 251 Kompost | Für Kompost aus Bioabfällen. Produkte: Frischkompost, Fertigungskompost, Substratkompost | Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) e. V. | Für Substratkompost: Anforderungen an die maximale Flächensumme der ausgelesenen Fremdstoffe über 2 mm: - Fremdstoffe > 5 mm Durchmesser dürfen max. 0,1 Gew.-% der Trockensubstanz ausmachen - 10 cm ² /l Frischsubstanz (FS) |
| RAL-GZ 161 (1-5) Land- wirtschaftliche Betriebs- mittel | Kraftfutter, Mineralfuttermittel (Mischfuttermittel), Euterpflegemittel, landwirtschaftliche Reinigungs- und Desinfektionsmittel, Stalldesinfektionsmittel und Silierhilfsmittel | DLG e. V. (Deutsche Landwirtschaft Gesellschaft e. V.) | Nicht spezifiziert |

Tab. 32 Übersicht der relevanten RAL-Gütezeichen für Produkte mit intendierter Ausbringung

| Label / Standard | Produkt-Scope | Herausgeber | Anforderungen an eingesetzte Kunststoffe |
|--|---|---|---|
| RAL-GZ 246 NawaRo-Gärprodukte | Für Gärrückstände aus Biogasanlagen. Produkte: NawaRo-Gärprodukt fest und flüssig | Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) e. V. | Für Gärprodukt fest und flüssig: Anforderungen an die maximale Flächensumme der ausgelesenen Fremdstoffe über 2 mm: - 25 cm ² /l Frischsubstanz (FS), ab 1.07.2018: - 15 cm ² /l FS |
| RAL-GZ 250 Substrate für Pflanzen (1-7) | Rinde für Pflanzenbau, Baumsubstrate, Blumen-erde, Kultursubstrate, Substratausgangsstoffe, Blähton und Dachsubstrate | Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzen e. V. | a) Für Rinde(nhummus): Keine Fremdstoffe > 2 mm zulässig (z.B. Kunststoffe, Metalle, Glas) b) Für Kompost: - Fremdstoffe > 2mm müssen < 5 Gew.-% Trockenmasse ausmachen - Fremdstoffe > 5mm müssen < 0,1 Gew.-% Trockenmasse ausmachen |
| RAL-GZ 258 Veredelungsprodukte aus Abwasser-schlamm | Für Komposte aus der aeroben Behandlung von Klärschlamm | Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) e. V. | Fremdstoffe > 2 mm dürfen max. 0,5 Gew.-% Trockenmasse ausmachen |

Tab. 32 Übersicht der relevanten RAL-Gütezeichen für Produkte mit intendierter Ausbringung

7.3.7 Maßnahmenvorschläge zur Reduktion der Einträge

7.3.7.1 Alternative Praktiken und (Werk-)Stoffe

Sowohl beim umhüllten Saatgut (Beizung), Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln als auch bei wasserspeichernden Bodenverbesserern sind nicht zuletzt Aspekte des Umwelt- und Arbeitsschutzes eine zentrale Motivation für ihre Verwendung. Im Vergleich zum Wirkstoff sind die Polymere in der Regel weitgehend inert und wenig toxisch. Nichtsdestotrotz akkumulieren sie durch ihre geringe Abbaubarkeit auf lange Sicht in großen Mengen im Boden und die langfristigen Wirkungen sind derzeit noch kaum absehbar. Gleichzeitig erscheint eine Reinigung der Böden von Polymeren im Mikromaßstab weder ökonomisch noch ökologisch realisierbar.

Statt einem generellen Verzicht auf die Polymere wären daher verstärkte Bemühungen in Richtung bioabbaubare Beschichtungen sinnvoll. Dabei müssten allerdings anwendungsspezifische Abbauezeiten vorgegeben werden, die in sinnvoller Relation zur Nutzungszeit stehen. Zu bioabbaubaren Düngemittelbeschichtungen finden laut Herstelleraussage derzeit Forschungsaktivitäten statt. Bislang sind aber noch keine geeigneten Produkte am Markt verfügbar.

Alternativen zu polymerumhüllten Düngern sind solche mit Schwefelummantelung oder anderweitig chemisch stabilisierte Düngemittel. Grundsätzlich ist auch die häufigere Ausbringung kleinerer Düngemittelmengen eine Alternative. Allerdings haben gerade deren ökologische (und wirtschaftlichen) Nachteile zur Entwicklung der polymerumhüllten Langzeitdünger geführt.

Ob der Verzicht oder bioabbaubare Alternativen ökologischer sind, müsste in einer vertiefenden (Ökobilanz-)Studie beantwortet werden. Dabei ist die besondere Schwierigkeit, dass die öko- und humantoxikologischen Wirkungen von Kunststoffemissionen noch weitgehend unbekannt sind, so dass die Abwägungen zwischen

Kunststoffemissionen und anderen Wirkungskategorien vorläufig noch politischer Natur sind.³¹¹

7.3.7.2 Regulatorische Ansätze

Mit der Anforderung nach der biologischen Abbaubarkeit intendiert eingesetzter Polymere ab 2026 leistet die EU-Düngeprodukteverordnung zukünftig einen relevanten Beitrag zur Vermeidung des Eintrags von Mikroplastik. Abzuwarten sind hier die Kriterien zur Bewertung der biologischen Abbaubarkeit, welche 2024 vorgelegt werden müssen.

Aufgrund der Möglichkeit, Düngemittel abweichend von den EU-Vorgaben nach nationalen Vorschriften in Verkehr zu bringen, erscheint hier eine Harmonisierung der Anforderungen, d. h. eine Aufnahme der biologischen Abbaubarkeit für intendiert eingesetzte Polymere in die DüMV sinnvoll. Unabhängig davon würde durch ein Inkrafttreten des ECHA-Vorschlags zur Beschränkung von Mikroplastik (in der aktuell vorliegenden Form) eine Beschränkung für die Verwendung von Mikroplastik in Düngemitteln, die abweichend von den Vorgaben der EU-Verordnung nach nationaler Gesetzgebung in Verkehr gebracht werden, folgen.³¹²

In Bezug auf den Fremdstoffgehalt macht die EU-Verordnung strengere Vorgaben – auch wenn die jeweiligen Vorgaben sich auf unterschiedliche Düngemittel (-bestandteile) beziehen. Hier würde eine Herabsetzung der erlaubten Verunreinigung in Wirtschaftsdüngern in der deutschen Rechtssetzung ggf. zu einer Reduktion von Mikroplastikeinträgen beitragen.

In der EU-Verordnung beziehen sich die Anforderungen nur auf Fremdbestandteile über 2 Millimeter, in der deutschen DüMV auf Fremdbestandteile über 1 Millimeter. Eine Herabsetzung der 2-Millimeter-Schwelle in der EU-Düngeproduktverordnung würde in Bezug auf Mikroplastikeinträge eine Reduktion von Einträgen bewirken.

Die Zulassung zur Inverkehrbringung von Düngemitteln, die in einem anderen EU-Mitgliedsstaat oder der Türkei zugelassen sind, d. h. den dort jeweils national geltenden Gesetzen und Verordnungen entsprechen, wie sie das deutsche Recht vorsieht, stellt eine relativ breite Öffnung dar. Es bleibt jedoch die Einschränkung, dass die Düngemittel den Anforderungen zum Schutz vor Gefahren für die Gesundheit von Mensch oder Tier oder den Naturhaushalt gleichermaßen wie inländische Stoffe genügen müssen. Dies sollte zumindest dahingehend konkretisiert werden, dass die gleichen Vorgaben bezüglich des Fremdstoffanteils, wie in der deutschen Rechtssetzung vorgesehen, eingehalten werden müssen. Auch die biologische Abbaubarkeit der intendiert eingesetzten Polymere ist hier ein sinnvolles Kriterium zur Vermeidung von Mikroplastikeinträgen. Auch dieser Fall würde jedoch unter den ECHA-Vorschlag zur Beschränkung von Mikroplastik fallen, so dass hier potenziell zukünftig die dort vorgesehenen Regelungen greifen würden.

³¹¹ ASK Chemicals (2020).

³¹² European Chemicals Agency (22. August 2019).

Für Saatgut macht der aktuell geltende Rechtsrahmen keine Vorgaben zu intendiertem Mikroplastik; es erfolgt entsprechend aktuell keine Regulierung dieses Eintragspfades von Mikroplastik. Dies würde sich jedoch durch den ECHA-Entwurf zur Beschränkung von Mikroplastik ändern. Unabhängig hiervon könnte die Saatgutverordnung (auf Ermächtigungsgrundlage des Saatgutgesetzes) angepasst werden, so dass Vorgaben analog des ECHA-Entwurfs aufgenommen werden. Das gleiche gilt im Bereich der Pflanzenschutzmittel.

7.4 Klärschlamm und Komposte

7.4.1 Komposte und Gärprodukte

Die Kreislaufführung von organischen Abfällen ist für eine ausgeglichene Humus- und Nährstoffbilanz sinnvoll. Nur wenige Abfälle werden dabei direkt verwendet, bspw. als Grünguthäcksel, stattdessen werden die Bioabfälle zumeist einer biologischen Abfallbehandlung in Form von Kompostierung, Vergärung oder Verbrennung unterzogen. Aus Sicht der Kunststoffemissionen sind vor allem Grünguthäcksel, Kompost und Gärprodukte als potenziell Kunststoff enthaltende Stoffströme von Interesse.

7.4.1.1 Kunststoff emittierende Stoffströme

Zur Verwendung von unbehandeltem Bioabfall in Form von Grünguthäcksel liegen keine statistischen Daten zu relevanten Quellen und Mengen sowie auch keine Informationen über typische Schadstoff- und Fremdstoffgehalte vor. Die Anwendung von Grünguthäcksel (insbesondere das Schnittgut mehrjähriger Pflanzen) ist gemäß Bioabfallverordnung (BioAbV) in engen Grenzen für homogene und unvermischte Bioabfälle zur regionalen Verwertung zulässig. Die Entscheidung darüber erfolgt im Einzelfall. Straßenbegleitgrün, Mähgut, Erde oder häusliche Bioabfälle sind bei der Verwendung aber explizit ausgeschlossen, so dass grundsätzlich eher von niedrigen Belastungen auszugehen ist. Bei der Verwendung von Grünguthäcksel werden ressourcenseitige und ökonomische Aspekte (verringertes Transport- und Behandlungsaufwand) als vorteilhaft, phytohygienische Aspekte (Verbreitung von Schad- und Fremdstoffen und Pflanzenkrankheiten, bspw. Feuerbrand) als nachteilig gegenüber der Kompostierung diskutiert. Als Anwendungsgebiete für Grünguthäcksel wird vor allem Getreide, Mais und Zuckerrübe genannt. Dauergrünland, Gemüse, Obst und Baumschulgehölze sind hingegen ausgeschlossen.^{313- 314- 315}

Auch die durch eine industrielle Behandlung (Kompostierung oder Vergärung) hygienisierten Komposte und Gärprodukte tragen zur Humusversorgung des Bodens bei, enthalten wertvolle Pflanzennährstoffe und werden daher in der Landwirtschaft, in der Landschaftsgestaltung und in privaten Haushalten als organische Dünger eingesetzt. Darüber hinaus dienen sie als Substitut für Torf. Sie fallen auch als Nebenprodukt der Erzeugung von Biogas an.

³¹³ Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2013).

³¹⁴ Kehres (2014).

³¹⁵ Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. (2008).

Das Statistische Bundesamt weist für das Jahr 2017 einen Input von ca. 14,18 Millionen Tonnen in Kompostierungsanlagen für Bioabfall- und Grünabfallkompostierungen sowie Vergärungsanlagen aus (als Grünguthäcksel ohne Behandlung verwendete Abfälle sind darin nicht enthalten). Davon entfällt eine Menge von ca. 3,64 Millionen Tonnen auf die Biotonne (Biogut). Weitere 3,91 Millionen Tonnen entfallen auf Garten- und Parkabfälle (Grüngut), vornehmlich aus der öffentlichen Grünflächenpflege sowie aus privater und gewerblicher Grünflächenpflege und Landschaftsgestaltungsmaßnahmen, soweit deren Sammlung nicht über die Biotonne geschieht. Hinzu kommen 5,11 Millionen Tonnen, die in die Vergärung gehen, und 1,52 Millionen Tonnen, die in kombinierten Anlagen (Biogaserzeugung und Kompostierung) verarbeitet werden.³¹⁶ Die Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK)³¹⁷ gibt für den Zeitraum von 2017 bis 2019 einen weiteren Anstieg der Mengen an Bio- und Grüngut sowie Gärresten von ca. 4 % pro Jahr an.³¹⁸ Inwieweit dies auf insgesamt steigende Mengen oder einen erhöhten Anteil von Anlagen, die der Gütesicherung unterliegen, zurückzuführen ist, ist aufgrund der für 2019 noch nicht vorliegenden Zahlen des Statistischen Bundesamtes derzeit unbekannt. Gärrückstände aus reinen NawaRo-Biogasanlagen³¹⁹ sind in den statistischen Daten nicht berücksichtigt. NawaRo- und Tierexkrementanteile, soweit sie in Kofermentationsanlagen verarbeitet werden, sind in der Statistik aber mengenmäßig vollständig enthalten.³²⁰ Insgesamt werden von den Bioabfallbehandlungsanlagen ca. 2,54 Millionen Tonnen Kompost und 3,29 Millionen Tonnen Gärreste für die weitere stoffliche Verwertung produziert. Die Differenz zum Input ergibt sich im Wesentlichen aus dem Rotteverlust sowie der Aussortierung von Fremdstoffen.

Ein Großteil der in Deutschland produzierten Komposte und Gärprodukte sind im Sinne der BGK gütegesichert. Setzt man voraus, dass sich das Verhältnis von Input zu Output bei gütegesicherten und nicht-gütegesicherten Bioabfallanlagen gleich darstellt, so ergibt sich für den Anteil bei der Kompostierung ein Wert von ca. 78 % der verarbeiteten Mengen, der gütegesichert ist. Bei den Gärresten schätzen wir den Anteil der Bioabfälle, welcher der Gütesicherung unterliegt, auf ca. 32 %.³²¹

| Kulturtyp | Anlagen (Anzahl) | | Input [Mt/a] | | Output (Kompost) [Mt/a] | | Output (Gärrest) [Mt/a] | |
|------------------------------------|------------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | gesamt | davon gütegesichert ³²² | gesamt | davon gütegesichert ³²² | gesamt | davon landwirtschaftlich | gesamt | davon landwirtschaftlich |
| Kompostierungsanlagen (Bioabfälle) | 213 | 531 (564) | 3,64 | 7,06 | 1,42 | 1,10 | 0,01 | 0,01 |

Tab. 33 Mengen in der biologischen Abfallbehandlung in Deutschland 2017 (inkl. der gütegesicherten und landwirtschaftlich verwerten Mengen)

³¹⁶ Statistisches Bundesamt (2019e).

³¹⁷ <https://www.kompost.de/ueber-uns/wer-wir-sind>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

³¹⁸ Maria Thelen-Jüngling (2020).

³¹⁹ NaWaRo: nachwachsende Rohstoffen

³²⁰ Schriftliche Information des Statistischen Bundesamtes (Destatis) vom 10.07.2020.

³²¹ Da die BGK den Anteil in kombinierten Biogas- und Kompostanlagen nicht ausweist, haben wir diese Menge sowohl bei den Komposten als auch bei den Gärresten zur Bezugsmenge hinzugerechnet. Die Menge des Inputs in reinen Bioabfallvergärungsanlagen sowie in Anlagen der Ko-Fermentation wurde anhand der Probenahmen multipliziert mit 2000 Tonnen Frischmasse pro Probenahme (gesetzliche Vorgabe aus der Bioabfall-Verordnung) zu 2,1 Millionen Tonnen pro Jahr abgeschätzt.

³²² Werte in Klammern aus 2019; die BGK weist die Mengen aus kombinierten Anlagen nicht getrennt aus.

| | | | | | | | | |
|---|-------------|------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Kompostierungsanlagen (Grünabfall) | 631 | | 3,91 | | 1,96 | 1,08 | 0,00 | 0,00 |
| Kombinierte Kompostierungs- und Vergärungsanlagen | 49 | 126 (135) | 1,52 | Ca. 2,10 | 0,32 | 0,25 | 0,33 | 0,32 |
| Biogas- und Vergärungsanlagen | 248 | | 5,11 | | 0,17 | 0,11 | 3,01 | 2,96 |
| Summe | 1141 | 657 (699) | 14,18 | 9,16 | 3,87 | 2,54 | 3,35 | 3,29 |

7.4.1.2 Kunststoffemissionen

Sowohl im Biogut als auch im Grüngut befinden sich in der Regel unerwünschte Fremdstoffe. Zu diesen Fremdstoffen zählen neben Glas, Steinen und Mineralien auch Kunststoffe. Der zulässige Gehalt an Fremdstoffen wird in der Düngemittelverordnung (DüMV) geregelt. Es wird unterschieden zwischen verformbaren Kunststoffen (insbesondere Folien), mit einem Grenzwert von 0,1 % und sonstigen Fremdstoffen mit einem Anteil von bis zu 0,4 % jeweils bezogen auf die Trockenmasse, zu denen auch harte Kunststoffe und polymerhaltige Verbundstoffe gehören. Allerdings gilt diese Regelung nur für Kunststoffe über 1 Millimeter (bislang 2 Millimeter) Siebdurchgang.³²³ Die BGK nutzt die gleichen Grenzwerte wie die gesetzlichen Vorgaben. Darüber hinaus wird aber bei der Gütesicherung als zusätzliches Kriterium die Flächensumme der Kunststoffpartikel verwendet. Diese darf 15 cm² pro Liter Trockenmasse nicht überschreiten.³²⁴

Als Hauptursache für die Kunststoffe im Biogut werden Fehlwürfe bei der getrennten Sammlung von Bioabfällen angesehen.^{325,326} Die wesentlichen Einträge sind nicht kompostierbare Kunststoffbeutel, die zur Abfallsammlung eingesetzt werden, Lebensmittel, die noch verpackt oder mit anhaftenden Resten von Verpackungen entsorgt werden sowie sonstige Kunststoffprodukte, die im Kontakt mit kompostierbaren Abfällen stehen, z. B. Pflanztöpfe oder Kabelbinder.

Die Kunststoffe im Grüngut sind vor allem Folge der Entsorgung von Pflanzenabfällen ohne vorherige Abtrennung der für die Sammlung eingesetzten Kunststoffsäcke sowie die Entsorgung von Hilfsmitteln des Gartenbaus (Töpfe, Bindedrähte, Schnüre, Klammern etc.). Straßenbegleitgrün, das potenziell hohe Anteile gelitterter Kunststoffe, die durch Mähen und UV-Einstrahlung auch stark fragmentiert sein können, sowie Reifen- und Straßenabrieb enthält, darf gemäß der Bioabfall-Verordnung keiner Verwertung auf landwirtschaftlichen Flächen zugeführt werden.³²⁷

³²³ Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019).

³²⁴ Dieses Kriterium verschärft bei Folien bis zu einer Dicke von 200 µm die Vorgabe aus der DüMV.

³²⁵ Kehres (2016).

³²⁶ Kehres (2020).

³²⁷ Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2017).

Gleiches gilt für die Reststoffe aus der Wartung von Versickerungsflächen, Ableitungsgräben sowie Retentionsbodenfiltern. Über die Entsorgungswege dieser in der Regel höher mit Fremdstoffen belasteten Stoffströme liegen keine gesonderten statistischen Informationen vor. Sofern sie von Dritten entsorgt werden, sind von diesen gegenüber der abgebenden Stelle (bspw. Straßenmeistereien) allerdings die erforderlichen Nachweise zu erbringen.³²⁸

Kunststoffeinträge bei Gärprodukten und Komposten können neben obigen Einträgen auch aus der Ko-Fermentation von Klärschlämmen (zur direkten Verwendung von Klärschlämmen vgl. Kapitel 7.4.2) sowie der Entsorgung insbesondere unverpackter Lebensmittel entstehen. Die Schlämme können sowohl Mikroplastik als auch gelöste oder gelartige Polymere enthalten. Inwieweit beispielsweise Schlämme aus der Papier- oder Lebensmittelproduktion noch Kunststoffbestandteile aufweisen, ist unbekannt. Ein häufig verwendeter polymerer Hilfsstoff, der sowohl bei der Konditionierung der Schlämme (verbesserte Abtrennung der festen Bestandteile) als auch der Gärprodukte selber eingesetzt wird, sind Flockungshilfsmittel auf Basis von Polyacrylamiden.^{329, 330, 331} Die bisherigen Ergebnisse lassen vermuten, dass die Abbaubarkeit von Polyacrylamid gerade noch den Anforderungen der DüMV entspricht (> 20 % in zwei Jahren), allerdings gibt es auch Nachweise für die Entstehung mobiler organischer Verbindungen als Abbauprodukte.^{332, 333} Flockungshilfsmittel sowie sonstige lösliche oder gelartige Polymere werden bei der Gütesicherung nicht analysiert und quantifiziert. Dosiermengen für Flockungshilfsmittel liegen bei 0,4 bis 1,6 Kilogramm pro Tonne Gärrest bzw. 20 bis 40 Kilogramm pro Tonne Trockenmasse im Gärrest.^{331, 334}

Die Ko-Vergärung unverpackter Lebensmittel, deren Menge auf bis zu 730 000 Tonnen pro Jahr geschätzt wird, ist nach der massiven Freisetzung an der Schlei in Schleswig-Holstein und der nachfolgenden Novellierung der DüMV inzwischen nicht mehr zulässig.^{335,336, 337} Die Lebensmittel müssen, so lange sie verpackt sind, von anderen Bioabfällen getrennt gehalten werden und dürfen erst nach der Entpackung einer biologischen Behandlungsanlage zugeführt werden. Inwieweit bei vorgeschalteten Entpackungsprozessen ggf. noch Verpackungsreste in die biologische Behandlung eingetragen werden, ist bislang noch unbekannt. Im Konzept für eine ordnungsgemäße Verwertung von verpackten Lebensmittelabfällen der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) werden als vorbeugende Maßnahme schneidende, quetschende und perforierende Verarbeitungsprozesse empfohlen,

³²⁸ Persönliche Auskunft: Strassen.NRW, G. Dahmen, 15.07.2020.

³²⁹ Kirsch (2016).

³³⁰ Raussen und Kern (2016).

³³¹ HeGo Biotec GmbH (2020).

³³² Hennecke et al. (2018).

³³³ Xiong et al. (2018).

³³⁴ DWA (2012).

³³⁵ Kehres (2020).

³³⁶ Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019).

³³⁷ Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2017).

die der Entstehung von kleinteiligen Kunststofffragmenten entgegenwirken sollen.³³⁸

Die Verunreinigung im Ausgangsmaterial vor allem im Biogut beträgt lokal bis zu 3 %. Um bei solch hohen Verschmutzungsgraden die rechtlichen Vorgaben zu erreichen, sind Abscheidegrade von mindestens 95 % erforderlich. Will man die deutlich niedrigeren Kunststoffkonzentrationen in gütegesichertem Kompost beibehalten, sind bei 3 % Verunreinigung im Input sogar Abscheidegrade von über 99,5 % erforderlich.³³⁹ Letzteres ist nur mit hohem apparativen Aufwand und entsprechend hohen Kosten darstellbar. Problematisch ist diesbezüglich, dass Experten einen steigenden Anteil an Fremdstoffen beklagen, wofür vor allem eine unzureichende Öffentlichkeitsarbeit verantwortlich gemacht wird.³⁴⁰

Im Rahmen der Güteüberwachung wird auch die in der Bioabfallverordnung vorgeschriebene Beprobung und Bestimmung von Fremdstoffen durchgeführt.³²⁷ Es ist dabei mindestens eine Untersuchung pro 2000 Tonnen Frischmasse durchzuführen. Die BGK gibt für 2017 bei 7,06 Millionen Tonnen Komposten eine Probenzahl von 3536 für (Biogut- und Grünabfallanlagen) an. Daraus ergibt sich, dass pro 1997 Tonnen eine Beprobung durchgeführt wurde.³⁴¹ Die vorgeschriebenen Beprobungen werden dabei über den Jahresverlauf auf verschiedene Kompost- und Gärrestprodukte (Substrat, Frisch- und Fertigungskompost, flüssige und feste Gärprodukte, fein-, mittel- und grobkörnige Fraktionen) aufgeteilt. Die Identifikation von Kunststoffen findet durch visuelle und manuelle Auslese und Verwiegung bzw. Bestimmung der Flächensumme statt.³⁴² Inwieweit sich durch diese Probenahmestrategie ein repräsentatives Bild der Kunststoffverunreinigungen ergibt, ist bislang nicht untersucht. Ringversuche an mit Kunststoff dotierten Proben, die zur Überprüfung der Qualität der Probenahme und Analytik durchgeführt werden, waren allerdings erfolgreich. Die zur Dotierung genutzten Kunststoffe waren im Vergleich zur realen Situation allerdings nur eingeschränkt repräsentativ.³⁴³

Nicht nur auf der Ebene der sammelnden Haushalte, sondern auch auf der Ebene der verarbeitenden Anlagen gibt es große Unterschiede; so liegen die Mediane der Fremdstoffgehalte teilweise deutlich unter den Mittelwerten. Dies ist ein Hinweis darauf, dass es einige wenige Anlagen mit deutlich erhöhten Kunststoffanteilen in den Komposten und Gärprodukten gibt. Auch stichprobenhafte Einsichten öffentlich zugänglicher Jahreszeugnisse der Gütesicherung zeigen erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagen. Nichtsdestotrotz liegen die ermittelten Werte für gütegesicherte Komposte deutlich unter den gesetzlichen Grenzwerten

³³⁸ Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (2019).

³³⁹ Dies ergibt sich aus einem Berechnungsmodell, dass vom BGK zur Verfügung gestellt wurde.

³⁴⁰ Kehres (2020).

³⁴¹ Eine analoge Überprüfung für die Gärreste ist nicht möglich, da hier nicht ausgewiesen wird, wie hoch der Anteil aus reinen NawaRo-Anlagen ist.

³⁴²

https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Guetesicherung/Dokumente_Kompost/P9999_2016_K.pdf;

https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Guetesicherung/Dokumente_Gaerprodukt/Dok_245-008-1_Uumfang.pdf, letzter Zugriff am 4.02.2021.

³⁴³ Schaaf et al. (2018).

der Düngemittelverordnung. Die BGK weist in ihren Themenpapieren daraufhin, dass eine Ausschöpfung der gesetzlichen Grenzwerte (0,5 % Kunststoff über 1 Millimeter) zu einem Produkt führen würde, das am Markt nicht akzeptiert würde. In der Tat werden die gesetzlichen Grenzwerte von den gütegesicherten Produkten nur zu 2 bis 10 % ausgeschöpft. In den letzten Jahren sind die von der BGK ermittelten Kunststoffgehalte in Biogut-Komposten deutlich gesunken (Abb. 17). Währenddessen sind sie bei Grüngutkompost und Gärresten von 2016 zu 2018 gestiegen, aber gleichzeitig in der zweiten Hälfte des Jahres 2018 im Vergleich zur ersten Jahreshälfte deutlich gesunken. Worauf diese divergierende Entwicklung zurückzuführen ist, ist unklar. Möglich wäre eine verbesserte Anlagentechnik oder erhöhte Anteile abgewiesener/aussortierter Mengen etc.

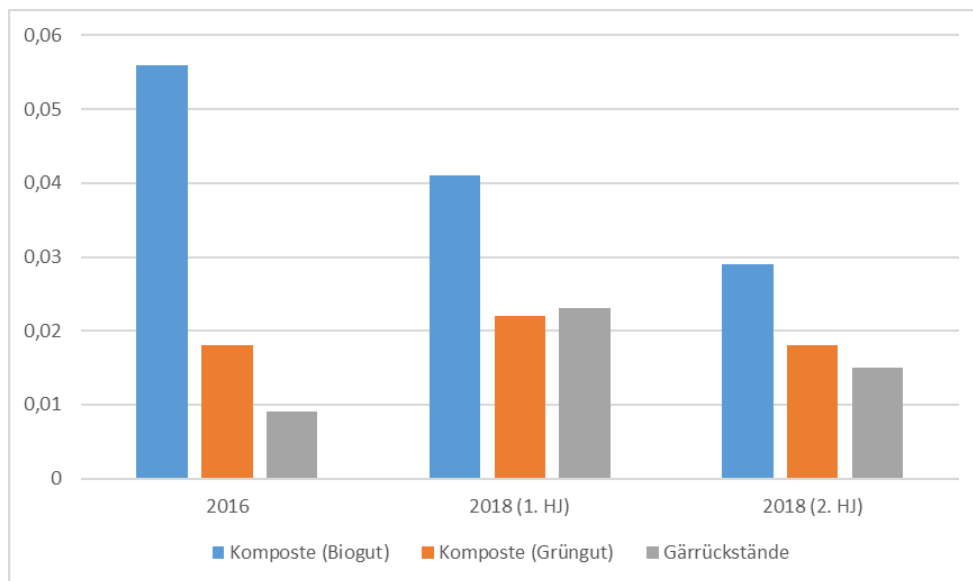


Abb. 17 Entwicklung der Kunststoffanteile in gütegesicherten Komposten und Gärresten)³⁴⁴.

Für die Abschätzung der Kunststofffrachten in Komposten und Gärresten werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Gehalte in Kompost und Gärresten entsprechen dem Mittelwert der Werte aus 2016 und 2018
- Die Komposte aus kombinierten Anlagen und Biogas- und Vergärungsanlagen werden den Biogutkomposten zugeordnet
- Für nicht gütegesicherte Komposte nehmen wir abweichend eine ca. 50%ige Ausschöpfung der Grenzwerte bei den verformbaren Kunststoffen (Folien) und den nicht-verformbaren Kunststoffen, sowie einen Anteil von 25 % des Grenzwertes bei den Fremdstoffen für nicht-verformbaren Fremdstoffen an ($50 \% \times 0,5 \% = 0,025 \%$ verformbare Kunststoffe, $50 \% \times 25 \% \times 0,4 \% = 0,05 \%$ nicht verformbare Kunststoffe)
- Aufgrund der Nichtberücksichtigung der Fraktion < 2 Millimeter (in Zukunft < 1 Millimeter) wird ein Aufschlag von 5 % vorgenommen

³⁴⁴ Kern (2019).

- Aufgrund der sehr niedrigen Probenahmehäufigkeit (1x 2000 t) sowie die rein manuell-visuelle Analytik, durch die eine hohe Gefahr des Nichterkennens von Kunststoffen nach einer biologischen Behandlung besteht, wird ein Aufschlag von 50 % vorgenommen
- In ca. 5 % der Vergärungsanlagen werden Flockungshilfsmittel (kationische Polyacrylamide) mit einer durchschnittlichen Menge von 20 Kilogramm pro Tonne Trockenmasse eingesetzt.³⁴⁵ Die Polymerfrachten werden vollständig der festen Phase zugeschrieben

Im Jahr 2019 wurden Gärreste nahezu vollständig und Komposte zu 52,6 % in der konventionellen Landwirtschaft, zu 5,2 % im ökologischen Landbau, zu 2,6 % für Sonderkulturen und zu 1,9 % im Erwerbsgartenbau eingesetzt. Insgesamt werden daher ca. 62 % direkt auf landwirtschaftliche Böden eingesetzt. Weitere 20,6 % werden in Erdenwerken verarbeitet und substituieren dort vor allem Torf.³⁴⁶ Wieviel von dieser Menge wiederum in die professionelle Landwirtschaft gelangt, ist unbekannt. Insgesamt schätzen wir die Menge landwirtschaftlich und gartenbaulich genutzter Komposte und Gärreste auf 70 %.

Im Ergebnis ergeben sich daraus die Werte nach Tabelle 14 und eine Gesamtemission durch den Komposteinsatz von 1764,2 Tonnen und auf landwirtschaftliche Böden von ca. 1235 Tonnen pro Jahr. Berücksichtigt man, dass die Kunststoffgehalte in den Jahren 2016 und 2018 um ca. 50 % um den Mittelwert schwankten, ergibt sich eine realistische Schwankungsbreite von 617 bis 1851 Tonnen pro Jahr.

Bei einer intensiven Kompostdüngung werden ca. 10, bei einer durchschnittlichen ca. 7 Tonnen Trockenmasse pro Hektar und Jahr aufgebracht.³⁴⁷ Es ergeben sich Flächenbelastungen von ca. 7,02 bzw. ca. 3,51 Kilogramm pro Hektar und Jahr.

³⁴⁵ Persönliche Auskunft: J. Albertsen; Email vom 18.08.2020

³⁴⁶ Maria Thelen-Jüngling (2020).

³⁴⁷ <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/boden/kompost.htm>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

| Kunststoffe als Fremd- stoffe | Mengen [Mt FM/a] | | Trocken- masse- anteil [%] | Kunststoffanteil [Gew-%/kg TM] | | Kunststofffracht [t/a] | |
|--|--------------------|---|--|---|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | gütege- sichert | nicht gü- tegesi- chert | | gütege- sichert | nicht gü- tegesi- chert | gütegesi- chert | nicht gütegesi- chert |
| Komposte (Biogut) | 1,14 (78 %) | 0,32 (22 %) | 61,8 | 0,046 | 0,1 | 324,1 | 197,8 |
| Komposte (Grüngut) | 0,84 (78 %) | 0,24 (22 %) | 59,4 | 0,019 | 0,1 | 94,8 | 142,6 |
| Gärrück- stände | 1,05 (32 %) | 2,24 (68 %) | 6,8 | 0,014 | 0,1 | 10,0 | 152,3 |
| Summe | | | | | | 428,9 | 492,7 |
| Zuschlag für Partikel < 2mm: +5% | | | | | | 21,4 | 24,7 |
| Zuschlag für visuell-manuelle Auslese: +50% | | | | | | 214,5 | 246,4 |
| Summe | | | | | | 664,8 | 763,8 |
| Gesamtsumme (Kunststoffe als Fremdstoffe) | | | | | | 1 428,6 | |
| Kunststoffe in Form von Flockungs- hilfsmitteln | Menge [t FM/a] | Trocken- masse- anteil [% TM/FM] | Anteil von An- lagen, die Flo- ckungs- hilfsmit- tel ein- setzen [%] | Menge der Flo- ckungs- hilfsmit- tel [kg / t TM] | | | |
| Gärrück- stände | 3,29 | 6,8 | 5 | 20 | | | 335,6 |
| Gesamtsumme (Kunststoffe als Fremdstoffe und Flockungshilfsmittel) | | | | | | 1 764,2 | |
| _davon Eintrag in landwirtschaftliche Böden | | | | | | 1 234,9 (617 - 1 851) | |

Tab. 34 Kunststoffemissionen durch Verwertung von Komposten und Gärresten

7.4.2 Klärschlamm

Klärschlämme werden aufgrund ihrer Nährstoffgehalte bodenbezogen verwertet. Die bodenbezogene Verwertung weist eine günstige Klimabilanz auf und ist im Vergleich zu anderen Entsorgungspfaden kostengünstig. Auch im Vergleich zur Herstellung von Phosphatdüngemitteln erscheint die Rückgewinnung ökologisch und ökonomisch chancenreich.³⁴⁸ Insbesondere der im Klärschlamm enthaltene Phosphor ist bei einer landwirtschaftlichen Verwertung von Interesse, da er einen essenziellen Pflanzennährstoff darstellt.^{349 350} Andererseits hat die teils hohe Belastung von Klärschlämmen mit Schwermetallen und organischen Schadstoffen wie PAK, PCB, PFOS, sowie auch mit Pflanzenschutzmitteln wie Glyphosat, Bioziden wie Triclosan oder diversen Pflanzenpathogenen dazu geführt, dass die bodenbezogene Verwer-

³⁴⁸ Kraus et al. (2018).

³⁴⁹ DWA (2015).

³⁵⁰ Wiesler et al. (2016).

tung in den letzten Jahren immer weiter reduziert wurde. Gleichzeitig wurden Vorgaben für die Phosphorrückgewinnung im Rahmen der thermischen Verwertung gemacht (vgl. Kapitel 7.4.4.2).

7.4.2.1 Kunststoff enthaltende Stoffströme

In 2016 fielen in Deutschland aus öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen 1,77 Millionen Tonnen (Trockenmasse, TM) Klärschlamm und aus industriellen Abwasserbehandlungsanlagen 0,544 Millionen Tonnen (TM) an. Bis 2018 reduzierte sich die Klärschlammmenge aus öffentlichen Anlagen kaum (1,75 Millionen Tonnen (TM)). Für die industriellen Klärschlämme werden die Zahlen nur alle drei Jahre erhoben, sodass für 2018 keine detaillierten Zahlen vorlagen.^{351 352}

In 2018 wurden noch 280 325 Tonnen (TM) bzw. 16,0 % der Klärschlämme aus der öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen stofflich in der Landwirtschaft verwertet. Gegenüber 2010 hat sich die aufgebrauchte Menge halbiert. Demgegenüber betragen die direkt landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme aus der Industrie in 2016 nur 18 211 Tonnen (TM) (vgl. Tab. 35). Neben der direkten landwirtschaftlichen Verwertung gibt es weitere bodenbezogene Verwertungsrouten, in denen Klärschlämme aus der öffentlichen und industriellen Abwasserbehandlung verwertet werden. Dazu gehören landschaftsbauliche Maßnahmen, bei denen Klärschlämme direkt oder kompostiert eingesetzt werden, sowie die sonstige stoffliche Verwertung über Vererdung, Vergärung oder als Baustoff. Letzteres ist insbesondere bei Industrieschlämmen mit 76 428 Tonnen pro Jahr mengenmäßig relevant. In Bezug auf kompostierte, vererdete und vergorene Klärschlämme ist unklar, welche Mengen über diesen Weg nachgelagert landwirtschaftlich verwertet werden und warum sie in der Statistik nicht auch – zumindest teilweise – der landwirtschaftlichen Verwertung zugeordnet werden.

| Jahr | 2010 | 2016 | 2018 |
|---|---------|---------|---------|
| Öffentliche KS | | | |
| Landwirtschaft | 566 295 | 423 497 | 280 325 |
| Landschaftsbau (Kompostierung, Rekultivierung) | 259 312 | 169 439 | 122 615 |
| Sonstige Verwertung (Baustoffe, Vererdung, Vergärung) | 58 052 | 31 064 | 33 206 |
| Industrielle KS | | | |
| Landwirtschaft | 49 093 | 18 211 | - |
| Landschaftsbau (Kompostierung, Rekultivierung) | 58 477 | 34 200 | - |
| Sonstige Verwertung (Baustoffe, Vererdung, Vergärung) | 79 472 | 76 428 | - |

Tab. 35 Bodenbezogene Verwertung von öffentlichen und industriellen Klärschlämmen in D (2010, 2016, 2018)^{353, 354}

³⁵¹ Statistisches Bundesamt (2018).

³⁵² Statistisches Bundesamt (2019a).

³⁵³ Statistisches Bundesamt (2019a).

³⁵⁴ Statistisches Bundesamt (2018).

Infolge der Novellierung der Abfallklärschlamm-Verordnung müssen ab 2032 die Klärschlämme von Anlagen ab 50 000 Einwohnerwerten (EW) thermisch verwertet werden.³⁵⁵ Diese Anlagen behandeln ca. 58 % des Abwassers in Deutschland.³⁵⁶ Geht man davon aus, dass sich die Menge anfallenden Klärschlammes proportional zu den Abwassermengen verhält, so dürfte sich auch die bodenbezogene Verwertung und damit die landwirtschaftliche Nutzung des Klärschlammes in den kommenden Jahren weiter verringern. Sie wird aber nicht – wie gelegentlich vermutet – gänzlich eingestellt werden. Insgesamt schätzen wir die landwirtschaftliche Verwertung auf ca. 13 bis 19 % bezogen auf die Gesamtmenge (öffentliche und nicht-öffentliche Klärschlämme) von ca. 2,3 Millionen Tonnen.³⁵⁷

Neben den Klärschlämmen werden auch weitere ca. 20 000 Tonnen Schlämme aus der nicht-öffentlich chemisch-physikalischen Abwasserbehandlung landwirtschaftlich verwertet.³⁵⁴ Über Art und Herkunft dieser Schlämme liegen keine weiteren Informationen vor, so dass sie im Weiteren nicht weiter betrachtet werden können.

In Bezug auf die noch praktizierte landwirtschaftliche Verwertung gibt es deutliche Unterschiede in den Bundesländern.³⁵⁸ Vor allem Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Rheinland-Pfalz und Niedersachsen verwerten noch über 50 % des Klärschlammes in der Landwirtschaft. In absoluten Zahlen werden aber in Niedersachsen die größten Mengen ausgebracht (Tab. 36).

Durchschnittlich werden in Deutschland jährlich 17,8 Kilogramm pro Hektar (Spannbreite in den Bundesländern von 0,8 bis 60 Kilogramm pro Hektar) ausgebracht. Ca. 50 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche ist aber durch Verordnungen von der Klärschlammverwertung ausgenommen (vgl. Kapitel 7.4.4.2). Im Klärschlammbericht des Landes Niedersachsens wird für das Jahr 2017 eine Ausbringung von ca. 81 000 Tonnen (TM) auf eine Fläche von ca. 38 000 Hektar (1,5 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche Niedersachsens) ausgewiesen. Dies entspricht einer Austragsmenge von ca. 2,1 Tonnen pro Hektar. Eine entsprechende Menge kann nicht jährlich auf die gleiche Fläche ausgebracht werden, da dies oberhalb der zulässigen Menge von fünf Tonnen in drei Jahren läge (vgl. Kapitel 7.4.4.2). Nichtsdestotrotz wird sich die Klärschlammausbringung auf eine eher geringe landwirtschaftliche Nutzfläche konzentrieren. Klärschlamm wird üblicherweise alle drei Jahre auf die gleichen Flächen aufgebracht. Auf Basis dieser Annahme lässt sich für Deutschland die Größe der mit Klärschlamm beaufschlagten Fläche im Jahr 2018 auf ca. 133 000 Hektar abschätzen. Gleichzeitig beträgt die insgesamt für die Klärschlammaufbringung verwendete Fläche ca. 400 000 Hektar (entsprechend ca. 2,6 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche).

³⁵⁵ <https://www.umweltwirtschaft.com/news/wasser-und-abwasserbehandlung/schlamm-und-reststoffbehandlung/Klaerschlamm-Klaerschlammverwertung-in-Deutschland--Entwicklung-und-Tendenzen-18794>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

³⁵⁶ Statistisches Bundesamt (2013).

³⁵⁷ Für den oberen Prozentwert haben wir angenommen, dass ca. 50 % der landschaftsbaulichen und anderweitig verwerteten Klärschlämme über Kompost oder Vererdung nachgelagert ebenfalls der Landwirtschaft zugeführt werden.

³⁵⁸ Statistisches Bundesamt (2019a).

| Bundesland | landwirtschaftlich verwertete Menge [t/a TM] | landwirtschaftlich genutzter Anteil in Bezug auf die Ge- samtmasse [%] | durchschnittliche Aufbringung auf die landwirtschaftliche Nutzfläche [kg/ha] |
|------------------------------------|--|---|--|
| Baden-Württemberg | 1 145 | 0,5 % | 0,81 |
| Bayern | 22 894 | 8,0 % | 7,32 |
| Berlin | | | |
| Brandenburg | 2 287 | 3,7 % | 1,73 |
| Bremen | 866 | 4,4 % | |
| Hamburg | | | |
| Hessen | 24 124 | 16,3 % | 31,24 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 26 181 | 57,3 % | 19,45 |
| Niedersachsen | 58 493 | 36,2 % | 22,61 |
| Nordrhein-Westfalen | 25 169 | 6,8 % | 17,24 |
| Rheinland-Pfalz | 43 172 | 53,2 % | 60,96 |
| Saarland | 4 026 | 22,3 % | 52,56 |
| Sachsen | 9 265 | 13,9 % | |
| Sachsen-Anhalt | 7 983 | 15,7 % | 6,79 |
| Schleswig-Holstein | 43 135 | 63,1 % | 43,64 |
| Thüringen | 11 585 | 26,0 % | 14,89 |
| Landwirtschaft – gesamt | 280 325 | 16,0 % | 17,79 |

Tab. 36 Landwirtschaftlich verwertete kommunale Klärschlämme im Jahr 2018 nach Bundesländern³⁵⁸ (Spalte 3 und 4 eigene Berechnungen)

Zu den Kulturarten gibt es bislang nur wenig öffentlich verfügbare Informationen, auch wenn diese auf den Lieferscheinen der Klärschlamm Entsorgungsbetriebe vorhanden sind. Aus den Klärschlammberichten der Länder lässt sich abschätzen, dass Klärschlämme vor allem in solchen Regionen aufgebracht werden, die aufgrund fehlender Tierzucht nicht über Wirtschaftsdünger verfügen.³⁵⁹ In landwirtschaftlichen Foren wird vor allem die Anwendung bei Mais und Raps empfohlen.

7.4.2.2 Kunststoffemissionen

Kunststoffe in Klärschlämmen sind aus Sicht der Landwirtschaft unerwünschte Fremdstoffe. Im Wesentlichen müssen dabei zwei Komponenten unterschieden werden: polymere Flockungshilfsmittel, die zur Entwässerung des Klärschlammes eingesetzt werden, sowie Kunststoffe, die als Folge der Behandlung von Niederschlags- und Schmutzwasser in den Klärschlamm übergehen.

Die erforderlichen Einsatzmengen an Flockungshilfsmitteln, zumeist Polyacrylamide, sind von der Art des zu entwässernden Klärschlammes abhängig. Aerob

³⁵⁹ Persönliche Auskunft: Fr. Engelke, Landwirtschaftskammer Niedersachsen; 16.09.2020.

stabilisierte Klärschlämme (zumeist Kläranlagen < 100 000 EWG³⁶⁰) benötigen Polymermengen von 10 bis 20 Kilogramm aktivem Polymer pro Tonne (TM). Klärschlämme aus der anaeroben Abwasserbehandlung benötigen, aufgrund des höheren Mineralisierungsgrades, deutlich kleinere Mengen (ca. 5 bis 10 Kilogramm pro Tonne (TM)).³⁶¹ Nimmt man eine mittlere Einsatzmenge von 10 Kilogramm pro Tonne Trockenmasse an, so ergeben sich Mengen von ca. 23 000 Tonnen pro Jahr. Diese gehen weitgehend vollständig in den Klärschlamm über, da dies der explizite Sinn ihrer Anwendung ist. Polymere Flockungshilfsmittel dürfen nur eingesetzt werden, wenn sie zu mindestens 20 % in zwei Jahren abgebaut werden. Mengemäßige Beschränkung existieren nicht.

Kunststoffemissionen, die aus Abrieb und Verwitterung entstehen, werden häufig in öffentliche Infrastrukturen freigesetzt, insbesondere auf Verkehrsflächen. Von diesen gelangen die Emissionen in die Atmosphäre und Böden, aber auch in die Siedlungswasserwirtschaft. Unice et al. schätzen bspw. den Anteil des Reifenabriebs, der in die Siedlungswasserwirtschaft gelangt, auf 48 %.³⁶² Als Näherung kann angenommen werden, dass sich der Abrieb von Straßen und Straßenbahnmarkierungen sowie Schuhsohlen analog verhält. Für Abblätterungen von Fassadenfarben oder Emissionen aus Kunstrasenplätzen dürfte dieser Anteil aufgrund der Entfernung zu Straßen und der Einbettung in vegetative Flächen geringer sein (Schätzwert 25 %).

Im Gegensatz dazu gehen über das Schmutzwasser entsorgte Kunststoffe wie Fasern aus der Textilwäsche, Kosmetik-Microbeads und Trübungsstoffe, Farbe aus der Reinigung von Gebinden und Pinseln oder der Abrieb von Kunststoffrohren des Abwassersystems selbst nahezu im vollen Umfang in die Siedlungswasserwirtschaft über.

Kunststoffe, die das Abwassersystem erreichen, müssen nicht zwangsläufig auch in die Kläranlage gelangen. Vor allem außerorts oder in siedlungswasserwirtschaftlichen Gebieten mit getrennter Ableitung von Schmutz- und Niederschlagswasser (Trennsystem) werden große Teile der Niederschläge den Vorflutern (Gewässern) ungeklärt zugeführt. Übersteigt bei Starkregenereignissen die Abwassermenge die Kapazitäten der Kläranlagen, gibt es sogenannte Mischwasserabschläge, bei denen Niederschlags- und Schmutzwasser ebenfalls weitgehend ungeklärt die siedlungswasserwirtschaftlichen Anlagen passiert. Es wird angenommen, dass Niederschlagswasser nur zu 38,5 %, Schmutzwasser zu 99 % und das gesamte Abwasser zu 78,5 % in die Kläranlage gelangen.³⁶³

Die Transferfaktoren aus dem Kanalsystem in die Kläranlage können darauf aufbauend analog festgesetzt werden. Für solche Emissionen, die vor allem durch Niederschläge transportiert werden (Abrieb von Reifen, Straßen, Straßenbahnmarkierungen und Schuhsohlen, Sportstätten sowie abgeblätterte Fassadenfarben), liegt der

³⁶⁰ EWG = Einwohnergleichwerte = angeschlossene Einwohnerzahl + in Einwohnerzahläquivalente umgerechnete gewerbliche Einleiter.

³⁶¹ Persönliche Auskunft: J. Albertsen; Email vom 8.08.2020.

³⁶² Unice et al. (2019b).

³⁶³ Bertling, Hamann und Bertling (2018).

Transferfaktor bei 38,5 %. Für über das Schmutzwasser abgeleitete Kunststoffe aus Kosmetik, WPR und Textilfasern liegt der Transferfaktor bei 99 % und für Emissionen, die das Gesamtsystem betreffen (Abwasserrohre, Plastic Litter), bei 78,5 %.

Makrokunststoffe dürften innerhalb der Kläranlage zum Großteil im vorgeschalteten Rechen abgeschieden werden. Aufgrund der Größe der eingesetzten Loch- und Siebgitter passiert vor allem Mikroplastik < 5 Millimeter die Rechen.³⁶⁴ Das abgetrennte Rechengut wird in der Regel thermisch verwertet. Dem Rechen nachgeschaltet ist der Sandfang, hier können Partikel aus Kunststoffen mit hoher Dichte abgetrennt werden. Die im weiteren Verlauf der Kläranlage nicht biologisch abgebauten Partikel gelangen anschließend überwiegend in den Klärschlamm. In Bezug auf den Klarauslauf der Kläranlage kann davon ausgegangen werden, dass durch die Kläranlagen Abscheidegrade über 95 % erreicht werden.^{365, 366} Nur sehr kleine Partikel sowie gelöste und nicht ausreichend schnell abbaubare Polymere können die Kläranlage passieren.

In Kapitel 8.2 wird die Menge an Makrokunststoffen, die in die Kläranlage gelangt, auf ca. 4700 Tonnen pro Jahr geschätzt. Es ist unklar, welcher Anteil davon dem Plastic Litter entstammt und welcher Anteil durch falsche Entsorgung über das Schmutzwasser (Flushing) in die Kläranlagen gelangt. Grundsätzlich besteht vor allem bei dem Anteil, der über die Niederschlagsentwässerung abgeleitet wird, die Gefahr, dass er ungeklärt in die Vorfluter gelangt. Es wird angenommen, dass 78,5 % der Kläranlage zugeführt werden. Bei einer Abscheiderate des Rechens von 80 % landen ca. 738 Tonnen Makrokunststoff pro Jahr im Klärschlamm.³⁶⁷ Es dürfte sich dabei im Wesentlichen um Folienfragmente, Strohhalme, Wattestäbchen etc. handeln, also Objekte, die aufgrund ihrer Form (flächig, stäbchenförmig) die Rechen und Siebe passieren können.

Dem Rechen schließt sich der Sandfang an. Das abgetrennte Sandfanggut wird in der Regel nicht in der Landwirtschaft, sondern als Baumaterial verwertet oder deponiert.³⁶⁸ Wie groß der Anteil des Abriebs von Reifen, Polymerbestandteilen im Asphalt und Straßenbahnmarkierungen ist, der nicht im Sandfang, sondern im Klärschlamm verbleibt, ist nicht untersucht. Für das Sandfanggut werden für Deutschland schwankende Mengen von 120 000 bis 150 000 Tonnen pro Jahr angegeben.^{369, 370} Für die organischen Anteile (zu denen Polymere, aber auch feinteilige Nahrungsmittelreste und Pflanzenteile gehören) werden Anteile von 10 bis 50 % angenommen. Beim häufig praktizierten Einsatz von nachgeschalteten Sandwäschern wird der Organikanteil im Sandfanggut auf unter 3 % (Glühverlust) redu-

³⁶⁴ Thompson (2012).

³⁶⁵ Talvitie et al. (2017).

³⁶⁶ Finnson (2021).

³⁶⁷ Kuhn (2014).

³⁶⁸ https://www.lfu.bayern.de/abfall/klaerschlamm/doc/abfaelle_abwasser.pdf, letzter Zugriff am 4.02.2021.

³⁶⁹ Statistisches Bundesamt und DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.2 "Statistik" (2014).

³⁷⁰ Statistisches Bundesamt (2019e).

ziert, um die Verwertung als mineralischer Baustoff zu ermöglichen. Die abgetrennte Leichtfraktion inklusive des Kunststoffs wird dem Klärprozess in der Regel wieder zugeführt, so dass die Kunststofffracht sich letztlich im Klärschlamm wiederfindet.³⁷¹ Es wird angenommen, dass der Organikanteil im Sandfanggut im Mittel 5 - 10 % (entsprechend ca. 6000 bis 15 000 Tonnen pro Jahr) nicht übersteigt.

Aus der Zusammenstellung der wichtigsten Quellen sowie der Transferfaktoren in die Siedlungswasserwirtschaft und von dieser in die Kläranlagen lassen sich die Kunststoffeinträge in Kläranlagen abschätzen. Die Quellen wurden von Fraunhofer UMSICHT erstmals 2018 analysiert und befinden sich derzeit in Überarbeitung. Die entsprechenden Berichte werden 2021 veröffentlicht. Die Zahlen in Tab. 37 stellen den aktuellen Kenntnisstand dar. Mangels anderer Zahlen wird angenommen, dass sich die Kunststofffracht aus Textilwäsche, Kosmetik/WPR und Flockungshilfsmitteln nahezu vollständig, das Plastic Litter nur zu 20 % und die übrigen Einträge zu 75 % im Klärschlamm wiederfinden. Im Ergebnis ergibt sich eine Kunststofffracht von 52 406 Tonnen pro Jahr im Klärschlamm.

Geht man davon aus, dass die Kunststoffgehalte in den Klärschlämmen zur bodenbezogenen und thermischen Verwertung gleich sind und nimmt man eine Quote für die landwirtschaftliche Verwertung von 16 % (Spannbreite 13 bis 19 %) an, so ergibt sich eine Emissionsmenge von 8.385 Tonnen pro Jahr (Spannbreite: 5644 bis 12 897 Tonnen pro Jahr). Bezogen auf die Gesamtmasse des in öffentlichen und nichtöffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen anfallenden Klärschlamms von 2,3 Millionen Tonnen pro Jahr ergibt sich ein Kunststoffgehalt von ca. 2,3 %. Dies liegt deutlich über dem für die Fraktion > 1 Millimeter zulässigen Fremdstoffanteil (gemäß DüMV: 0,4 % für Altpapier, Karton, Glas, Metalle und plastisch nicht verformbare Kunststoffe und 0,1 % für verformbare Kunststoffe (Folien), vgl. Kapitel 7.3.5.3). Es kann allerdings erwartet werden, dass der größte Teil der hier abgeschätzten Kunststofffracht aus Partikeln deutlich unter 1 Millimeter besteht (Reifenabrieb, Textilfasern) und daher außerhalb des in der Düngemittelverordnung geregelten Bereichs liegt. Die gelitterte Plastikmenge (Makroplastik), deren Fragmente und Objekte eher größer als 1 Millimeter sind, erreicht für sich allein einen Gehalt von ca. 0,04 %, liegt also deutlich unterhalb des gesetzlichen Grenzwertes.

Nichtsdestotrotz findet eine Überprüfung von Klärschlämmen auf Fremdstoffe und insbesondere Kunststofffrachten eher sporadisch als systematisch statt.³⁷² Eine Mikroplastikanalytik ist bislang weder vorgeschrieben noch verfügbar. Aktuell finden Ringversuche der Firma Bruker statt, in denen durch Kombination von Sedigraph und Spektroskopie eine Bestimmung der Mikroplastikkonzentrationen erprobt wird.³⁷³

³⁷¹ Persönliche Auskunft: Frank Berkenbusch, PWL Anlagentechnik; 16.09.2020

³⁷² Bspw. sind in den üblichen Laboruntersuchungen für Klärschlamm der Firma Agrolab Fremdstoffuntersuchungen nicht enthalten. Diese sollen separat beauftragt werden, wenn Fremdstoffe nicht sicher ausgeschlossen werden können; vgl. <https://www.agrolab.com/de/aktuelles/umwelt-wasser-news/1019-klärschlamm-duemv-aenderung-2019.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

³⁷³ Mündliche Auskunft: LuFa Nordwest, Dr. Hoffmann; 16.09.2020.

Um die Kunststoffemissionen in Relation zu setzen, ist zu beachten, dass neben den festen Kunststoffemissionen bspw. aus Kosmetik, Wasch-, Putz- und Reinigungsmitteln jährlich ca. 45 000 bis 50 000 Tonnen gelöste und gelartige Polymere in die Kläranlagen gelangen.³⁷⁴ Allerdings dürften diese Polymere dem biologischen Abbau tendenziell leichter zugänglich sein als die festen Kunststoffemissionen. Sie werden in dieser Studie nicht mitbetrachtet.

Nizzetto et al.³⁷⁵ bestimmten für die Gesamtmenge der durch Kompost und Klärschlamm emittierten Mikroplastikmenge auf landwirtschaftliche Böden für Deutschland einen Wert von ca. 7000 bis 10 000 Tonnen pro Jahr aus einer überschlägigen Abschätzung. Dies ist in guter Übereinstimmung mit dem in Tab. 37 abgeschätzten Wert von 8.385 Tonnen pro Jahr (Spannbreite: 5 655 - 12 897).

Mit dem oben bestimmten typischen Wert für die Klärschlammdüngung von 2,1 Tonnen pro Hektar und Jahr ergibt sich eine durchschnittliche Flächenbelastung von 20,96 Kilogramm pro Hektar und Jahr.

³⁷⁴ Bertling, Hamann und Hiebel (2018).

³⁷⁵ Nizzetto, Futter und Langaas (2016).

| Quelle | Typische Polymere | Freisetzung pro Jahr [t/a] | Übergang in die Siedlungswasserwirtschaft [%] | Übergang in die Kläranlage [%] | Übergang in den Klärschlamm [%] | Menge in Klärschlamm pro Jahr [t/a] |
|--|---------------------------------------|--------------------------------|---|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Straßenbahnmarkierungen ³⁷⁶ | div. Duro- und Thermoplaste | 8 900 (5 000 - 15 000) | 48 | 38,5 | 75 | 1 178 (661 - 1 986) |
| Straßenabrieb ³⁷⁶ | (Polymer-)Bitumen | 2 500 (1 500 - 3 500) | 48 | 38,5 | 75 | 346 (208 - 624) |
| Reifen ³⁷⁶ | Natur- und Synthekautschuk | 147 235 (120 000 - 180 000) | 48 | 38,5 | 75 | 20 406 (16 632 - 24 948) |
| Farben – Verwitterung ³⁷⁶ | div. Polymerdispersionen | 10 185 (5 000 - 15 000) | 25 | 38,5 | 75 | 735 (360 - 1 083) |
| Farben - Reinigung ³⁷⁶ | div. Polymerdispersionen | 2 605 (1 500 - 3 500) | 100 | 99 | 75 | 1 934 (1 113 - 2 599) |
| Sportstätten ³⁷⁶ | NR/SBR, PUR, EPDM, TPE | 8 000 (4 000 - 12 000) | 25 | 38,5 | 75 | 578 (289 - 1 155) |
| Schuhsohlen ³⁷⁶ | PU, TPU, EVA, NR | 2 499 (1 500 - 3 500) | 48 | 38,5 | 75 | 347 (208 - 485) |
| Abwasserrohre ³⁷⁷ | PE, PP, PVC | 250 (100 - 400) | 100 | 78,5 | 75 | 147 (59 - 236) |
| Textilwäsche ³⁷⁶ | PET, PA, PAK | 2 253 (1 500 - 2 500) | 100 | 99 | 95 | 2 119 (1 411 - 2 351) |
| Kosmetik, WPR (MP) ³⁷⁸ | PE, PA, PLA, PTFE, Copolymere, Wachse | 977 (500 - 1 500) | 100 | 99 | 95 | 912 (467 - 1 400) |

Tab. 37 Kunststoffeinträge und -anteile im Klärschlamm

³⁷⁶ Eigene Abschätzung, entsprechende Quellenberichte werden noch 2021 veröffentlicht.

³⁷⁷ Auftragsstudie Fraunhofer UMSICHT, unveröffentlicht.

³⁷⁸ Bertling, Hamann und Hiebel (2018).

| Quelle | Typische Polymere | Freisetzung pro Jahr [t/a] | Übergang in die Siedlungswasserwirtschaft [%] | Übergang in die Kläranlage [%] | Übergang in den Klärschlamm [%] | Menge in Klärschlamm pro Jahr [t/a] |
|--|-------------------|-------------------------------------|---|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Flockungshilfsmittel (s. Kap. 7.4.2.2) | Polyacrylamid | 23 000 (15 000 - 30 000) | 100 | 99 | 100 | 22 770 (14 804 - 29 608) |
| Makroplastik (s. Kap. 8.2) | Diverse | 12 300 (5 250 - 22 500) | < 38 | 78,5 | 20 | 734 (328 - 1406) |
| Kunststoffeinträge in KS gesamt | | 52 406 (43 540 - 67 881) | | | | |
| Kunststoffeinträge über landwirtschaftliche KS-Verwertung (13 – 19 %) | | 8 385 (5 655 - 12 897) | | | | |

7.4.3 Wirtschaftsdünger

Als Wirtschaftsdünger werden organische Substanzen bezeichnet, die in der Landwirtschaft anfallen und gleichzeitig verwendet werden. Zu den Wirtschaftsdüngern zählen Gülle, Jauche, Mist und Stroh (letzteres sofern es direkt in die Böden eingearbeitet wird). Sofern dieser Wirtschaftsdünger mit Kunststoffemissionen befrachtet ist, sind diese die Emissionen, die bereits im Rahmen anderer Quellen bilanziert werden. Um eine Doppelbilanzierung zu vermeiden, werden daher die Kunststofffrachten von Wirtschaftsdüngern im Weiteren nicht berücksichtigt.

Nichtsdestotrotz ist der Fremdstoffgehalt von Wirtschaftsdüngern insbesondere bei der Verwertung außerhalb des eigenen Betriebes relevant und wird in der Dünge- und Düngemittelverordnung geregelt. Der Fokus liegt dabei aber eher auf Schadstoffen, Phosphor und Stickstoffgehalten. Letzteres insbesondere vor dem Hintergrund einer hohen Nitratbelastung von Grund- und Oberflächenwasser.³⁷⁹

7.4.4 Rechtliche Situation

7.4.4.1 Komposte und Gärprodukte

Mikroplastikeinträge aus Komposten und Gärprodukten ergeben sich, wenn diese auf den Boden aufgebracht, das heißt als Düngemittel eingesetzt werden. Der relevante Rechtsrahmen ist das Düngemittelrecht, welches in Kapitel 7.3.5.3 ausführlicher dargestellt ist.

Für Komposte und Gärrückstände ist in der EU-Düngeprodukteverordnung geregelt, dass diese max. 0,3 % Verunreinigungen beinhalten dürfen. Ab 2026 wird dieser Grenzwert auf 0,25 % abgesenkt.

7.4.4.2 Klärschlamm

Die deutsche Klärschlammverordnung (AbfKlärV)³⁸⁰ regelt die Verwertung von Klärschlämmen. In der Neuordnung vom 27. September 2017 wurden diverse neue Regelungen beschlossen, die u. a. auf Phosphorrückgewinnung und Einschränkungen in der bodenbezogenen Verwertung (landwirtschaftliche Nutzung, Nutzung bei Maßnahmen des Landschaftsbaus, Nutzung zu forstwirtschaftlichen Zwecken, Nutzung in Haus-, Nutz- oder Kleingärten) abzielen.

Die AbfKlärV nimmt keinen direkten Bezug auf den Gehalt von Mikroplastik. Kunststoff- bzw. Mikroplastikeinträge ergeben sich potenziell dann, wenn Klärschlamm bodenbezogen verwertet wird. Diesbezüglich macht die AbfKlärV eine Reihe von Vorgaben.

³⁷⁹ <https://www.agrolab.com/de/produkte-leistungen/agraranalytik/wirtschaftsduenger-analytik.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

³⁸⁰ Klärschlammverordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465), die zuletzt durch Artikel 6 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist.

Grundsätzlich schreibt die AbfKlärV den Klärschlamm erzeugenden Betrieben eine hochwertige Verwertung vor, soweit diese technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist. Konkret heißt es, dass »eine Rückgewinnung von Phosphor und eine Rückführung des gewonnenen Phosphors oder der phosphorhaltigen Klärschlammverbrennungsrückstände in den Wirtschaftskreislauf anzustreben«³⁸¹ ist.

Wenn keine Phosphorrückgewinnung, sondern eine bodenbezogene Verwertung erfolgt, sind verschiedene Anforderungen einzuhalten. Zur mengenmäßigen Ausbringung macht die AbfKlärV hier folgende Vorgaben:

- Innerhalb von drei Kalenderjahren dürfen nicht mehr als 5 Tonnen Klärschlamm Trockenmasse je Hektar auf oder in einen Boden auf- oder eingebracht werden. Bei landschaftsbaulichen Maßnahmen ist eine einmalige Auf- oder Einbringung von Klärschlamm von bis zu 10 Tonnen Trockenmasse je Hektar zulässig, sofern auf diesem Boden in den letzten sechs Jahren vor der Auf- oder Einbringung keine Auf- oder Einbringung erfolgt ist (§ 14 (1))
- Für Klärschlammgemische gilt ebenso eine Grenze von 5 Tonnen Trockenmasse Klärschlamm pro Hektar. Für Klärschlammkomposte gelten abweichend 10 Tonnen Trockenmasse (Klärschlammanteil) pro Hektar alle 6 Jahre. Für landschaftsbauliche Maßnahmen gelten maximal 20 Tonnen Trockenmasse je Hektar alle 10 Jahre (§ 14 (2))

Daneben gibt es verschiedene Verbote für das Aufbringen von Klärschlamm, Klärschlammgemischen und -komposten, je nach Bodennutzung. Generell nicht zulässig ist die bodenbezogene Verwertung auf landwirtschaftlich genutzten Böden für Klärschlämme aus Abwasserbehandlungsanlagen, in denen Abwasser aus der industriellen Kartoffelverarbeitung behandelt wurde (§ 15 (4)). Eine bodenbezogene Verwertung ist darüber hinaus nach § 15 (5) nicht zulässig für Böden mit folgender Nutzung:

- als Grünland und Dauergrünland
- als Ackerfutteranbaufläche
- als Anbaufläche für Mais, ausgenommen zur Körnernutzung und zur Verwendung in der Biogaserzeugung, sofern keine Einarbeitung des Klärschlammes vor der Saat erfolgt ist
- als Anbaufläche für Zuckerrüben, sofern die Zuckerrübenblätter verfüttert werden sollen und im Anbaujahr keine Auf- oder Einbringung des Klärschlammes vor der Saat erfolgt ist
- als Anbaufläche für Gemüse, Obst oder Hopfen
- als Haus-, Nutz- oder Kleingarten oder
- zu forstwirtschaftlichen Zwecken

Für Boden, der zum Anbau von Feldgemüse genutzt wird, muss zwischen der letzten erfolgten bodenbezogenen Verwertung und dem Anbaubeginn mindestens ein Abstand von 2 Jahren (24 Monaten) liegen.

³⁸¹ § 3, Absatz 1.

Darüber hinaus nicht zulässig ist das Aufbringen von Klärschlamm, Klärschlammgemischen und Komposten auf Böden in Wasserschutzgebieten der Schutzzonen I, II und III und in Naturschutzgebieten, Nationalparks, nationalen Naturmonumenten, Naturdenkmälern, geschützten Landschaftsbestandteilen und gesetzlich geschützten Biotopen, wobei die zuständige Behörde hier im Einvernehmen mit der zuständigen Naturschutzbehörde und der landwirtschaftlichen Fachbehörde auf Antrag des Klärschlammnutzers die Verwertung zulassen kann (§ 15 (6)).

Wichtige Folgeänderungen bzw. Verschärfungen treten in den Jahren 2029 und 2032 in Kraft.

Ab 2029 wird § 3 (hochwertige Verwertung soweit technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar; bodenbezogene Verwertung entsprechend den weiteren Vorgaben der Verordnung) dahingehend geändert, dass eine Pflicht zur Phosphorrückgewinnung für Klärschlämme mit einem Phosphorgehalt von mindestens 20 Gramm pro Kilogramm Trockenmasse eingeführt wird (direkte Phosphorrückgewinnung oder Rückgewinnung nach thermischer Vorbehandlung). Die bodenbezogene Verwertung ist ab dem Jahr 2029 nur noch für Klärschlämme aus Abwasserbehandlungsanlagen mit einer Ausbaugröße < 100 000 Einwohnerwerte zulässig. Ab 2032 ist die bodenbezogene Verwertung nur noch für Klärschlämme aus Anlagen mit einer Ausbaugröße von max. 50 000 Einwohnerwerten zulässig. Die Anforderungen der AbfklärV sind in Tab. 38 zusammengefasst.

| Relevante Rechtsakte | Anforderungen |
|----------------------------------|---|
| Klärschlammverordnung (AbfklärV) | <p>Hochwertige Verwertung (eine Rückgewinnung von Phosphor und eine Rückführung des gewonnenen Phosphors oder der phosphorhaltigen Klärschlammverbrennungssasche in den Wirtschaftskreislauf) ist anzustreben soweit technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar</p> <p>Ab 2029 keine bodenbezogene Verwertung mehr aus Anlagen mit Ausbaugröße über 100 000 Einwohnerwerten</p> <p>Ab 2032 keine bodenbezogene Verwertung mehr aus Anlagen mit Ausbaugröße über 50 000 Einwohnerwerten</p> <p>Maximal erlaubte Ausbringung von 5 Tonnen Klärschlamm (Trockenmasse) pro Hektar über drei Jahre bzw. bei landschaftsbaulichen Maßnahmen 10 Tonnen pro Hektar alle 6 Jahre</p> <p>Für Klärschlammkomposte 10 Tonnen alle 6 Jahre bzw. bei landschaftsbaulichen Maßnahmen 20 Tonnen alle 10 Jahre</p> <p>Beschränkungen bei den Kulturarten (Details siehe Text)</p> |

Tab. 38 Klärschlamm: relevanter Rechtsakt und rechtliche Anforderungen

7.4.5 Freiwillige Standards

Das **RAL-GZ 247 für Abwasserschlämme (AS)-Düngung** stellt Anforderungen an die Qualität von Abwasserschlämmen für die landwirtschaftliche Verwertung (vgl. Tab. 32Tab. 32). Die Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) e. V. definiert die Kriterien und gibt das Gütezeichen heraus. Relevant für die Kunststoffeinträge in die Umwelt sind hier insbesondere die Anforderungen an den Fremdstoffgehalt. Der

Anteil Fremdstoffe, welche bei einer Siebung mit einer Maschenweite von 2 Millimeter abgetrennt werden, darf nicht mehr als 0,5 Gew.-% gemessen am Trockenprodukt betragen. Die Methoden zur Durchführung von Probenahmen und Untersuchungen werden vom Güteausschuss bestimmt und sind gemäß den Unterlagen der BGK durchzuführen. Für das **RAL-GZ 258 für Veredelungsprodukte aus Abwasserschlamms bzw. Komposte aus der aeroben Behandlung von Klärschlamm**, welches von der BGK herausgegeben wird, gelten die gleichen Grenzwerte wie für RAL-GZ 247.

7.4.6 Maßnahmenvorschläge zur Reduktion der Einträge

Während nach AbfKlärV bereits zum jetzigen Stand eine »hochwertige Verwertung«³⁸² anzustreben ist – soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist – und für den Fall der bodenbezogenen Verwertung die beschriebenen Einschränkungen gelten, wird dies durch die Folgeänderungen der Verordnung 2029 und 2032 weiter eingeschränkt. Die bodenbezogene Verwertung ist demnach nur noch für Klärschlamm aus Anlagen mit < 50 000 Einwohnerwerten (EW) eine Möglichkeit. Der Anteil des durch Anlagen mit < 50 000 EW geklärten Abwassers beträgt ca. 40,8 % (Daten von 2013). Die Menge an ausgebrachtem Klärschlamm und damit der Kunststoffeintrag dürfte sich in Zukunft verringern, jedoch nicht um knapp 60 %, wie man vermuten könnte, sondern um einen geringeren Anteil, da große Anlagen schon bisher mehr thermisch verwerten. Beispielsweise wird in Städten wie Hamburg und Berlin der Klärschlamm bereits heute vollständig verbrannt (Roskosch/Heidecke 2018).³⁸³

Eine Ausweitung auf Anlagen < 50 000 EW würde also zu einer weiteren Reduktion der Mikroplastikeinträge aus der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlamm beitragen.

³⁸² D. h. eine Rückgewinnung von Phosphor und eine Rückführung des gewonnenen Phosphors oder der phosphorhaltigen Klärschlammverbrennungssasche in den Wirtschaftskreislauf.

³⁸³ Roskosch, Andrea; Heidecke, Patric (2018): Klärschlammmentsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klaerschlammmentsorgung-in-der-bundesrepublik>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

8 Exkurs: Littering und Landwirtschaft

Die Analysen zum Littering sind im Rahmen des vorliegenden Berichts aus zwei Gründen von besonderer Bedeutung. Einerseits können Kunststoffe direkt auf landwirtschaftlichen Flächen gelittert, über die Siedlungswasserwirtschaft und Klärschlamm aufgebracht werden sowie durch laterale Drift infolge von Wind, Regen oder Verschleppung auf landwirtschaftliche Flächen verschoben werden. Andererseits dient die durchschnittliche Litteringrate als Referenzwert, um zu sinnvollen Freisetzungsraten zu kommen (Vor allem in den Kapiteln 7.1 und 7.2 werden auf ihrer Basis mit qualitativen Argumenten Abschätzungen zur Freisetzungsraten durchgeführt.). Dies setzt voraus, dass landwirtschaftliche Betriebe so wie die allgemeine Öffentlichkeit agieren und gleichzeitig die Aufgabe der Infrastruktureinigung für die eigenen Flächen übernehmen. Dies ist ein hoher Anspruch, der eine professionell agierende Landwirtschaft voraussetzt. Ob die in Kapitel 7 eher konservativ berechneten niedrigen Freisetzungsraten sich in der Praxis bestätigen, müssen zukünftige experimentelle Untersuchungen zeigen.

8.1 Littering

Unter Littering wird das achtlose Wegwerfen oder Liegenlassen von Abfällen am Ort des Entstehens verstanden.³⁸⁴ Zum Litter gehören neben den achtlos weggeworfenen und liegengelassenen Abfällen weiterhin solche Abfälle, die versehentlich in die Umwelt gelangen (z. B. unbemerktes Herausfallen aus Taschen, Teile, die in Folge von Unfällen eingetragen wurden oder verlorengegangene Ladung). Vom Littering unterschieden wird häufig die illegale Abfallentsorgung, bei der Vorsatz unterstellt wird und die Vermeidung von Entsorgungskosten im Vordergrund steht. Dennoch ist bereits das Littering im deutschen Recht sanktioniert (bußgeldbewehrt), sodass keine klare Trennung zwischen Littering und illegaler Abfallentsorgung erkennbar ist.³⁸⁵

Auch wenn es eine Vielzahl von qualitativen Untersuchungen zur Litteringproblematik gibt, liegen bislang keine systematischen empirischen Untersuchungen vor, aus denen sich quantitative Abschätzungen zum Littering ableiten lassen. Kraus et al. zeigten aber bereits in den 70er Jahren, dass im öffentlichen Raum ca. 5 bis 10 % der Menschen littern.³⁸⁶ Diese Anteile, die in sehr spezifischen Situationen ermittelt wurden, lassen sich aber kaum als Durchschnittswert auf jegliche reale Situationen übertragen. Für einen innerstädtischen Bereich in der Schweiz beobachteten sie, dass die Zahl der litternden Personen in einem zeitlich und räumlich begrenzten Bereich (Verweilen auf einer Sitzbank in einer Fußgängerzone) ca. 8 % beträgt. Gleichwohl gaben sie für die gelitterte Abfallmenge Werte von 30 % an, während die korrekt in bereitstehenden Abfallbehältern entsorgte Menge 70 % betrug. Sie

³⁸⁴ Heeb et al. (2005).

³⁸⁵ Bertling et al.: Plastik in der Umwelt – Glossar; Veröffentlichung geplant für 2021.

³⁸⁶ Krauss, Freedman und Whitcup (1978).

zeigten weiterhin, dass durch die Verwendung von Einwegverpackungen, bei abnehmender Wertschätzung des öffentlichen Raums und bei bereits vorhandener Verschmutzung oder vorgelebtem Littering das Littering ebenfalls deutlich zunimmt.^{387, 388}

Jambeck et al.³⁸⁹ gingen in ihrem viel beachteten Beitrag zur Marine Plastic Litter-Problematik 2015 davon aus, dass die Litteringquote für Kunststoffe global bei ca. 2 % des Abfallaufkommens liegt. Diese Quote wurde aus einer Littering-Studie in den USA abgeleitet.³⁹⁰ Allerdings handelt es sich bei dieser Quote um die Menge, die von staatlichen und privaten Organisationen eingesammelt wird. In Bezug auf Kunststoffemissionen ist aber gerade die Menge von Interesse, die nicht erfasst wird, also in der Umwelt verbleibt. Das Verhältnis des in der Umwelt verbleibenden Litters zum Litter insgesamt wird auch als Schlupfquote bezeichnet.

Die Bestimmung der Schlupfquote ist schwierig, da diese Größe naturgemäß einer direkten Messung kaum zugänglich ist. Bei der Schätzung der Schlupfquote durch Experten ist davon auszugehen, dass sich diese auf die von ihnen verantworteten Flächen beziehen. Da aber nicht alle Flächen Infrastruktureinigungsmaßnahmen unterliegen (bspw. Privatgrundstücke), ist davon auszugehen, dass der Anteil der nicht erfassten Abfälle eher höher ausfällt. Gleichzeitig ist unklar, ob die nicht erfassten Abfälle dauerhaft in der Umwelt verbleiben oder bei einer nachfolgenden Infrastruktureinigungsmaßnahme zumindest teilweise doch noch erfasst werden. Dies würde die Quote des verbleibenden Litters senken.

Die Conversio Market & Strategy GmbH führte im Auftrag der BKV GmbH eine detaillierte Studie zum Littering durch.³⁹¹ Dabei wurde eine Vielzahl von Abfallbilanzen und Zeitungsmeldungen ausgewertet, in denen sich Daten zu »wildem Müll« für verschiedene Kommunen oder Länder finden ließen.³⁹² Daraus ergab sich bezogen auf die ordnungsgemäß erfassten Abfälle (Siedlungsabfälle und siedlungsabfallähnliche Gewerbeabfälle) eine Quote für den gelitterten Abfall von 0,37 %. Die Schlupfquote des bei Infrastruktureinigungsmaßnahmen (Reinigung von Straßen und Grünflächen) nicht erfassten Litters wurde in einer Befragung von Fachleuten auf 25 % und der Kunststoffanteil im Litter auf 55 % geschätzt. Im ordnungsgemäß erfassten Abfall beträgt der Kunststoffanteil hingegen nur 15 %. Daraus ergibt sich für den nach Infrastruktureinigungsmaßnahmen verbleibenden Kunststoff-Litter eine Quote von 0,45 % bezogen auf die ordnungsgemäß erfassten Post-Consumer-

³⁸⁷ Heeb und Hoffelner (2004).

³⁸⁸ Heeb und Hoffelner (2005).

³⁸⁹ Jambeck, Geyer und Wilcox (2015).

³⁹⁰ Stein (2009).

³⁹¹ Workshop der BKV GmbH vom 16.05.2018 in Frankfurt a. M. (<https://www.bkv-gmbh.de/>; <https://www.conversio-gmbh.com/de/>), letzter Zugriff am 4.02.2021.

³⁹² Protokoll zur Veranstaltung vom 16.05.2018, zugesandt per Email von Stephanie Cieplik (BKV) am 27.09.2018.

Kunststoffabfälle (5,2 Millionen Tonnen in 2017³⁹³). Dies entspricht einer Gesamtmenge von 23 400 Tonnen verbleibenden Kunststoff-Litter pro Jahr für Deutschland.

Zimmermann et al.³⁹⁴ untersuchten in ihrer Abschätzung im Auftrag des Umweltbundesamtes ebenfalls das Littering von Kunststoffen. Es wurden Straßenränder, Raststätten, Parkanlagen, Fußgängerzonen, Flussrandstreifen, Küsten und Binnenbadestellen als Eintragsorte berücksichtigt. Als Besonderheit der Studie wurden illegal entsorgte und gelitterte Abfälle unterschieden und nur letztere beim Littering berücksichtigt. Der Anteil des Kunststoffs am Litter beträgt für den Bereich der Straßenränder inkl. Rastanlagen laut der genutzten Quelle (Beyer und Winter³⁹⁵) im Gegensatz zur Annahme bei Conversio nur 22 % (direkter Kunststoffanteil ohne Berücksichtigung der Kunststoffanteile in Verbundstoffen). Im mengenmäßig wichtigen Bereich der Parkanlagen beträgt er basierend auf Papierkorbanalysen sogar nur 6 %. Die Schlupfquoten wurden durch die befragten Experten mit 3 % für Parkanlagen und 15 % für Straßenränder ebenfalls deutlich niedriger angenommen als bei Conversio. Insgesamt ergibt sich hier eine verbleibende Menge Kunststoff-Litter von nur ca. 1500 t/a für Deutschland. Würde man in der Studie von Zimmermann et al. auf die Unterscheidung zwischen illegal entsorgten und gelitterten Abfällen verzichten, würde sich die in der Umwelt verbleibende Menge Kunststoff-Litter auf 3750 t/a erhöhen.³⁹⁶

| Flächennutzungstyp | Littereintrag [t/a] | Kunststoff-Littereintrag [t/a] | Verbleibender Kunststoff-Litter [t/a] |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| Straßenränder | 23 822 (21 314 - 26 998) | 5 241 (4 689 - 5 940) | 786 (234 - 1 485) |
| Rastanlagen | 2 342 | 515 | 52 (26 - 77) |
| Parkanlagen | 101 005 | 6 060 | 182 (59 - 309) |
| Fußgängerzonen | >646 | 646 | 3,2 (0,6 - 6,5) |
| Flussrandstreifen | 1 591 | 560 | 342 (232 - 451) |
| Küste | 699 | 210 | 107 (81 - 134) |
| Binnenbadestellen | 145 | 43 | 26 (17 - 35) |
| Gesamtsumme | >130 250 | 13 275 | 1 498 (651 - 2 497) |

Tab. 39 Kunststoff-Litter: Abschätzung von Zimmermann et al.³⁹⁶

Bertling et al. schätzten in einer Studie zu Mikro- und Makroplastikemissionen im Jahr 2018 die Menge des in der Umwelt verbleibenden Kunststoff-Litters auf 34 000 Tonnen pro Jahr.³⁹⁷ Dazu wurden Schätzungen zu erfassten Mengen,

³⁹³ https://www.plasticseurope.org/download_file/force/2235/319, letzter Zugriff am 4.02.2021.

³⁹⁴ Zimmermann et al. (2019).

³⁹⁵ Beyer und Winter (2016).

³⁹⁶ Zimmermann et al. (2019).

³⁹⁷ Bertling, Hamann und Bertling (2018).

Schlupfquoten und Kunststoffanteilen bei Infrastrukturreinigungsmaßnahmen und der Rechenabtrennung in der Siedlungswasserwirtschaft vorgenommen. Laut der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) fallen je nach Größe einer Stadt ca. 15,5 Kilogramm (13 bis 18 Kilogramm) Straßenkehrrecht pro Einwohner und Jahr an.³⁹⁸ Aus Expertenbefragungen wurde der Anteil an Kunststoff (ohne Organik, Mineralien, Papier und Sonstige) auf ca. 5 % und die Schlupfquote innerorts auf 20 % geschätzt. Die Menge des jährlich gelitterten Kunststoffabfalls ergibt 0,98 Kilogramm pro Person bzw. 80 500 Tonnen für Deutschland und die in der Umwelt verbleibende Menge Kunststoff-Litter einen Wert von 16 100 Tonnen pro Jahr. Analog zur Vorgehensweise bei Zimmermann et al. wurden auch für diese Abschätzung Daten des Landesbetriebs Straßenbau NRW als Grundlage zur Schätzung der Kunststoffemissionen an Straßenrändern und auf Rastplätzen außerorts verwendet. Dabei wurde die Menge eingesammelter hausähnlicher Abfälle mit ca. 7500 Tonnen (ohne Papierkorbentleerungen) angenommen.³⁹⁹ Bei einem Anteil an den außerörtlichen Straßen in NRW von ca. 8 % wurde die Menge für Deutschland auf etwa 90 000 t/a hochgerechnet. Im Gegensatz zur Vorgehensweise bei Zimmermann et al. wurde keine Korrektur nach dem Verkehrsaufkommen vorgenommen. Der Kunststoffanteil wurde zu 20 % angenommen. Der Kunststoffanteil bei Siedlungsabfall beträgt im Durchschnitt nur ca. 11 %. Experten schätzten den Kunststoffanteil aber höher ein, weil bspw. durch Regen aufgeweichtes Papier und Organik deutlich weniger eingesammelt wird und der Kunststoffanteil aufgrund des hohen Verpackungsanteils im Litter grundsätzlich deutlich höher ist als im Siedlungsabfalldurchschnitt. Da an überörtlichen Straßen keine geschlossene Bebauung existiert, viel Abfall die Infrastrukturflächen durch Verwehungen leicht verlassen kann und gleichzeitig große Mengen beim Grünschnitt zerkleinert werden, die anschließend kaum noch gesammelt werden können, wurde weiterhin eine eher hohe Schlupfquote von 50 % angenommen. Es ergibt sich eine gelitterte Kunststoffmenge von ca. 36 000 Tonnen pro Jahr und eine verbleibende Menge Kunststoff-Litter von 18 000 Tonnen pro Jahr. Insgesamt ergibt sich aus der Analyse von Straßenkehrrecht innerorts und Straßenreinigung außerorts eine gelitterte Kunststoffmenge von 116 000 Tonnen pro Jahr und eine Menge an nicht erfasstem Litter von ca. 34 000 Tonnen pro Jahr.

In Tab. 40 sind die wichtigsten Werte aus den vier Studien gegenübergestellt. Die erzielten Ergebnisse zum verbleibenden Kunststoff in der Umwelt variieren deutlich. Grundsätzlich werden in allen Ansätzen nur bestimmte Flächen in Ansatz gebracht. Insbesondere die Conversio-Studie beschränkt sich auf die Angaben der Kommunen zur illegalen Müllentsorgung, berücksichtigt aber nicht den normalen Straßenkehrrecht oder Mengen aus den Angaben der überörtlichen Straßenmeistereien. Wenn bei den Daten von Fraunhofer UMSICHT der hohe Anteil an mitbilanzierter Mineralik und Organik im Straßenkehrrecht herausgerechnet wird, würde sich die gelitterte Abfallmenge etwa auf vergleichbare Werte wie bei Zimmermann et

³⁹⁸ Bayerisches Landesamt für Umwelt (2015).

³⁹⁹ <https://www.strassen.nrw.de/de/strassenbetrieb/abfall-an-strassen.html>, letzter Zugriff am 4.02.2021.

al. verringern, gleichzeitig aber der Kunststoffanteil deutlich steigen. Ein realistischer Wert für die gelitterte Abfallmenge (ohne Mineralik und Organik) dürfte bei 350 000 bis 450 000 t/a liegen. Der Kunststoffanteil im Litter wurde bei Zimmermann et al.⁴⁰⁰ und Jambeck et al.⁴⁰¹ ähnlich zum Anteil in Siedlungsabfällen angenommen. Die Expertenbefragungen, die die Grundlage für die Abschätzung bei Lindner⁴⁰² und Bertling et al.⁴⁰³ bilden, legen aber nahe, dass der Kunststoffanteil im Litter tendenziell höher ist, wobei der hohe Wert bei Lindner vom Autor selbst bezweifelt wurde und mit dem hohen Volumen von Verpackungsabfällen und der daraus resultierenden visuellen Überbewertung durch die Fachleute begründet wurde. Der niedrige Wert bei Fraunhofer UMSICHT in der Tabelle resultiert wiederum aus der Mitbilanzierung von Mineralik und Organik beim Straßenkehricht. Realistisch erscheint für den Kunststoffanteil daher ein Wert von 15 bis 20 %. Die Schlupfquote ist eine besonders spekulative Größe, da sie einer empirischen Untersuchung kaum zugänglich ist. Sie wird im Folgenden auf 10 bis 25 % geschätzt. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte erscheinen ein Basiswert für verbleibenden Kunststoff-Litter von 12 300 t/a und Maximal- bzw. Minimalwerte von 22 500 bzw. 5250 t/a sinnvoll.

Statt die Litteringquote auf die erfassten Kunststoffabfälle (6,2 Millionen Tonnen pro Jahr im Jahr 2017) zu beziehen, ist es zweckmäßiger, die verbrauchte Kunststoffmenge von 11,8 Millionen Tonnen pro Jahr als Bezugsgröße zu verwenden.⁴⁰⁴ Andernfalls würde eine Erhöhung der Menge erfasster Kunststoffabfälle gleichzeitig auch einen Mengenzuwachs beim Littering bedeuten, was nicht sinnvoll ist, da man bei einer verbesserten Erfassung eine Reduktion des Verbleibs in der Umwelt erwarten würde. Bezieht man den in der Umwelt verbleibenden Kunststoff-Litter auf die verbrauchte Kunststoffmenge, ergibt sich ein Wert von 0,105 % als Basiswert für die Kunststoff-Litter-Quote. Bei einem durchschnittlichen Kunststoffverbrauch in Deutschland von 142 Kilogramm pro Person und Jahr⁴⁰⁵ wird demnach im Durchschnitt eine Kunststoffemission durch Littering von ca. 149 Gramm pro Person und Jahr verantwortet.

⁴⁰⁰ Zimmermann et al. (2019).

⁴⁰¹ Jambeck, Geyer und Wilcox (2015).

⁴⁰² BKV GmbH (2017).

⁴⁰³ Bertling, Hamann und Bertling (2018).

⁴⁰⁴ BKV GmbH (2018).

⁴⁰⁵ Berchnet mit dem Kunststoffverbrauch von 2017 (11,8 Millionen Tonnen, Conversio (2020b); Conversio (2018)) und einer Bevölkerungszahl von 83 Millionen

| Quelle | Gelitterter Abfalleintrag [t/a] | Verbleibender Litter [t/a] (Schlupfquote [%]) | Verbleibender Kunststoff-Litter [t/a] (Kunststoffanteil [%]) | Kunststoff-Litter-Quote bezogen auf Kunststoffverbrauch |
|-----------------------------|---------------------------------|---|--|---|
| Zimmermann et al. (2019) | 327 000 ⁴⁰⁶ | 37 605 (11,5 %) | 3750 (10 %) | 0,03 % |
| Conversio (2018) | 155 000 | 38 750 (25 %) | 23 400 (55 %) | 0,20 % |
| Bertling et al. (2018) | 1 790 000 ⁴⁰⁷ | 411 700 (23 %) | 34 000 (8,3 %) | 0,29 % |
| Jambeck (2015) | 924 000 | 924 000 (100 %) | 120 000 (13 %) ⁴⁰⁸ | 1,02 % |
| Max (diese Studie) | 450 000 | 112 500 (25 %) | 22 500 (20 %) | 0,19 % |
| Basis (diese Studie) | 400 000 | 70 000 (17,5 %) | 12 300 (17,5 %) | 0,105 % |
| Min (diese Studie) | 350 000 | 35 000 (10 %) | 5 250 (15 %) | 0,04 % |

Tab. 40 Abschätzungen zu Kunststofflittering in Deutschland im Vergleich

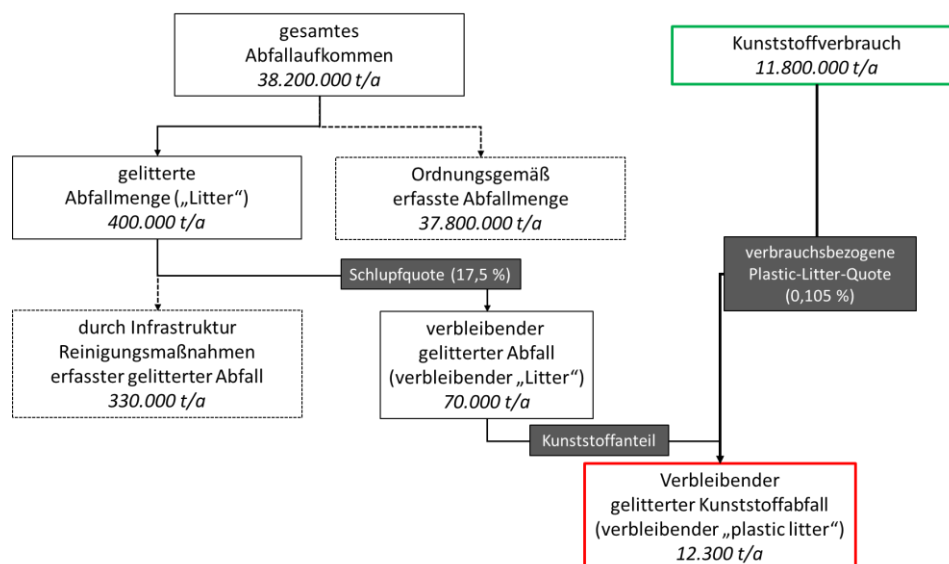


Abb. 18 Stoffstrombild zu Kunststoff-Litter (nur Basiswerte)

8.2 Kunststoff-Litter-Einträge in die Siedlungswasserwirtschaft

Ein Teil des in der Umwelt verbleibenden Litters gelangt durch Niederschlagsabflüsse direkt in die Gewässer. Von den Siedlungs- und Verkehrsflächen erreicht aber vor allem innerorts ein Teil des Litters auch das System der Siedlungswasserwirtschaft. Gleichzeitig wird aber auch durch das häusliche und gewerbliche

⁴⁰⁶ Die von Ökopol in der eigenen Studie vorgenommene Unterteilung in Litter und illegal entsorgten Abfall wurden hier zusammengefasst.

⁴⁰⁷ Die große Menge ergibt sich aus dem hohen Anteil Mineralik im Kehricht.

⁴⁰⁸ Jambeck et al. unterscheiden nicht zwischen erfasstem und verbleibendem Litter (allerdings schätzen sie den Eintrag in die Meere über eine kritische Distanz zur Küste ab).

Schmutzwasser zusätzlich Litter (Abfälle, die nicht zu den üblichen und vorgesehenen Frachten des Schmutzwassers gehören) direkt zu den Kläranlagen transportiert (bspw. aufgrund der Entsorgung von Feuchttüchern über die Toilette). Wie sich der Littereintrag auf Schmutz- und Niederschlagswasser verteilt, ist nicht bekannt. Durch die Rechen, die in Kläranlagen und zum Teil in den Entlastungsbauwerken der Siedlungswasserwirtschaft installiert sind, wird gelitterter Abfall teilweise zurückgehalten. Für das Rechengut wird eine Menge von 2,25 kg/(cap a) angegeben, es besteht zu 80 % aus Wasser; von der verbleibenden Trockensubstanz beträgt der Kunststoffanteil im Mittel 8 %.^{409, 410} Da der Stababstand/Lochdurchmesser der Rechen in der Regel deutlich größer als 5 Millimeter ist, nehmen wir an, dass nur 80 % des Litters erfasst wird.⁴¹¹ Die nicht zurückgehaltene Menge gelangt in den Faulturm und von dort in den Klärschlamm sowie zum geringeren Anteil in das Sandgut. Es kann davon ausgegangen werden, dass in den Klärauslauf keine nennenswerten Mengen des Kunststoff-Litters gelangen.⁴¹² Grundsätzlich werden nur ca. 78,5 % des Abwassers tatsächlich den Kläranlagen zugeleitet, die übrigen 21,5 % gelangen als Niederschlagswasser (im Trennsystem) oder als Mischwasserab-schläge (bei Starkregenereignissen im Mischsystem) ungeklärt in die Gewässer (basierend auf Daten für Berlin⁴¹³ und Befragungen von Fachleuten).⁴¹⁴ Es ergeben sich Kunststoffemissionen von ca. 4700 t/a, die in die Siedlungswasserwirtschaft gelangen, davon werden ca. 2950 t/a durch die Rechen erfasst und einer thermischen Verwertung zugeführt, 740 t/a gelangen in den Klärschlamm und 1010 t/a direkt in die Gewässer. Die im Klärschlamm befindlichen Anteile werden durch die noch praktizierte stoffliche Verwertung von Klärschlamm zumindest teilweise auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht (vgl. 7.4).

8.3 Kunststoff-Litter-Einträge in und durch die Landwirtschaft (dient nur zum Vergleich)

Bis heute ist unklar, was mit dem in der Umwelt verbleibenden Kunststoff geschieht. Es ist nicht bekannt, in welchem Maße der Litter an den Orten, an denen er entsteht, verbleibt oder durch verschiedene Transportprozesse auf Flächen (insbesondere Vegetations- und Gewässerflächen) verlagert wird, die nicht der Reinigung unterliegen und sich dort dauerhaft in den Böden anreichert. Letzteres scheint aber wahrscheinlicher, da auf Siedlungsflächen einerseits sich wiederholende Reinigungsmaßnahmen stattfinden und andererseits durch die Flächenversiegelung das Eindringen in tiefere Bodenschichten eher unwahrscheinlich ist.

Um den Anteil des an Land verbleibenden Litters abzuschätzen, ist es sinnvoll, sich die verschiedenen Abschätzungen zu den Einträgen in die Meere anzuschauen. Jambeck et al. schätzen den Anteil des Litters, der in die Meere gelangt, über die

⁴⁰⁹ Kuhn (2014).

⁴¹⁰ Kuhn und Gregor (2011).

⁴¹¹ Thompson (2012).

⁴¹² Finson (2021).

⁴¹³ Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (2012).

⁴¹⁴ Bertling, Hamann und Bertling (2018).

Höhe der Bevölkerung, die in einem Abstand von 50 Kilometern zur Küste lebt. Für diesen Bevölkerungsanteil wird der verbleibende Kunststoff-Litter komplett als Eintrag in die Meere quantifiziert.⁴¹⁵ In Deutschland ist dieser Küstenstreifen mit ca. 8,8 Millionen Menschen bewohnt, sodass nach dieser Argumentation ca. 11 % des in der Umwelt verbleibenden Litters in den Meeren und 89 % an Land verbleiben würden. Grundsätzlich wäre sicherlich eine Betrachtung, die die Flusseinzugsgebiete berücksichtigt, sinnvoller. Diesen Weg geht die BKV-Studie. Auf Basis von Befragungen wurden der Transfer über Flüsse, Küsten, Schiffsverkehr und Häfen in die Meere auf 30 % und des in der terrestrischen Umwelt verbleibenden Litters auf 70 % festgelegt.⁴¹⁶

Im Folgenden wird angenommen, dass sämtlicher in der Umwelt verbleibender Kunststoff-Litter durch Verwehungen von der Siedlungs- und Verkehrsfläche wegweht oder weggespült wird und die Vegetationsfläche und Gewässer erreicht. Eine langfristige Anreicherung größerer Mengen auf der Siedlungs- und Verkehrsfläche wird vernachlässigt und angenommen, dass diese Flächen zwar nicht sauber sind, aber einen stationären Zustand erreicht haben. Der Verbleib des Kunststoff-Litters wird unter Berücksichtigung der Werte von Lindner und Jambeck auf einen Basiswert von 80 % in der terrestrischen und 20 % in der aquatischen Umwelt festgesetzt. Die Vegetationsfläche besteht zu 59 % aus landwirtschaftlicher Nutzfläche und zu 41 % aus anderen Flächen. Mangels quantitativer Daten zur Verteilung von Litter auf unterschiedlichen Flächen wird angenommen, dass sich der Kunststoff-Litter proportional zu den Flächenanteilen verteilt. Es ergibt sich ein Kunststoff-Litter-Eintrag von 5800 t/a (2500 bis 10 500 t/a) und eine durchschnittliche Flächenbelastung von 350 Gramm pro Hektar und Jahr bezogen auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche.

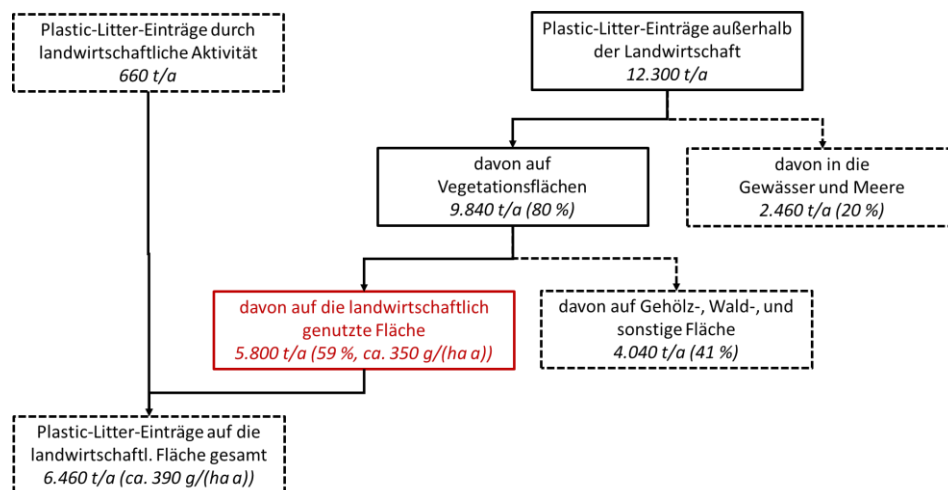


Abb. 19 Stoffstrombild zum Transfer der Kunststoff-Litter-Einträge und Abschätzungen zur resultierenden Flächenbelastung in die Landwirtschaft

⁴¹⁵ Jambeck, Geyer und Wilcox (2015).

⁴¹⁶ BKV GmbH (2017).

Die oben abgeschätzten Kunststoff-Litter-Einträge basieren im Wesentlichen auf Kunststoffanwendungen außerhalb der landwirtschaftlichen Nutzung, die 94,7 % des Gesamtverbrauchs an Kunststoffen ausmachen. Die in landwirtschaftlichen Anwendungen genutzten Kunststoffe besitzen demgegenüber einen Anteil von nur 5,3 %.⁴¹⁷ Unter der Annahme, dass sich Beschäftigte in der Landwirtschaft in Bezug auf das Littering wie die Durchschnittsbevölkerung verhalten würden (Litteringrate von ca. 0,105 % in Bezug auf die Verbrauchsmenge), ergäbe sich daraus eine gelitterte Menge von 660 t/a bei einer Verbrauchsmenge von 623 000 t/a. Alternativ zu dieser Grobabschätzung auf Basis der Literrate wurde im Rahmen dieser Studie aber eine Analyse der einzelnen landwirtschaftlichen Eintragspfade durchgeführt (vgl. Kap. 7), die nicht nur das Littering sondern auch intendierte Einträge, Abrieb und Verwitterung umfasst.

Problematisch ist, dass auf bereits verschmutzten Flächen stärker gelittert wird als auf sauberen.^{418, 419, 420} Gerade vor diesem Hintergrund ist der angenommene hohe externe Littereintrag durch Verwehungen von Verkehrs- und Siedlungsflächen ein gravierendes Problem, da dieser prinzipiell eine Gewöhnung an den verschmutzten Zustand des Bodens forcieren und so die notwendige Sorge der Landwirtschaft Betreibenden um ihre Böden untergraben kann.

⁴¹⁷ BKV GmbH (2018).

⁴¹⁸ Beyer und Winter (2016).

⁴¹⁹ Krauss, Freedman und Whitcup (1978).

⁴²⁰ FehrAdvice & Partners AG (2014).

9 Anhang I: Daten und Berechnungen

9.1 Emissionsmengen (nicht-logarithmisch)

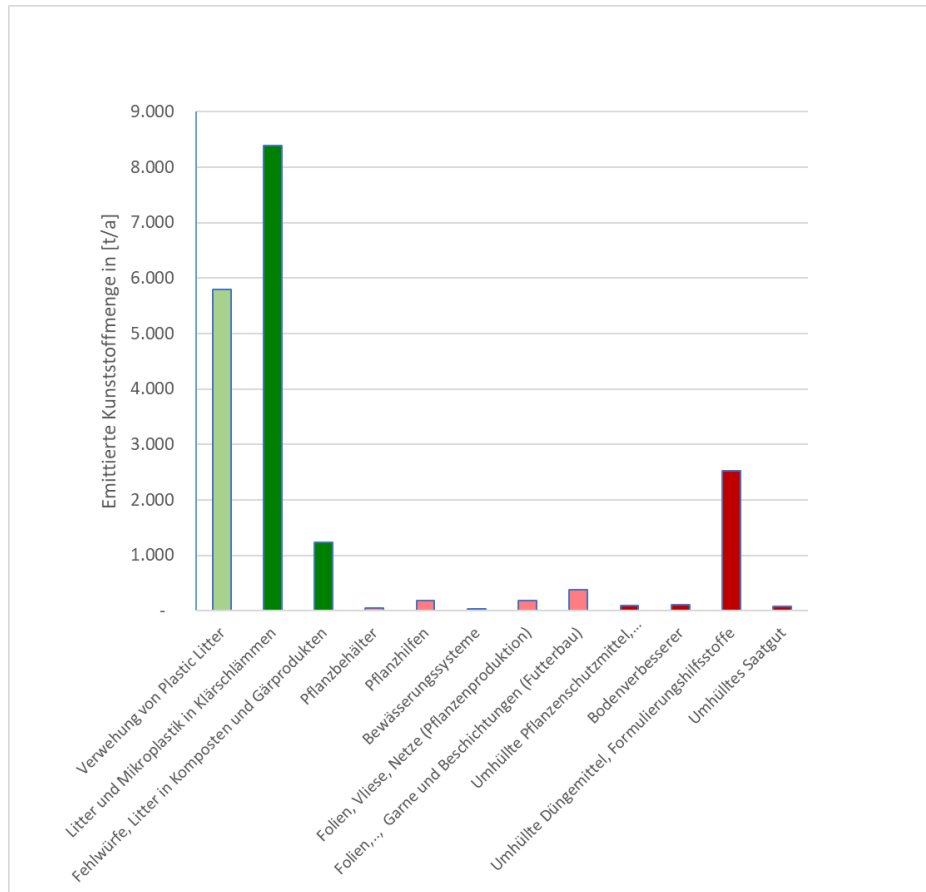


Abb. 20 Emitted Mengen nach Anwendungstyp (logarithmische Darstellung siehe Kap. 5.2 Abbildung 6)

9.2 Abschätzung der Verbrauchsmengen für Agrarkunststoffe nach Anwendungsgebieten in Deutschland

| Abfallherkunft | Abfallmengen auf EU-Ebene [t/a] | Verteilung in EU ⁴²¹ | Verteilung in D ⁴²² | Abfallmengen in D [t/a] | Verhältnis Verbrauch/Abfall ⁴²³ | Verbrauchsmengen [t/a] |
|--|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--|------------------------|
| Pflanzenbau | 357 000 | 24 % | 24 % | 65 403 | 1,4 | 91 564 |
| Futterbau und energet. Biomassenutzung | 413 000 | 27 % | 27 % | 75 662 | 1,4 | 105 927 |
| technische Produkte | 165 000 | 11 % | 11 % | 30 228 | 5,0 | 151 141 |
| Gartenbau und Gartenarbeit | 577 000 | 38 % | 38 % | 105 707 | 2,0 | 209 300 |
| Gesamt | 1 512 000 | 100 % | 100 % | 277 000 | 2,0 | 557 931 |

Tab. 41 Kunststoffverbrauch in der Landwirtschaft nach Anwendungsgebieten

⁴²¹ Auskunft: Christoph Lindner, Conversio; Email vom 6.12.2019.

⁴²² Annahme einer identischen Verteilung der Abfallmengen in EU und D.

⁴²³ Abgeschätzt aus dem Vergleich mit Verhältnissen für verfügbare Anwendungsgebiete (Fahrzeuge = 6,5, Elektrogeräte = 2,8, Bau = 6,9, Verpackungen = 1,4).

9.3 Futtermittelproduktion und energetische Biomassenutzung

| Kriterium | Ballensilage | | Fahrsilo | Heu/Stroh | | |
|--|---------------------------------------|-----------------------|--|--|--|--|
| | Rundballen | Quaderballen | n.r. | Rundballen | Quaderballen | |
| Erntemengen (TM) ^{424, 425, 426, 427} | Gras ⁴²⁸ : 2,9 Mt/a (15 %) | | Mais: 30,3 Mt/a Gras: 16,3 Mt/a (85 %) | Heu: (6,0 Mt/a), Stroh: (6,3 Mt/a) | | |
| Verhältnis der Ballenart ^{429, 430, 431} | 74 % | 26 % | n.r. | Stroh Heu | 24 % 27 % | 76 % 73 % |
| TM pro Volumen ⁴³² | 170 kg/m ³ | 200 kg/m ³ | Mais 185 kg/m ³ , Gras 180 kg/m ³ | Stroh Heu | 100 kg/m ³ 160 kg/m ³ | 140 kg/m ³ 220 kg/m ³ |

Tab. 42 Daten und Abschätzungen zum Kunststoffeinsatz bei der Futtermittelproduktion

⁴²⁴ Statistisches Bundesamt (2020).

⁴²⁵ https://www.proplanta.de/Mais/Nutzungsformen_Pflanze1146727393.html, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴²⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Stroh>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴²⁷ Münch (2008).

⁴²⁸ Inkl. Leguminosen zur Ganzpflanzenernte.

⁴²⁹ <https://lu-web.de/redaktion/news/trend-report-pressen/>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴³⁰ <https://lu-web.de/redaktion/news/lu-trend-report-pressen/>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴³¹ Persönliche Auskunft Jens Noordhof; Chefredakteur Zeitschrift Lohnunternehmen; Telefonat am 4.03.2020.

⁴³² Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2018).

| | | | | | | |
|--|--------------------|---------------------|--|--------------|--------------------|---------------------|
| Volumen pro Einheit ^{433, 434, 435, 436} | 2,1 m ³ | 2,4 m ³ | 1.125 m ³ (50 x 9 x 2,5 m ³) ⁴³⁷ | | 2,1 m ³ | 2,4 m ³ |
| Oberfläche pro Einheit | 9,2 m ² | 10,3 m ² | 745 m ² (oben + 4 Seiten) | | 9,2 m ² | 10,3 m ² |
| Anzahl Einheiten ⁴³⁵ | 5,6 Mio | 2,0 Mio | 225 000 (alternative Berechnung über Silobedarf pro Rind (=0,6 GVE) ergibt 165 000 (ohne energet. Biomassenutzung)) | Stroh Heu | 4,9 Mio 3,4 Mio | 15,7 Mio 9,2 Mio |
| Verteilung Produkttypen ⁴³⁸ | | | | | | |
| Stretchfolie | 100 % | 100 % | - | | - | - |
| Ballennetz | 90 % | - | - | | 50 % | - |
| Erntegarn | - | - | - | | 50 % | 100 % |
| Mantelfolie | 10 % | - | - | | -- | -- |
| Siloflachfolie | - | - | 100 % | | - | - |
| Unterziehfolie | - | - | 100 % | | - | - |
| Silogitter | - | - | 50 % | | - | - |
| Beschichtung (Boden und Wände) | - | - | 75 % | | - | - |
| Abdeckvlies | 5 % | 5 % | - | | 5 % | 5 % |

⁴³³ [https://de.wikipedia.org/wiki/Ballenpresse_\(Landwirtschaft\)#Rundballenpresse](https://de.wikipedia.org/wiki/Ballenpresse_(Landwirtschaft)#Rundballenpresse), letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴³⁴ <http://www.heu-heu.de/stroh/mini-kleine-und-grosse-strohballen/>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴³⁵ <https://lu-web.de/redaktion/news/trend-report-pressen/>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴³⁶ <https://lu-web.de/redaktion/news/lu-trend-report-pressen/>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴³⁷ Persönliche Information Willem Tel, Landwirtschaftskammer NRW.

⁴³⁸ Eigene Abschätzungen sowie persönliche Auskunft von Jens Noordhof; Chefredakteur Zeitschrift Lohnunternehmen; Telefonat am 4.03.2020.

Folie pro Einheit⁴³⁹

| | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| Stretchfolie (6-fach, 50 % Überd.) | 120 m ² | 134 m ² | - | - | - |
| Ballennetz (3-fach Sil., 4-fach Heu) | 16,5 m ² | 24 m ² | - | 22 m ² | - |
| Erntegarn | - | - | - | 30 m | 30 m |
| Mantelfolie | 22 m ² | 32 m ² | - | - | - |
| Siloflachfolie | - | - | 900 m ² | - | - |
| Unterziehfolie | - | - | 900 m ² | - | - |
| Silogitter | - | - | 500 m ² | - | - |
| Beschichtung (Boden und Wände) | - | - | 750 m ² | - | - |
| Abdeckvlies | 2,5 m ² | 4 m ² | - | 2,5 m ² | 4 m ² |

Flächengewicht⁴³⁹

| | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Stretchfolie (LDPE, 20 µm) | 19 g/m ² | 19 g/m ² | - | - | - |
| Ballennetz (HDPE, 12 g/lfdm) | 10 g/m ² | 10 g/m ² | - | 10 g/m ² | - |
| Erntegarn (PP, 130 m/kg) | - | - | - | 8 g/m | 8 g/m |
| Mantelfolie (LDPE, 18 µm) | 17 g/m ² | 17 g/m ² | - | - | - |
| Siloflachfolie (LDPE, 150 µm) | - | - | 142 g/m ² | - | - |
| Unterziehfolie (LDPE, 40 µm) | - | - | 38 g/m ² | - | - |
| Silogitter (HDPE, 250 g/m ²) | - | - | 250 g/m ² | - | - |
| Beschichtung (Bit./Ep., 600 µm) | - | - | 650 g/m ² | - | - |
| Abdeckvlies (PP, 150 g/m ²) | 150 g/m ² | 150 g/m ² | - | 150 g/m ² | 150 g/m ² |

Masse pro Einheit

| | | | | | |
|----------------|---------|---------|--------|---------|---------|
| Stretchfolie | 2,28 kg | 2,55 kg | - | - | - |
| Ballennetz | 0,17 kg | 0,24 kg | - | 0,22 kg | - |
| Erntegarn | - | - | - | 0,24 kg | 0,24 kg |
| Mantelfolie | 0,37 kg | 0,54 kg | - | - | - |
| Siloflachfolie | - | - | 128 kg | - | - |
| Unterziehfolie | - | - | 34 kg | - | - |
| Silogitter | - | - | 125 kg | - | - |

⁴³⁹ Diverse Produktinformationen.

| | | | | | |
|---|----------|---------|----------|---------|---------|
| Beschichtung | - | - | 325 kg | - | - |
| Abdeckvlies | 0,38 kg | 0,60 kg | | 0,38 kg | 0,60 kg |
| Masse in Anwendung | | | | | |
| Stretchfolie | 12 700 t | 4980 t | - | - | - |
| Ballennetz | 825 t | - | - | 900 t | - |
| Erntegarn | - | - | - | 1 800 t | 6000 t |
| Mantelfolie | 200 t | - | - | - | - |
| Siloflachfolie | - | - | 28 800 t | - | - |
| Unterziehfolie | - | - | 7 500 t | - | - |
| Silogitter | - | - | 13 800 t | - | - |
| Beschichtung | - | - | 80 900 t | - | - |
| Abdeckvlies | 105 t | 60 t | - | 90 t | 470 t |
| IVgM (Lebensdauer)⁴⁴⁰ | | | | | |
| Stretchfolie (1a) | 12 700 t | 4980 t | - | - | - |
| Ballennetz (1a) | 825 t | - | - | 900 t | - |
| Erntegarn (1a) | - | - | - | 1800 t | 6 000 t |
| Mantelfolie (1a) | 200 t | - | - | - | - |
| Siloflachfolie (2a) | - | - | 14 400 t | - | - |
| Unterziehfolie (1a) | - | - | 7 500 t | - | - |
| Silogitter (6a) | - | - | 2 300 t | - | - |
| Beschichtung (10a) | - | - | 8 100 t | - | - |
| Abdeckvlies (6a) | 18 | 10 | | 15 t | 80 t |

⁴⁴⁰ Diverse Produktinformationen.

| Emissionen | Gesamt | min | Geom. Mittel | max | min | Geom. Mittel | max |
|---------------------|----------|--------|--------------|-------|----------------|----------------|------------------|
| Stretchfolie (1a) | 17 680 t | 0,1 % | 0,32 % | 1 % | 17,7 t | 56,6 t | 176,8 t |
| Ballennetz (1a) | 1 725 t | 0,1 % | 0,32 % | 1 % | 1,7 t | 5,6 t | 17,3 t |
| Erntegarn (1a) | 7 800 t | 0,1 % | 0,32 % | 1 % | 7,8 t | 25,0 t | 78,0 t |
| Mantelfolie (1a) | 200 t | 0,1 % | 0,32 % | 1% | 0,2 t | 0,6 t | 2,0 t |
| Siloflachfolie (2a) | 14 400 t | 0,01 % | 0,032 % | 0,1 % | 1,4 t | 4,6 t | 14,4 t |
| Unterziehfolie (1a) | 7 500 t | 0,1 % | 0,32 % | 1 % | 7,5 t | 24 t | 75,0 t |
| Silogitter (6a) | 2 300 t | 0,01 % | 0,032 % | 0,1 % | 0,23 t | 0,7 t | 2,3 t |
| Beschichtung (10a) | 8 100 t | 1 % | 3,2 % | 10 % | 81,0 t | 259,2 t | 810,0 t |
| Abdeckvlies (6a) | 113 t | 0,01 % | 0,032 % | 0,1 % | 0,01 t | 0,04 t | 0,11 t |
| Gesamt | | | | | 117,5 t | 376,3 t | 1 016,9 t |

Tab. 43 Berechnung der Emissionen auf Basis der geschätzten Freisetzungsraten

9.4 Folien, Netze und Garne in der Pflanzenproduktion

| Gemüseanbau | Flächen GKL ⁴⁴¹ [ha] | Hochrechnung D [ha] ⁴⁴² | Flächenbelegungs- faktor ⁴⁴³ [%] | Dicke [µm] (ggf. aus Flä- chenge- wicht) ⁴⁴⁴ | Polymer- typ ⁴⁴⁴ | Dichte [kg/m ³] ⁴⁴⁴ | Masse [t] | Lebens- dauer [a] | Masse pro Jahr [t/a] |
|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--|--|--------------------------------|---|--------------|----------------------|-------------------------|
| Mulchfolie konventionell | 2 366,5 | 2 992,3 | 0,7 | 30,0 | LDPE | 950,0 | 597 | 1,0 | 597 |
| Mulchfolie bioabbaubar | 525,0 | 663,8 | 0,7 | 18,0 | PLA/TS | 1 300,0 | 109 | 1,0 | 109 |
| Vlies | 9 310,1 | 11 772,1 | 0,8 | 24,2 | PP | 950,0 | 2 166 | 2,0 | 1 083 |
| Lochfolie | 381,0 | 481,8 | 0,8 | 50,0 | LDPE | 950,0 | 183 | 1,0 | 183 |
| Minitunnel | 146,0 | 184,6 | 0,8 | 70,0 | LDPE | 950,0 | 98 | 3,0 | 33 |
| Mehrfach - Vlies/Folie | 1 379,5 | 1 744,3 | 0,8 | 74,0 | LDPE/PP | 950,0 | 981 | 2,0 | 490 |
| Mehrfach - Vlies/Vlies | 231,0 | 292,1 | 0,8 | 48,0 | PP/PP | 950,0 | 107 | 2,0 | 53 |
| Mehrfach - Folie/Folie | 339,0 | 428,6 | 0,8 | 120,0 | LDPE/LDPE | 1 006,0 | 414 | 2,0 | 207 |
| Folienflächen (GKL/Hochrechnung) | 14 678,0 | 18 559,5 | | | | | 4 655 | | 2 755 |
| Anbauflächen gesamt (GKL/DESTATIS) | 83 216,0 | 105 222,0 | | | | | | | |

Tab. 44 Berechnung von Folienmasse in Anwendung und Verbrauch pro Jahr im Gemüseanbau

⁴⁴¹ Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau e.V. (2020).

⁴⁴² Seitens GKL ausgewiesene Flächen multipliziert mit der Fläche Deutschland dividiert durch die Fläche der berücksichtigten Regionen.

⁴⁴³ Eigene Abschätzung.

⁴⁴⁴ Beispielsweise Firmen EHMO-TEC® T-Tasche und COVERTAN-PRO®, Wurth Rey Thermal, Hartmann Brockhaus PE Mulchfolie, BASF ecovio® M 2351, FKUR Bio-Flex® FX 1130, GLAESERgrow Gewächshausfolie und Minitunnelfolie, FVG Lochfolie, DM Flachfolie, Masgard® Bändchengewebe, Ökolys® Bändchengewebe.

Tab. 45 Berechnung von Foli-
enmasse in Anwendung und Ver-
brauch pro Jahr im Spargelanbau

| Spargel | Flächen GKL [ha] | Hochrech- nung D [ha] | Flächenbe- legungsfa- ktor [%] | Dicke [µm] (ggf. aus Flä- chengewicht) | Polymertyp | Dichte [kg/m³] | Masse [t] | Lebens- dauer [a] | Menge pro Jahr [t/a] |
|---|---------------------|--------------------------|--------------------------------------|--|------------|-------------------|---------------|----------------------|-------------------------|
| Flachfolie / SWT / WST | 16 751 | 19 007 | 0,8 | 120,0 | LDPE | 950,0 | 17 335 | 6,0 | 2 889 |
| Kleintunnel / trans- parent, Ein-Doppel- Triple | 3 473 | 3 941 | 0,8 | 70,0 | LDPE | 950,0 | 2 097 | 3,0 | 699 |
| Lochfolie / 125-500 Loch/m² | 520 | 590 | 0,8 | 50,0 | LDPE | 950,0 | 224 | 1,0 | 224 |
| Mehrfach / 1x | 7 135 | 8 096 | 0,8 | | | 950,0 | | 2,0 | |
| Mehrfach / 2x | 3 603 | 4 088 | 0,8 | 190,0 | LDPE | 950,0 | 5 904 | 3,0 | 1 968 |
| Mehrfach / 3x | 1 665 | 1 889 | 0,8 | 240,0 | LDPE | 950,0 | 3 446 | 2,0 | 1 723 |
| Folienflächen (GKL/Hochrechnung) | 33 147 | 37 612 | | | | | 29 005 | | 7 503 |
| Anbauflächen (GKL/DESTATIS) | 20 438 | 23 191 | | | | | | | |

| Erdbeeren | Flächen GKL [ha] | Hochrechnung D [ha] | Flächenbelegungs-faktor [%] | Dicke [μm] (ggf. aus Flächengewicht) | Polymertyp | Dichte [kg/m^3] | Masse [t] | Lebensdauer [a] | Menge pro Jahr [t/a] |
|----------------------------------|------------------|---------------------|-----------------------------|---|------------|-----------------------------------|--------------|-----------------|----------------------|
| Mulchfolie konventionell | 3 359 | 5 292 | 0,7 | 30,0 | LDPE | 950,0 | 1 056 | 1,0 | 1 056 |
| Mulchfolie bioabbaubar | 77 | 121 | 0,7 | 18,0 | PLA/TS | 1 300,0 | 20 | 1,0 | 20 |
| Bändchengewebe | 191 | 301 | 0,8 | 105,3 | PP (PPX) | 950,0 | 241 | 5,0 | 48 |
| Vlies | 3 768 | 5 936 | 0,8 | 24,2 | PP | 950,0 | 1 092 | 2,0 | 546 |
| Lochfolie | 1 837 | 2 894 | 0,8 | 50,0 | LDPE | 950,0 | 1 100 | 1,0 | 1 100 |
| Flachfolie | 360 | 567 | 0,8 | 120,0 | LDPE | 950,0 | 517 | 2,0 | 259 |
| Folienflächen (GKL/Hochrechnung) | 9 592 | 15 111 | | | | | 4 025 | | 3 028 |
| Anbauflächen (GKL/DESTATIS) | 7 300 | 11 500 | | | | | | | |

Tab. 46 Berechnung von Folienmasse in Anwendung und Verbrauch pro Jahr im Erdbeeranbau

| Strauchbeeren | Flächen GKL [ha] | Hochrechnung D [ha] | Flächenbelegungs-faktor [%] | Dicke [μm] (ggf. aus Flächengewicht) | Polymertyp | Dichte [kg/m^3] | Masse [t] | Lebensdauer [a] | Menge pro Jahr [t/a] |
|----------------------------------|------------------|---------------------|-----------------------------|---|------------|-----------------------------------|------------|-----------------|----------------------|
| Mulchfolie konventionell | 150 | 194 | 0,7 | 30,0 | LDPE | 950,0 | 39 | 1,0 | 39 |
| Mulchfolie bioabbaubar | 1 | 3 | 0,7 | 18,0 | PLA/TS | 1 300,0 | 0 | 1,0 | 0 |
| Bändchengewebe | 153 | 262 | 0,7 | 105,3 | PP/PPX | 950,0 | 184 | 5,0 | 37 |
| Vlies | 18 | 16 | 0,7 | 24,2 | PP | 950,0 | 3 | 2,0 | 1 |
| Lochfolie | - | - | 0,8 | 50,0 | LDPE | 950,0 | - | 1,0 | - |
| Flachfolie | - | - | 0,8 | 120,0 | LDPE | 950,0 | - | 2,0 | - |
| Folienflächen (GKL/Hochrechnung) | 322 | 475 | | | | | 225 | | 77 |
| Anbauflächen (GKL/DESTATIS) | ca. 6 010 | 8 868 | | | | | | | |

Tab. 47 Berechnung von Folienmasse in Anwendung und Verbrauch pro Jahr im Anbau von Strauchbeeren

| Folientyp | Gemüse | Spargel | Erdbeeren | Strauchbeeren | Steinobst | Kernobst | Jährlicher Verbrauch nach Folientyp [t/a] |
|---|----------------|----------------|----------------|---------------|--------------|--------------|---|
| Folien-Schutzsysteme (ohne Netz) / Tunnel, Haus | 341,5 | | 569,4 | 211,5 | 355,5 | 11,2 | 1 489,1 |
| Netz-Schutzsysteme (ohne Folie) / Insekten, Vögel | 283,3 | | 13,2 | 12,3 | 45,7 | 801,3 | 1 155,7 |
| Mulchfolie konventionell | 597,0 | 0,0 | 1 055,7 | 38,7 | | | 1 691,4 |
| Mulchfolie bioabbaubar | 108,7 | 0,0 | 19,9 | 0,4 | | | 129,0 |
| Flachfolie (Spargel) | 0,0 | 4 993,5 | 0,0 | 0,0 | | | 4 993,5 |
| Bändchengewebe | 0,0 | 0,0 | 48,1 | 36,7 | | | 84,8 |
| Vlies | 1 295,4 | 0,0 | 546,1 | 1,3 | | | 1 842,8 |
| Lochfolie | 600,7 | 945,7 | 1 099,7 | 0,0 | | | 2 646,1 |
| Minitunnel | 153,5 | 1 563,9 | 258,6 | 0,0 | | | 1 976,0 |
| Jährlicher Verbrauch an Folie nach Kulturart [t/a] | 3 380,0 | 7 503,0 | 3 610,6 | 301,0 | 401,1 | 812,5 | 16 008,4 |

Tab. 48 Folienverbrauch nach Folientyp und Kultur

| Folientyp | Jährlicher Verbrauch nach Folientyp [t/a] | Lebensdauer [a] | Masse in Anwendung [t] | Freisetzungsrate (DS) [%] ⁴⁴⁵ | Freisetzungsrate (Min) [%] | Freisetzungsrate (Max) [%] | Flächengewicht [kg/m ²] | Fläche [ha] | Freisetzung DS {t/a} | Freisetzung MIN {t/a} | Freisetzung MAX {t/a} | Eintrag pro Hektar und Jahr (DS)[kg/ha x a] |
|---|---|-----------------|------------------------|--|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| Folien-Schutzsysteme (ohne Netz) / Tunnel, Haus | 1 489,1 | 5 | 7 445,5 | 0,032 % | 0,010 % | 0,100 % | 0,190 | 3 919 | 2,4 | 0,7 | 7,4 | 0,6 |
| Netz-Schutzsysteme (ohne Folie) / Insekten, Vögel | 1 155,7 | 10 | 11 557,0 | 0,032 % | 0,010 % | 0,100 % | 0,046 | 25 344 | 3,7 | 1,2 | 11,6 | 0,1 |
| Mulchfolie konventionell | 1 691,4 | 1 | 1 691,4 | 3,200 % | 1,000 % | 10,000 % | 0,029 | 5 935 | 54,1 | 16,9 | 169,1 | 9,1 |
| Mulchfolie bioabbaubar | 129,0 | 1 | 129,0 | | | | 0,023 | 551 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| Flachfolie (Spargel) | 4 993,5 | 6 | 29 960,9 | 0,320 % | 0,100 % | 1,000 % | 0,114 | 26 281 | 95,9 | 30,0 | 299,6 | 3,6 |
| Bändchengewebe | 84,8 | 5 | 424,2 | 0,320 % | 0,100 % | 1,000 % | 0,100 | 424 | 1,4 | 0,4 | 4,2 | 3,2 |
| Vlies | 1 842,8 | 2 | 3 685,6 | 0,320 % | 0,100 % | 1,000 % | 0,023 | 16 031 | 11,8 | 3,7 | 36,9 | 0,7 |
| Lochfolie | 2 646,1 | 1 | 2 646,1 | 0,320 % | 0,100 % | 1,000 % | 0,048 | 5 571 | 8,5 | 2,6 | 26,5 | 1,5 |
| Minitunnel | 1 976,0 | 3 | 5 927,9 | 0,032 % | 0,010 % | 0,100 % | 0,067 | 8 914 | 1,9 | 0,6 | 5,9 | 0,2 |
| Gesamt | 16 008,4 | | 63 467,6 | | | | | | 179,6 | 56,1 | 561,2 | |

Tab. 49 Freisetzung und Flächeneintrag nach Folientyp im Pflanzenbau

⁴⁴⁵ Eigene Abschätzung

9.5 Umhülltes Saatgut⁴⁴⁶

| Kulturtyp | Anbaufläche [ha] ⁴⁴⁷ | Saatguteinsatz [kg/ha] ⁴⁴⁶ | Saatgutmenge [t/a] | Polymeranteil [ppm] | Kunststoffemission [t/a] | Flächeneintrag [g/ha] |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Weizen | 3 203 000 | 180 (175/180) | 576 540 | 3 | 1,7 | 0,5 |
| Gerste | 1 567 000 | 155 (153/160) | 243 000 | 4 | 1,0 | 0,4 |
| Sonstiges Getreide | 1 163 000 | 150 | 174 450 | 10 | 1,7 | 1,5 |
| Mais | 2 528 000 | 30 | 75 800 | 347 | 26,3 | 10,2 |
| Hülsenfrüchte | 365 000 | 200 (130, 250, 250, 80, 250) | 72 900 | 207 | 15,1 | 41,4 |
| Raps | 1 308 000 | 5 (3,5/6) | 6 540 | 3 692 ⁴⁴⁸ | 24,1 | 18,6 |
| Sonnenblumen | 20 000 | 6 | 120 | 1 762 | 0,2 | 10 |
| Zuckerrübe | 407 000 | 3 | 1 221 | 12 000 | 14,7 | 36,8 |
| Soja | 24 000 | 120 | 2 880 | 222 | 0,6 | 12,5 |
| Gemüse | 129 000 | 10 (4, 0,5, 1, 0,15, 15, 30) | 1 290 | 1 200 | 1,6 | 12,4 |
| Gesamt | 10 667 000 | | 1 154 741 | | 86,7 | |

Tab. 50 Freisetzung und Flächeneintrag bei umhülltem Saatgut

⁴⁴⁶ Lucchesi, Zlof und Heimbach (2016).

⁴⁴⁷ Statistisches Bundesamt (2019b).

⁴⁴⁸ In der Originalquelle wird ein Wert von 277 ppm angegeben, der aber offensichtlich falsch ist.

10 Anhang II: Datenqualität

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden eine Vielzahl unterschiedlicher Quellen ausgewertet und verwendet um erste Abschätzung für eine Gesamtbild zu Kunststoffemissionen in landwirtschaftliche Böden zu erhalten. Neben wissenschaftlicher Literatur, Daten aus öffentlichen Statistiken und Berichten wurden auch Expertenmeinungen sowie eigene Abschätzungen verwendet.

Auf die Angabe von Schwankungsbreiten wurde in vielen Fällen verzichtet, da diese nicht verlässlich bestimmt werden können und ggf. den Eindruck einer Genauigkeit vermitteln, die nicht existiert.

10.1 Pedigree-Matrix

Um die Datenqualität dennoch zu bewerten und zu dokumentieren, wurden im nachfolgenden die in den Berechnungen und Abschätzungen verwendeten Größen in ihrer Qualität mittels einer sogenannten Pedigree-Matrix bewertet.⁴⁴⁹ Dabei handelt es sich um eine qualitative Einordnung von Quellen anhand verschiedener Kriterien und Bewertungsstufen, die in einer Matrix strukturiert sind. Anzahl und Art der Kriterien variieren, je nachdem ob es sich um eine Expertise (1 Kriterium) oder eine Literatur- bzw. Internetquelle (5 Kriterien) handelt. Für jedes Kriterium kann ein Punktwert von 1 bis 4 vergeben werden. Dabei bezeichnet 1 die höchste und 4 die niedrigste Stufe der Datenqualität.

Im Prinzip lassen sich aus den Bewertungen der Pedigree-Matrix auch Schwankungsbreiten und Konfidenzen bestimmen, dafür werden dann Methoden der Fehlerfortpflanzung oder Monte-Carlo-Simulation verwendet. Voraussetzung ist aber, dass für ein bestimmtes Themenfeld Erfahrungen zur Datenqualität aus unterschiedlichen Quellen vorliegen.⁴⁵⁰ Da dies auf dem Feld des hier betrachteten Untersuchungsgegenstandes aus unserer Sicht nicht der Fall ist, verzichten wir darauf und belassen es bei der Bewertung anhand der Pedigree-Matrix.

10.1.1 Bewertung der Datenqualität aus Expertisen

Wir unterscheiden zwischen der Meinung externer Fachleute und der Selbsteinschätzung der eigenen Expertise der Autoren, sofern diese in die Bearbeitung eingeflossen ist. Die Bewertung findet mit einer einzigen Zahl zwischen 1 und 4 statt und wird nach folgender Nomenklatur durchgeführt

[X]: Bewertung der Datenqualität aus der Befragung von externen Fachleuten

[X]*: Selbsteinschätzung eigener Expertise, sofern diese eingeflossen ist

⁴⁴⁹ Weidema und Wesnæs (1996).

⁴⁵⁰ Laner, Rechberger und Astrup (2014).

| Punkte | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------|--|---|--|--|
| Stufe | Formale Expertise | Strukturierte Expertenmeinung | Expertenmeinung | Fundierte Vermutung |
| Bewertung der Expertise | vollständig über den Untersuchungsgegenstand informiert; Angaben vor dem Hintergrund von (empirischen) Datenerhebungen | basierend auf einigen empirischen Daten oder auf nachvollziehbarer Prozedur mit formalen Expertisen | Informiert über den Untersuchungsgegenstand aber ohne entsprechende Datengrundlage | basierend auf spekulativen oder nicht verifizierbaren Annahmen |

Tab. 51 Pedigree-Matrix für Befragung/Meinung von Fachleuten

10.1.2 Bewertung der Datenqualität von Literatur- und Internetquellen

Literatur und Internetquellen werden mittels einer 5 x 4-Matrix bewertet. Im Ergebnis ergibt sich ein Quintupel aus 5 Zahlen zwischen 1 und 4.

[v, w, x, y, z]: Bewertung der Datenqualität aus Literatur- und Internetquellen

Es ist möglich, dass eine einzelne Quelle, aus der mehrere Werte entnommen wurden, in Bezug auf die Qualität unterschiedlicher Daten auch unterschiedlich bewertet wird.

| Punkte | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|--|---|---|--|
| Stufe | Sehr gut | Eher Gut | Eher schlecht | schlecht |
| Vollständigkeit | Gegenstand der Untersuchung ist identisch | Gegenstand der Untersuchung ist ähnlich oder entspricht zum Teil dem Untersuchungsgegenstand | Gegenstand ist vergleichbar aber unterschiedlich | Gegenstand ist nur sehr vage mit dem Untersuchungsgegenstand vergleichbar |
| Materielle und/oder geometrische Repräsentativität | Untersuchte Werkstoffe oder Produkte sind denen in der Studie identisch | Untersuchte Werkstoffe oder Produkte sind denen in der Studie ähnlich | Untersuchte Werkstoffe oder Produkte sind mit denen in der Studie vergleichbar | Untersuchte Werkstoffe oder Produkte sind mit denen in der Studie nur vage vergleichbar |
| Geografische Repräsentativität | Deutschland | Sozioökonomisch und/oder klimatisch ähnliche Region (z. B. Mitteleuropa) | Sozioökonomisch und/oder klimatisch unterschiedlich (EU, USA) | Sozioökonomisch sehr unterschiedlich (z. B. Welt, China) oder keine Randbedingungen spezifiziert |
| Zeitliche Repräsentativität | < 5 Jahre | 5 bis 10 Jahre | > 10 bis 15 Jahre | > 15 Jahre oder keine Angaben zum zeitlichen Bezug |
| Zuverlässigkeit der Quelle | alle relevanten Daten und Berechnungswege sind nachvollziehbar und korrekt; offizielle Berichte, peer-reviewed Publikationen | Berechnungsweg ist vereinfacht, aber korrekt oder Ausgangsdaten teilweise ungenau, Markt- und Technologieberichte von Verbänden | Berechnungsweg ist stark vereinfacht oder nicht ganz korrekt, Ausgangsdaten (zum Teil nur grob) geschätzt | Berechnungsweg ist grob vereinfacht, fehlerhaft und schwer nachvollziehbar |

Tab. 52 Pedigree-Matrix für Literatur und Internetquellen

10.2 Bewertung der für eigene Berechnungen verwendeten Datenquellen

| Kapitel | Datum/Gegenstand | Art der Quelle | Name/Signatur der Quelle | Bewertung der Quelle |
|--------------------|--|-----------------|---|----------------------|
| Kapitel 5 | | | | |
| Tab. 02 | Berechnung Agrarkunststoffmenge nach Anwendungsgebiet | | | |
| | Abfallaufkommen in der EU nach Anwendungen | Experte | C. Lindner | [2] |
| | Abfallverteilung nach Anwendungen in D | Expert | Autor | [4]* |
| | Verhältnis Verbrauchs zu Abfallmenge in D | Experte | Autor | [3]* |
| Tab. 03 | Schätzung zum gesamten Kunststoffverbrauch nach Werkstoffgruppen | | | |
| | Verbrauch Thermoplaste, Duroplaste, Polyurethane | Bericht | (Conversio, 2020b) | [1,1,1,1,2] |
| | Verbrauch Elastomere | Bericht | (Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie, 2020) | [1,1,1,1,2] |
| | Verbrauch Chemiefasern | Internetseite | ICV e. V. ⁴⁵¹ | [1,1,1,1,2] |
| | Verbrauch von Polymerdispersionen | Bericht | (Conversio, 2020b) | [3,1,1,1,2] |
| Kapitel 5.1 | Schätzung des Gesamtverbrauchs an Kunststoffen in der Landwirtschaft | | | |
| | Verhältnis Agrarverbrauch zu Gesamtverbrauch | Experte | Autor | [4]* |
| | Berechnung der Verbleibsmenge pro landwirtschaftlichen Betrieb/Hektar | | | |
| | Verbrauchs- und Abfallmenge | Bericht | (Conversio, 2020b) | [1,1,1,1,2] |
| | Zahl der Betriebe und landwirtschaftliche Nutzfläche | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2019b) | [1,1,1,1,1] |
| | Verhältnis Verbrauch und Abfall aller landwirtschaftlichen Kunststoffe | Experte | Autor | [3]* |
| Kapitel 5.2 | Abschätzung des Kunststoffemissionen -> siehe Kap. 7 | | | |
| Kapitel 5.3 | Abschätzung der Kunststoffemissionen pro Fläche in spezifischen Anwendungen | | | |
| | Einträge | -> siehe Kap. 7 | | |
| | Anbauflächen | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2019d) | [1,1,1,1,1] |

Tab. 53 Bewertung der Datenquellen

⁴⁵¹ <https://www.icv-ev.de/de/chemiefaserproduktion-nach-regionen-fl%C3%A4chendiagramm>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

| | | | |
|---|----------------|--|-------------|
| Anbauflächen | Bericht | (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2020) | [1,1,1,1,1] |
| Fläche unter Folie | Experten | (Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau e. V.) | [3] |
| Kompostausbringung pro Fläche | Internetquelle | Landwirtschaftskammer ⁴⁵² | [1,1,1,1,2] |
| Düngerbedarf pro Fläche | Internetquelle | Topagrar ⁴⁵³ | [1,1,1,1,2] |
| Relevante Flächen | Experte | Autor | [3]* |
| Abb. 09 Berechnung der Kunststoffkonzentration im Boden | | | |
| Grenzwert (0,1 %) | Bericht | (Kehres, 2016, Kehres, 2020) | [2,1,1,1,2] |
| Bodenbearbeitungstiefe (0,30 m) | Internetquelle | Topagrar ⁴⁵⁴ | [2,1,1,1,3] |
| Bodendichte (1350 kg/m ³) | | | |
| Wasseranteil (25 %) | Internetquelle | BDG ⁴⁵⁵ | [2,1,1,1,3] |
| Luftporenanteil (25 %) | Internetquelle | | |
| Kapitel 5.6 Monetarisierung der Schäden | | | |
| Landwirtschaftsnutzfläche (LNF) | | (Statistisches Bundesamt, 2019d) | [1,1,1,1,1] |
| Kaufwerte LNF | | (Statistisches Bundesamt, 2019c) | [1,1,1,1,1] |
| Bodenbearbeitungstiefe (0,30 m) | Internetquelle | Topagrar ⁴⁵⁴ | [2,1,1,1,3] |
| Bodendichte (1.350 kg/m ³) | | | |
| Wasseranteil (25 %) | Internetquelle | BDG ⁴⁵⁵ | [2,1,1,1,3] |
| Luftporenanteil (25 %) | Internetquelle | | |
| Kapitel 7/Anhang 8 | | | |
| Tab. 10, Kap. 0, Kap. 9.3 Berechnung der Kunststoffverbräuche bei der Futtermittelproduktion | | | |
| Erntemengen | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2020) | [1,1,1,1,1] |
| Heu und Stroh | Bericht | (Münch, 2008) | [1,1,1,3,2] |

⁴⁵² <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/boden/kompost.htm>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁵³ <https://www.topagrar.com/heftplus/so-ermitteln-sie-den-duengebedarf-11581991.html>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁵⁴ <https://www.topagrar.com/technik/news/flach-schaelen-statt-graben-9365947.html>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁵⁵ https://stadtverband-chemnitz.de/th_images/fachberatung/allgemeines/zusammensetzung_und_entstehung_des_bodens.pdf; letzter Zugriff am 3.02.2021.

| | | | | |
|---------------------------------|--|-----------------|---|-------------|
| | Anteil Ballensilage | Experte | Jens Nordhof (Zeitschrift Lohnunternehmen) | [3] |
| | Verhältnis Rund-/Quaderballen | Internetquelle | LU-Web ⁴⁵⁶ | [2,1,1,1,2] |
| | Trockenmasseanteil | Buch | (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 2018) | [1,1,1,1,1] |
| | Volumen pro Ballen | Internetquelle | LU-Web ⁴⁵⁶ | [2,1,1,1,2] |
| | Volumen pro Fahrsilo | Experte | Wilhelm Tel, LWK NRW | [3] |
| | Anzahl der Ballen | Internetquelle | LU-Web ⁴⁵⁷ | [2,1,1,1,2] |
| | Verteilung der Produkttypen | Experte | Jens Nordhof (Zeitschrift Lohnunternehmen) | [3] |
| | Verteilung der Produkttypen | Experte | Autor | [4]* |
| | Folien pro Einheit, Flächengewicht, Lebensdauer | Experte | Autor, auf Basis diverser Produktinformationen | [3]* |
| Tab. 09 | Berechnung von Freisetzungsraten und emittierten Kunststoffmengen in der Futtermittelproduktion | | | |
| | Freisetzungsraten | Experte | Autor | [3]* |
| | Litteringrate | | Siehe Anhang 8.1 | |
| Tab. 11 | Flächenbelegung mit Kunststoffen nach Kulturart | | | |
| | Folienfläche | Experte | (Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau e.V., 2020) | [3] |
| | Hochrechnung auf Deutschland | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2019c) | [1,1,1,1,1] |
| | Hochrechnung auf Deutschland | Experte | Autor | [3]* |
| Tab. 12, Tab. 13, Kap. 0 | Kunststofffolienmasse nach Kulturart und Art der Anwendung | | | |
| | Folienfläche | Experte | (Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau e.V., 2020) | [3] |
| | Hochrechnung auf Deutschland | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2019c) | [1,1,1,1,1] |
| | Hochrechnung auf Deutschland | Experte | Autor | [3]* |
| | Dicke/Flächengewicht, Dichte, Polymertyp, Lebensdauer | Internetquellen | Diverse Produktinformationen ⁴⁵⁸ | [2,1,1,1,2] |
| Tab. 14 | Abschätzung der Freisetzungsraten und emittierten Mengen | | | |

⁴⁵⁶ <https://lu-web.de/redaktion/news/trend-report-pressen/>; <https://lu-web.de/redaktion/news/lu-trend-report-pressen/>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁵⁷ <https://lu-web.de/redaktion/news/trend-report-pressen/>; <https://lu-web.de/redaktion/news/lu-trend-report-pressen/>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁵⁸ Beispielsweise Firmenich EHMO-TEC® T-Tasche und COVERTAN-PRO®, Wurth Rey Thermal, Hartmann Brockhaus PE Mulchfolie, BASF ecovio® M 2351, FKUR Bio-Flex® FX 1130, GLAESERgrow Gewächshausfolie und Minitunnelfolie, FVG Lochfolie, DM Flachfolie, Masgard® Bändchengewebe, Ökolys® Bändchengewebe.

| | | | | |
|-------------------------|--|----------------|--|-------------|
| | Freisetzungsrate | Experte | Autor | [3]* |
| | Litteringrate | | Siehe Anhang 8.1 | |
| Kap. 7.2.1.1 | Kunststoffbedarf für Bewässerungssysteme | | | |
| | Bewässerte Fläche 2015 | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2010) | [1,1,1,1,1] |
| | Bewässerte Fläche 2010 | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2017) | [1,1,1,1,1] |
| | _Extrapolation auf 2020 | Experte | Autor | [3]* |
| | Anteil der Tröpfchenbewässerungsanlagen | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2017) | [1,1,1,1,1] |
| | _Extrapolation auf 2020 | Experte | Autor | [3]* |
| | Abschätzung des Flächenanteils für Tröpfchenbewässerung in 2020 | Experte | Autor | [3]* |
| | Wanddicke, Kunststofftyp, Nutzungsdauer | Internetquelle | BayWa ⁴⁵⁹ | [2,1,1,1,2] |
| | Schlauchlänge pro Fläche | Artikel | (Martin Müller, 2016) | [2,2,1,1,1] |
| | | Internetquelle | Netafim ⁴⁶⁰ | [2,1,3,1,3] |
| | Anteil der Einwegschläuche | Bericht | (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, 2020) | [2,1,1,1,3] |
| Tab. 18, Tab. 19 | Abschätzung der Freisetzungsraten und emittierter Mengen bei Bewässerungssystemen | | | |
| | Freisetzungsrate | Experte | Autor | [3]* |
| | Litteringrate | | Siehe Anhang 8.1 | |
| Tab. 20 | Abschätzung der Kunststoffverbrauch für Pflanzbehälter | | | |
| | Anzahl von Zier-; Beet- oder Balkonpflanzen sowie Kräutern | Internetquelle | BMEL ⁴⁶¹ | [1,1,1,1,1] |
| | Art der Pflanzen | Internetquelle | BMEL ⁴⁶² | [1,1,1,1,1] |
| | Durchschnittliche Topfgröße und Kunststoffmasse pro Topf | Experte | Autor auf Basis Internetrecherche | [3]* |

⁴⁵⁹ https://www.baywa.de/de/garten/bewaesserung/tropfschlaeuche/-tropfer/c-sh_bp_9826070/, letzter Zugriff am 4.02.2021.

⁴⁶⁰ Vgl. dazu auch Testanlage mit 36 000 Metern auf 3,5 Hektar von Netafim; <https://netafim-kompetenzzentrum.de/technik/>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁶¹ <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/GBG-0050440-2017.pdf>; <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/GBG-0050441-2017.pdf>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁶² <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/GBT-0050196-2017.pdf>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

| | | | |
|---|---|---|-------------|
| Containerfläche in Deutschland | Internetquelle | BMEL ⁴⁶³ | [1,1,1,1,1] |
| Anzahl Pflanzcontainer pro Fläche | Experte | Autor | [3]* |
| Anzuchtdauer in Baumschulen | Internetquelle | Gartenbau NRW ⁴⁶⁴ | [2,1,1,1,3] |
| _ Schätzung eines Durchschnittswertes | Experte | Autor | [3]* |
| Durchschnittliches Gewicht pro Container | Experte | Autor auf Basis einer Internetrecherche | [3]* |
| Anzahl der Trays pro Jahr | Internetquelle | Normpack ⁴⁶⁵ | [2,2,1,1,3] |
| | Internetquelle | Deutsche Umwelthilfe ⁴⁶⁶ | [2,2,1,1,3] |
| Masse pro Trays | Internetquelle | Normpack ⁴⁶⁵ | [2,2,1,1,3] |
| | Experte | Autor | [3]* |
| Anzahl der Erdpresstöpfe pro Jahr | Internetquelle | Hawita ⁴⁶⁷ | [2,1,1,1,3] |
| _ Hochrechnung für D | Experte | Autor | [4]* |
| Erdpresstöpfe pro Multizellplatte | Internetquelle | Hawita ⁴⁶⁷ | [2,1,1,1,2] |
| _ Festlegung eines Mittelwerts | Experte | Autor | [3]* |
| Masse einer Multizellplatte | Experte | Autor | [3]* |
| Nutzungszyklen | Experte | Autor | [3]* |
| Masse des Polymervlieses pro Erdpresstopf | Experte | Autor | [3]* |
| Anzahl der Erdpresstöpfe mit Polymervlies/-netz | Internetquelle | Jiffypot ⁴⁶⁸ | [3]* |
| _ Quantitative Schätzung | Experte | Autor | [4]* |
| Fläche für Growbaganbau | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2019c) | [3,1,1,1,1] |
| _ Anteil für Growbags | Experte | Autor | [3]* |
| Growbags pro Fläche | Experte | Autor | [3]* |
| Folienmasse pro Growbag | Experte | Autor | [3]* |
| Tab. 21, Tab. 22 | Abschätzung der Freisetzungsraten und emittierter Mengen bei Pflanzbehältern | | |
| Freisetzungsraten | Experte | Autor | [3]* |

⁴⁶³ <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/GBT-0050182-2019.pdf>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁶⁴ <https://www.gartenbaunrw.de/index.php/gartenbau/baumschulen>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁶⁵ <https://www.duh.de/projekte/pflanzenhandel/?&wc=NL>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁶⁶ <https://normpack.nl/de>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁶⁷ <https://handel.hawita.de/de/produkte/vliestoepfe.php>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁶⁸ <http://www.jiffypot.com/en/about-jiffy.html>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

| | | | |
|---|----------------|---|-------------|
| Litteringrate | | Siehe Anhang 9.1 | |
| Landwirtschaftliche relevante Fläche | Experte | Autor | [3]* |
| Tab. 23 Abschätzung der Kunststoffverbrauch für Pflanzhilfen | | | |
| Gewicht pro Kunststoffpflanzstab, Lebensdauer | Internetquelle | Vinotto ⁴⁶⁹ | [1,1,1,1,3] |
| Umsatzdaten des Unternehmens | Experte | Autor | [3]* |
| Kosten eines Pflanzstabes | Internetquelle | Baywa ⁴⁷⁰ | [1,1,1,1,1] |
| Wein- und Obstbau sowie Baumschulfläche | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2019c) | [1,1,1,1,1] |
| Anteil von Kunststoffdrähten | Internetquelle | BayWa | [3,1,1,1,3] |
| -Abschätzung der mengenmäßigen Relevanz | Experte | Autor | [3]* |
| Stockdichte, Drahtlänge pro Hektar | Experte | Autor auf Basis diverser Erfahrungsberichte | [3]* |
| Kunststoffmasse pro draht | Experte | Autor auf Basis von Produktinformationen | [2]* |
| Gärtnerische Fläche, auf der Bindemittel eingesetzt werden | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2019c) | [1,1,1,1,1] |
| Bindungen pro Fläche | Internetquelle | Arbeiten im Weinberg ⁴⁷¹ | [3,2,1,1,3] |
| _Anteil verschiedener Bedingungstypen | Experte | Autor auf Basis von Produktinformationen | [3]* |
| _Anteil mit Kunststoff | Experte | Autor auf Basis von Produktinformationen | [3]* |
| Masse pro Bindung | Experte | Autor auf Basis von Produktinformationen | [3]* |
| Fläche für Stamm-schutzanwendung | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2019c) | [1,1,1,1,1] |
| Anteil für neue Schutzsysteme pro Jahr | Experte | Autor | [3]* |
| Stockdichte | Experte | Autor auf Basis diverser Erfahrungsberichte | [3]* |
| Gewicht pro Schutzsystem | Experte | Autor auf Basis von Produktinformationen | [3]* |

⁴⁶⁹ <https://www.vinotto.at/vorteile/>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁷⁰ <https://www.baywa.de/de/sonderkulturen/weinbau/betriebsmittel/pfaehle-stickel/vinotto-pflanzstab-fiberglas-/p-0000000000204474/>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁷¹ <https://www.pfalz.de/de/pfalz-geniessen/pfalzer-wein/im-weinberg/arbeiten-im-weinberg/reben-biegen-und-binden>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

| | | | | |
|-------------------------|---|----------------|--|-------------|
| | Hochskalierung auf andere Anwendungen | Experte | Autor | [3]* |
| | Kunststoffverbrauch für sonstige Pflanzhilfen | Experte | Autor auf Basis von Umsatzdaten und Produktpreisen | [3]* |
| Tab. 24, Tab. 25 | Abschätzung der Freisetzungsraten und emittierter Mengen bei Pflanzhilfen | | | |
| | Freisetzungsraten | Experte | Autor | [3]* |
| | Litteringrate | | Siehe Anhang 9.1 | |
| | In Anwendung befindliche Kunststoffmasse | Siehe zuvor | | |
| | Nutzungsdauer | Experte | Autor auf Basis von Umsatzdaten und Produktpreisen | [3]* |
| | Landwirtschaftliche relevante Fläche | Experte | Autor | [3]* |
| Tab. 27 | Abschätzung der Kunststoffemissionen und Flächeneinträge durch beschichtetes Saatgut | | | |
| | Relevante Nutzfläche | Bericht | (Statistisches Bundesamt, 2019c) | [1,1,1,1,1] |
| | Saatgut pro Fläche | Artikel | (Lucchesi, Zlof und Heimbach, 2016) | [2,1,2,2,1] |
| | Impliziter Polymeranteil | Bericht | (ECHA, 2019) | [3,1,2,1,3] |
| Tab. 28 | Abschätzung der Kunststoffemissionen und Flächeneinträge durch umhüllte Düngemittel | | | |
| | Globale Produktion von umhüllten Düngern | Artikel | (Szu-Ying Tung, Noriaki Harada, Yuichi Sekiguti, and Hiroshi Aoki, 2017) | [2,1,3,1,3] |
| | Deutscher Anteil | Experte | Autor | [3]* |
| | Landwirtschaftlich genutzter Anteil | Experte | Autor | [3]* |
| | Alternativer Berechnungsansatz | Experte | Heinrich Beltz (LWK Kammer NS) | [2] |
| | Polymeranteil | Experte | Autor | [3]* |
| Tab. 29 | Abschätzung der Kunststoffemissionen und Flächeneinträge durch Bodenverbesserer | | | |
| | Globales Marktvolumen | Internetquelle | Allied Market Research ⁴⁷² | [3,1,3,3,3] |
| | Verkaufspreis | Experte | Autor auf Basis von Internetangeboten | [3]* |
| | Marktmenge EMEA-Raum | Experte | C. Riedl (Evonik Industries) | [2] |
| | Anteil D an EMEA-Raum | Experte | Autor | [3]* |

⁴⁷² <https://www.alliedmarketresearch.com/super-absorbent-polymers-market>; <https://www.transparencymarketresearch.com/pressrelease/sap-market.htm>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

| | | | | |
|----------------|--|----------------|--|-------------|
| | Anteil in der Landwirtschaft | Experte | M. Wiede (Gefa-Fabritz) | [2] |
| | Flächenbelastung | Internetquelle | Belchim-Agro ⁴⁷³ | [2,1,1,1,3] |
| Tab. 30 | Abschätzung der Kunststoffemissionen und Flächeneinträge durch >Pflanzenschutzmittel | | | |
| | Anteil und Menge polymerverkapselte Pflanzenschutzmittel in der EU | Bericht | (ECHA, 2019) | [2,1,2,1,3] |
| | Pflanzenschutzmittelverbrauch in D | Bericht | (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 2020) | [1,1,1,1,1] |
| | Polymeranteil | Experte | Autor | [3]* |
| | Einsatz von Pflanzenschutzmittel pro Fläche | Bericht | (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 2020) | [1,1,1,1,1] |
| Tab. 33 | Mengen in der biologischen Abfallbehandlung | | | |
| | Abfallmengen und landwirtschaftlich verwertete Mengen | Bericht | Statistisches Bundesamt (2019e) | [1,1,1,1,1] |
| | Berücksichtigung von NaWARo und Tierexkrementente | Experte | Statistisches BA | [1] |
| | Gütesichere Mengen und Anlagen | Internetquelle | BGK | [1,1,1,1,1] |
| | Mengen aus nicht gütesicherten Anlagen | Experte | Autor | [3]* |
| Tab. 34 | Kunststoffemissionen durch Verwertung von Komposten und Gärresten | | | |
| | Mengen von Flockungshilfsmitteln in Gärresten | Experte | Hego-Biotec GmbH | [2] |
| | | Bericht | DWA (2012) | [1,1,1,2,1] |
| | Fremdstoffgehalte in gütesicherten Komposten | Bericht | Kehres (2020) | [1,1,1,1,1] |
| | Zuordnung der Komposte | Experte | Autor | [3]* |
| | Fremdstoffgehalte in nicht gütesicherten Komposten | Experte | Autor | [4]* |
| | Anteil der Anlagen mit Flockungshilfsmitteln und Menge der Flockungshilfsmittel | Experte | J. Albertson | [2] |
| | Verwertung der Komposte | Bericht | Maria Thelen-Jüngling (2020) | [1,1,1,1,1] |

⁴⁷³ https://belchim-agro.de/pdf/Produktinfo/PI_Stockosorb_DE_2020.pdf, letzter Zugriff am 3.02.2021.

| | | | | |
|-------------------------|---|-----------|---------------------------------------|-------------|
| | Anteil der landwirtschaftlich genutzten Komposte | Experte | Autor | [3]* |
| Tab. 35 | Bodenbezogene Verwertung von öffentlichen und industriellen Klärschlämmen in D | | | |
| | Verwertung von Klärschlämmen | Bericht | CitaviStatistisches Bundesamt (2019a) | [1,1,1,1,1] |
| | | Bericht | Statistisches Bundesamt (2018) | [1,1,1,1,1] |
| | Insgesamt landwirtschaftlich verwertete Menge | Autor | Experte | [2]* |
| | Abschätzung der Klärschlammaufbringung pro Fläche | Autor | Experte | [2]* |
| | Abschätzung der Flächen mit Klärschlammaufbringung | Autor | Experte | [3]* |
| Tab. 36, Tab. 37 | Kunststoffeinträge und -anteile im Klärschlamm | | | |
| | Anteil Flockungshilfsmittel in Klärschlamm | Experte | J. Albertson | [2] |
| | Transfer von Reifenabrieb, Straßenmarkierung und Schuhabrieb in die Siedlungswasserwirtschaft | Literatur | Unice et al. (2019a) | [1,1,2,2,4] |
| | Transfer von verwitterten Fassadenfarben in die Siedlungswasserwirtschaft | Experte | Autor | [4]* |
| | Transfer in die Kläranlage | Literatur | Bertling, Hamann und Bertling (2018) | [1,1,1,1,4] |
| | Abscheidegrad von Kläranlagen | Literatur | Talvitie et al. (2017, Finnson) | [1,1,2,2,2] |
| | | Vortrag | Finnson (2021) | [1,1,2,2,2] |
| | Abscheidegrad Rechnen | Bericht | Kuhn (2014) | [1,1,1,2,3] |
| | Kunststoffanteil im Sandfanggut | Autor | Experte | [4]* |
| | Freisetzungen aus diversen Quellen | Literatur | Bertling, Hamann und Bertling (2018) | [1,1,1,1,4] |
| | Übergang in den Klärschlamm | Autor | Experte | [4]* |
| Kapitel 8.1 | Bestimmung der durchschnittlichen Litteringrate | | | |
| | Litteringrate | Bericht | Zimmermann et al. (2019) | [1,1,1,1,2] |
| | Litteringrate | Bericht | Bertling, Hamann und Bertling (2018) | [1,1,1,1,3] |
| | Litteringrate | Experte | Conversio | [3] |
| | Litteringrate | Literatur | Jambeck, Geyer und Wilcox (2015) | [1,1,3,1,4] |
| | Litteringrate - Ableitung eines Wertes für diese Studie | Experte | Autor | [2]* |

| Kapitel 8.2 Kunststoff-Litter-Einträge in die Siedlungswasserwirtschaft | | | | |
|--|-----------|--------------------------------------|-------------|--|
| Rechengutmenge und -kunststoffanteil | Bericht | Kuhn (2014) | [1,1,1,2,3] | |
| Rechengutmenge und -kunststoffanteil | Bericht | Kuhn (2014, Kuhn und Gregor) | [1,1,1,2,3] | |
| Erfassungsquote RE-chen | Autor | Experte | [4]* | |
| Transfer in die Kläranlage | Literatur | Bertling, Hamann und Bertling (2018) | [1,1,1,1,4] | |
| Kapitel 8.3 Kunststoff-Litter-Einträge in und durch die Landwirtschaft | | | | |
| Ansatz wurde nicht weiter verwendet | | | | |

11 Anhang III: Allgemeine Rechtsakte

11.1 Kreislaufwirtschaftsrecht

Im Bereich des Kreislaufwirtschaftsrechts sind konkret das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfVO) zu nennen.

Zweck des KrWG ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen (§ 1 KrWG). Das KrWG gilt gemäß § 1 Abs. 1 Nr. 1 bis 4 KrWG für die Vermeidung, die Verwertung, die Beseitigung sowie für sonstigen Maßnahmen der Abfallbewirtschaftung.⁴⁷⁴

Somit gilt grundsätzlich das KrWG für die im Rahmen dieser Studie betrachteten Produktgruppen:

- Folien, Vliese, Netze und Garne
- Beschichtungen
- Bewässerungssysteme, Pflanzbehälter und Pflanzhilfen

sobald diese Produkte die Abfalleigenschaft erreichen. Werden Produkte der betrachteten Produktgruppen in anderen Bereichen als privaten Haushalten verwendet (beispielsweise in der Landwirtschaft, im Gartenbau oder in der Forstwirtschaft) und werden zu Abfall, handelt es sich um gewerbliche Abfälle. Werden die im Rahmen der vorliegenden Studie betrachteten Infrastruktureinrichtungen (insbesondere Beschichtungen und andere feste Installationen) im Rahmen ihres Aufbaus oder Abbaus ganz oder teilweise zu Abfall, handelt es sich um Bauabfälle. Beide Abfallarten – gewerbliche Abfälle und bestimmte Bauabfälle – fallen zusätzlich in den Anwendungsbereich der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfVO).⁴⁷⁵

Für Bioabfälle und Klärschlamm enthält das KrWG in § 11 eine Verordnungsermächtigung u. a. zur Festlegung

- welche Abfälle als Bioabfälle oder Klärschlämme gelten
- welche Anforderungen an die getrennte Sammlung von Bioabfällen zu stellen sind
- ob und auf welche Weise Bioabfälle und Klärschlämme zu behandeln, welche Verfahren hierbei anzuwenden und welche anderen Maßnahmen hierbei zu treffen sind
- welche Anforderungen an die Art und Beschaffenheit der unbehandelten, der zu behandelnden und der behandelten Bioabfälle und Klärschlämme zu stellen sind sowie
- dass bestimmte Arten von Bioabfällen und Klärschlämmen nach Ausgangsstoff, Art, Beschaffenheit, Herkunft, Menge, Art oder Zeit der Aufbringung

⁴⁷⁴ Ausnahmen siehe § 2 Abs. 2 Nr. 1-15 KrWG.

⁴⁷⁵ Die Gewerbeabfallverordnung gilt für Erzeuger und Besitzer und die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen (§ 1 Abs. 1 Nr. 1 und 2 GewAbfV).

auf den Boden, Beschaffenheit des Bodens, Standortverhältnissen und Nutzungsart nicht, nur in bestimmten Mengen, nur in einer bestimmten Beschaffenheit oder nur für bestimmte Zwecke in Verkehr gebracht oder verwertet werden dürfen

Auf Basis dieser Verordnungsermächtigung (siehe dritten Punkt) wurde unter anderem die Klärschlammverordnung erlassen.

Maßgebliche Prinzipien und Pflichten für gewerbliche Erzeuger und Besitzer dieser Abfallarten sind

- das Vermeidungsprinzip an vorderster Stelle der Abfallhierarchie (§ 6 Abs. 1 Nr. 1 KrWG)
- die Getrenntsammlungspflicht von Kunststoffabfällen (§ 3 Abs. 1 GewAbfVO)
 - Gemäß § 3 Abs. 2 GewAbfVO entfällt die Getrenntsammlungspflicht, soweit die getrennte Sammlung der jeweiligen Abfallfraktion technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist. In diesem Fall muss der Besitzer bzw. Erzeuger das gesammelte Abfallgemisch einer Vorbehandlungsanlage zuführen (§ 4 Abs. 1 GewAbfVO).
- das Verwertungsgebot, nach dem die Abfälle vorrangig der Verwertung zugeführt werden müssen (§ 7 Abs. 1 Satz 1 KrWG)⁴⁷⁶ sowie
- die Überlassungspflicht von Abfällen zur Beseitigung an öffentlich-rechtliche Entsorger (§ 7 Abs. 1 GewAbfVO)

Dabei ist für die Anwendung des Abfallrechts die Legaldefinition von Abfall ausschlaggebend. Die Abfalleigenschaft erlangen Gegenstände und Stoffe gemäß § 3 Abs. 1 KrWG, wenn sich deren Besitzer ihrer entledigen, entledigen wollen oder entledigen müssen. Demnach unterliegen die hier betrachteten Kunststoffe nicht dem Abfallrecht, wenn bzw. solange diese nicht dieser Definition von Abfall entsprechen.

Der Wille zur Entledigung ist hinsichtlich von Stoffen und Gegenständen gemäß § 3 Abs. 3 KrWG anzunehmen, dass

»1. die bei der Energieumwandlung, Herstellung, Behandlung oder Nutzung von Stoffen oder Erzeugnissen oder bei Dienstleistungen anfallen, ohne dass der Zweck der jeweiligen Handlung hierauf gerichtet ist, oder

2. deren ursprüngliche Zweckbestimmung entfällt oder aufgegeben wird, ohne dass ein neuer Verwendungszweck unmittelbar an deren Stelle tritt

Für die Beurteilung der ursprünglichen Zweckbestimmung ist die Auffassung des Erzeugers oder Besitzers unter Berücksichtigung der Verkehrsanschauung zugrunde zu legen.«

⁴⁷⁶ Gemäß § 7 Abs. 1 Satz 1 KrWG entfällt dieser Vorrang, »wenn die Beseitigung der Abfälle den Schutz von Mensch und Umwelt nach Maßgabe des § 6 Absatz 2 Satz 2 und 3 [KrWG] am besten gewährleistet.«

Bezüglich der Beurteilung der Zweckbestimmung gibt es nach geltendem Recht keine weitere Konkretisierung der zu berücksichtigenden Verkehrsanschauungen (Verständnis der Allgemeinheit).

Der Besitzer oder Erzeuger unterliegt gemäß § 3 Abs. 4 KrWG einer Entledigungspflicht, wenn die Stoffe oder Gegenstände

- nicht mehr entsprechend ihrer ursprünglichen Zweckbestimmung verwendet werden und
- sie aufgrund ihres konkreten Zustandes geeignet sind, gegenwärtig oder künftig das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die Umwelt, zu gefährden und deren Gefährdungspotenzial nur durch eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung oder gemeinwohlverträgliche Beseitigung [...] ausgeschlossen werden kann

Das bedeutet, dass das Eintreten der Abfalleigenschaft von Stoffen und Gegenständen i. S. des Gesetzes erfolgt, sofern

- sich der Besitzer oder Erzeuger ihrer entledigt oder
- diese Stoffe oder Gegenstände bei einer Handlung anfallen, ohne dass der Zweck der Handlung darauf ausgerichtet war oder
- der ursprüngliche Verwendungszweck entfällt, ohne dass ein neuer Verwendungszweck an dessen Stelle tritt) oder
- sie nicht mehr entsprechend ihrer ursprünglichen Zweckbestimmung verwendet werden, verbunden mit der Eignung dieser Stoffe oder Gegenstände aufgrund ihres Zustands die Umwelt oder das Allgemeinwohl zu gefährden, und dieses Gefährdungspotenzial nur durch ihre Verwertung oder Beseitigung ausgeschlossen werden kann

Dabei erfolgt die Definition der »ursprünglichen Zweckbestimmung« maßgeblich durch die besitzhabende und erzeugende Person (Subjektivierung), jedoch ist die allgemeine Verkehrsanschauung auch zu berücksichtigen.

Die Bedeutung der beschriebenen gegenwärtigen Rechtslage wird im folgenden Beispiel skizziert: Wird neue Folien-Bahnenware zur Abdeckung eines Spargelbeets verwendet, so kann als ursprünglicher Verwendungszweck das Abdecken des Spargelbeets angenommen werden. Wird die Folie beim Ernten vom Spargelbeet entfernt und nicht mehr für das Abdecken des Spargelbeets eingesetzt, so verliert die Folie ihren ursprünglichen Verwendungszweck. Der ursprüngliche Verwendungszweck wird aufgegeben und die Abfalleigenschaft tritt ein. Eben diese würde auch eintreten, wenn die Folie für die Abdeckung des Bodens verwendet wird (beispielsweise um diesen vor Licht zu schützen) und verbleibt die Folie dann so lange auf dem Boden, bis sie verwittert und in kleine Teile zerfällt, dann entfällt der ursprüngliche Verwendungszweck ebenfalls, da keine Abdeckung mehr erfolgt. In beiden Fällen entstünde die Verpflichtung, diese der Verwertung zuzuführen. Allerdings stellt sich an dieser Stelle die Frage nach der Unmittelbarkeit dieser Rechtspflicht – d. h. es wird aus dem Gesetzeswortlaut nicht deutlich, ob diese Pflicht sofort mit Beginn der Abfalleigenschaft eintritt und somit der Folienabfall erst gar

nicht auf dem Boden verweilen dürfte oder aber, ob es im Ermessen der Landwirt*innen liegt, zu entscheiden, wann der Folienabfall der getrennten Sammlung und Verwertung zugeführt wird.

Aus dem Wortlaut des Abs. 2 S. 1 KrWG ergibt sich nicht, zu welchem Zeitpunkt nach dem Anfall des Abfalls die Verwertungspflicht erfüllt sein muss. Landmann und Romer kommentieren hierzu: »Der BFH gehe davon aus, dass gesetzliche Verwertungspflichten nicht auf die lange Bank geschoben« werden dürften (BFH, Urt. v. 21. 9. 2005 – X R 29/03 –, juris Rdnr. 18 zitiert n. Landmann/Rohmer UmweltR/Beckmann KrWG § 7 Rn. 28-34). Landmann und Rohmer führen dazu weiter aus: »Obwohl die Verwertungspflicht unmittelbar mit dem Entstehen des Abfalls einsetzt, bedeutet dies nicht, dass der Abfallbesitzer und der Abfallerzeuger verpflichtet wären, den Abfall bereits unmittelbar nach dessen Anfall zu verwerten. Vielmehr steht den Verantwortlichen ein angemessener Zeitraum zur Vorbereitung, zur Entscheidung über den beabsichtigten Verwertungsweg sowie zur Durchführung der Verwertung zur Verfügung. Als Maßstab für eine angemessene Zeitspanne kann der Begriff der Unverzüglichkeit im Sinne von § 121 BGB herangezogen werden. Danach muss die Verwertung des Abfalls ohne schuldhaftes Zögern erfolgen. Ob ein solches vorliegt, ist wiederum anhand der allgemeinen Verkehrsanschauung zu bestimmen.« Es muss demzufolge eine Einzelfallbetrachtung dahingehend vorgenommen werden, welcher Aufwand bei den in Rede stehenden Abfallarten typischerweise notwendig ist, um eine möglichst effektive Verwertung vorzubereiten und durchzuführen.

Die Bund-Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) hat entsprechende Vollzugshinweise zur Gewerbeabfallverordnung erarbeitet.⁴⁷⁷

11.2 Bodenschutzrecht

In Deutschland sind das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und die Bundes-Bodenschutzverordnung die grundlegenden Regelwerke des Bodenschutzrechts. Das BBodSchG regelt Pflichten sowohl des *vorsorgenden* als auch des *nachsorgenden* Bodenschutzes. Gemäß § 1 ist der Zweck des Bodenschutzgesetzes,

»nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen. Hierzu sind schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, der Boden und Altlasten sowie hierdurch verursachte Gewässerverunreinigungen zu sanieren und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen. Bei Einwirkungen auf den Boden sollen Beeinträchtigungen seiner natürlichen Funktionen sowie seiner Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte so weit wie möglich vermieden werden.«

Das BBodSchG gilt grundsätzlich nur für solche Einwirkungen, die nicht durch andere Rechtsinstrumente geregelt werden. Das heißt, es ist subsidiär gegenüber anderen Rechtsvorschriften (vgl. hierzu die Regelungen in § 3 BBodSchG). So fallen in

⁴⁷⁷ Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (2019).

den Anwendungsbereich des Gesetzes gemäß § 3 Abs. 1 schädliche Bodenveränderungen, soweit folgende (und weitere) Vorschriften entsprechende Einwirkungen auf den Boden nicht regeln:

- Vorschriften des Kreislaufwirtschaftsgesetzes über das Aufbringen von Abfällen zur Verwertung als Düngemittel im Sinne des § 2 des Düngegesetzes und der hierzu aufgrund des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und des bis zum 1. Juni 2012 geltenden Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes erlassenen Rechtsverordnungen
- Vorschriften des Düngemittel- und Pflanzenschutzrechts

Zentrale Begriffe des Bodenschutzrechts sind die (zu schützenden) »Funktionen des Bodens« und die »schädliche Bodenveränderung« (§ 1 Satz BBodSchG). Die Bodenfunktionen umfassen

- natürliche Funktionen (Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen, Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen, Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen aufgrund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers) (§ 2 Abs. 2 Nr. 1 BBodSchG)
- Funktionen als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte (§ 2 Abs. 2 Nr. 2 BBodSchG)
- Nutzungsfunktionen als Rohstofflagerstätte, Fläche für Siedlung und Erholung, Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung, Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung (§ 2 Abs. 2 Nr. 3 BBodSchG)

Schädliche Bodenveränderungen im Sinne dieses Gesetzes sind gemäß § 2 Abs. 3 »Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen«.

Laut Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg⁴⁷⁸ genügt für das Vorliegen einer Beeinträchtigung, »dass eine der in § 2 Abs. 2 BBodSchG aufgeführten Bodenfunktionen nachteilig beeinflusst wird; dies kann eine der natürlichen Bodenfunktionen oder Archivfunktionen wie auch eine der Nutzungsfunktionen sein«.⁴⁷⁹

Zur Sicherung oder Wiederherstellung der Bodenfunktionen regelt das BBodSchG insbesondere »Pflichten zur Gefahrenabwehr« (§ 4 BBodSchG) und eine »Vorsorgepflicht« (§ 7 BBodSchG).

⁴⁷⁸ LUBW (2018, S. 39): Bodenschutzrecht – Handreichung für die Verwaltung. Online unter: https://fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/102234/Fachzugang_Recht_Internet.pdf?command=downloadContent&filename=FacHzugang_Recht_Internet.pdf&, letzter Zugriff am 13.1.2020.

⁴⁷⁹ Für Erläuterungen zur weiterführenden Beurteilung bzgl. der Eignung der Beeinträchtigung »Gefahren«, »erhebliche Nachteile« oder »erheblich Belästigungen herbeizuführen« s. LUBW (2018, S. 39 ff.), Abschnitt »Eignung zur Herbeiführung einer Gefahr, eines Nachteils oder einer Belästigung«. Rechtliche Vorgaben zur Beurteilung der Gefahrenlage sind in der BBodSchV aufgeführt.

Für die Gefahrenabwehr sind in § 4 BBodSchG mehrere Gebote normiert (nicht abschließende Auflistung), die jeweils entweder dem vorbeugenden oder dem nachwirkenden Bodenschutz zugeordnet werden können.

- »Jeder, der auf den Boden einwirkt, hat sich so zu verhalten, dass schädliche Bodenveränderungen nicht hervorgerufen werden.« (§ 4 Abs. 1 BBodSchG)
- »Der Grundstückseigentümer und der Inhaber der tatsächlichen Gewalt über ein Grundstück sind verpflichtet, Maßnahmen zur Abwehr der von ihrem Grundstück drohenden schädlichen Bodenveränderungen zu ergreifen.« (§ 4 Abs. 2 BBodSchG)
- »Der Verursacher einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast sowie dessen Gesamtrechtsnachfolger, der Grundstückseigentümer und der Inhaber der tatsächlichen Gewalt über ein Grundstück sind verpflichtet, den Boden und Altlasten sowie durch schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten verursachte Verunreinigungen von Gewässern so zu sanieren, dass dauerhaft keine Gefahren, erheblichen Nachteile oder erheblichen Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit entstehen. Hierzu kommen bei Belastungen durch Schadstoffe neben Dekontaminations- auch Sicherungsmaßnahmen in Betracht, die eine Ausbreitung der Schadstoffe langfristig verhindern. [...]« (§ 4 Abs. 3 BBodSchG)
- »Sind schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten nach dem 1. März 1999 eingetreten, sind Schadstoffe zu beseitigen, soweit dies im Hinblick auf die Vorbelastung des Bodens verhältnismäßig ist [...]« (§ 4 Abs. 5 BBodSchG)⁴⁸⁰
- »Der frühere Eigentümer eines Grundstücks ist zur Sanierung verpflichtet, wenn er sein Eigentum nach dem 1. März 1999 übertragen hat und die schädliche Bodenveränderung oder Altlast hierbei kannte oder kennen musste. [...]« (§ 4 Abs. 6 BBodSchG)⁴⁸⁰

Die Vorsorgepflicht nach § 7 Satz 1 BBodSchG richtet sich an den Eigentümer eines Grundstücks, den »Inhaber der tatsächlichen Gewalt über ein Grundstück« und an diejenigen, »der Verrichtungen auf einem Grundstück durchführt oder durchführen lässt, die zu Veränderungen der Bodenbeschaffenheit führen« und verpflichtet die genannten Beteiligten, »Vorsorge gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen zu treffen, die durch ihre Nutzung auf dem Grundstück oder in dessen Einwirkungsbereich hervorgerufen werden können«. Entsprechende Vorsorgemaßnahmen umfassen die Vermeidung oder die Verminderung von Bodeneinwirkungen, »wenn wegen der räumlichen, langfristigen oder komplexen Auswirkungen einer Nutzung auf die Bodenfunktionen die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht« (§ 7 Satz 2 BBodSchG). Allerdings besteht diese Pflicht nur soweit dies hinsichtlich des »Zweck[s] der Nutzung des Grundstücks verhältnismäßig ist«.

Darüber hinaus sind in § 17 sieben Grundsätze der guten fachlichen Praxis in der landwirtschaftlichen Bodennutzung definiert. Das grundlegende Prinzip der guten

⁴⁸⁰ Des Weiteren heißt es: »Dies gilt für denjenigen nicht, der zum Zeitpunkt der Verursachung aufgrund der Erfüllung der für ihn geltenden gesetzlichen Anforderungen darauf vertraut hat, dass solche Beeinträchtigungen nicht entstehen werden, und sein Vertrauen unter Berücksichtigung der Umstände des Einzelfalles schutzwürdig ist.«

fachlichen Praxis ist »die nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und Leistungsfähigkeit des Bodens als natürlicher Ressource« (§ 17 Abs. 2 BBodSchG). Die Grundsätze beziehen sich dabei u. a. auf die Bodenbearbeitung, die Bodenstruktur, Bodenverdichtungen oder Bodenabträge (vgl. § 17 Abs. 2 Nr. 1-4 BBodSchG). Bodeneinträge bzw. Verunreinigungen werden hier hingegen nicht konkret adressiert.

Anforderungen an das Ein- und Aufbringen von Materialien auf oder in den Boden i. S. des vorsorgenden Bodenschutzes können gemäß § 6 BBodSchG durch entsprechende Verordnungen konkretisiert werden. Auf Basis dieser Verordnungsermächtigung sind in der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) Anforderungen zur Vorsorge gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen nach § 7 BBodSchG einschließlich der Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien nach § 6 des Bundes-Bodenschutzgesetzes geregelt (§ 1 Nr. 4 BBodSchV).

In § 9 BBodSchV werden die Voraussetzungen konkretisiert, bei denen Vermeidungs- oder Verminderungsmaßnahmen zur Vorsorge ergriffen werden müssen. Diese umfassen

- Schadstoffgehalte bestimmter metallischer und anorganischer Stoffe, deren Messwerte die Vorsorgewerte nach Anhang 2 Nr. 4 BBodSchV überschreiten⁴⁸¹ oder
- falls eine erhebliche Anreicherung von anderen Schadstoffen erfolgt, die aufgrund ihrer krebserzeugenden, erbgutverändernden, fortpflanzungsgefährdenden oder toxischen Eigenschaften in besonderem Maße geeignet sind, schädliche Bodenveränderungen herbeizuführen

In § 12 BBodSchV werden Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden konkretisiert. Von besonderer Bedeutung für den Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Studie ist insbesondere Abs. 8:

»Von dem Auf- und Einbringen von Materialien sollen Böden, welche die Bodenfunktionen nach § 2 Abs. 2 Nr. 1 und 2 des Bundes-Bodenschutzgesetzes im besonderen Maße erfüllen, ausgeschlossen werden. Dies gilt auch für Böden im Wald, in Wasserschutzgebieten nach § 51 Absatz 1 des Wasserhaushaltsgesetzes, in Naturschutzgebieten, Nationalparks, nationalen Naturmonumenten, Biosphärenreservaten, Naturdenkmälern, geschützten Landschaftsbestandteilen, Natura 2000-Gebieten und gesetzlich geschützten Biotopen im Sinne des § 30 des Bundesnaturschutzgesetzes sowie für die Böden der Kernzonen von Naturschutzgroßprojekten des Bundes von gesamtstaatlicher Bedeutung. Die fachlich zuständigen Behörden können hiervon Abweichungen zulassen, wenn ein Auf- und Einbringen aus forst- oder naturschutzfachlicher Sicht oder zum Schutz des Grundwassers erforderlich ist.« (§ 12 Abs. 8 BBodSchV)

⁴⁸¹ Vorsorgewerte sind für bestimmte Metalle (Kadmium, Blei, Chrom, Kupfer, Quecksilber, Nickel und Zink) und für bestimmte organische Stoffe (Polychlorierte Biphenyle (PCB(tief)6), Benzo(a)pyren und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK(tief)16)) festgelegt. Bei den metallischen Stoffen hängt die Höhe des jeweiligen Vorsorgewerts von der Bodenart, bei den anorganischen Stoffen vom Humusanteil ab.

Des Weiteren sind die Absätze 9 und 4 von Bedeutung:

»Beim Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden sollen [...] sonstige nachteilige Bodenveränderungen durch geeignete technische Maßnahmen sowie durch Berücksichtigung der Menge und des Zeitpunktes des Aufbringens vermieden werden. [...]« (§ 12 Abs. 9 BBodSchV)

»Bei landwirtschaftlicher Folgenutzung sollen im Hinblick auf künftige unvermeidliche Schadstoffeinträge durch Bewirtschaftungsmaßnahmen oder atmosphärische Schadstoffeinträge die Schadstoffgehalte in der entstandenen durchwurzelbaren Bodenschicht 70 Prozent der Vorsorgewerte nach Anhang 2 Nr. 4 nicht überschreiten.« (§ 12 Abs. 4 BBodSchV)

Das BBodSchG bildet einen grundsätzlichen Rechtsrahmen, über den speziell der Eintrag von Mikroplastik adressiert werden könnte. Zentrales Instrument wäre dafür eine Rechtsverordnung gemäß § 6, durch die das Auf- und Einbringen von Mikroplastik auf oder in den Boden geregelt werden könnte. Konkret könnten durch die Verordnungsermächtigung Anforderungen an die Eigenschaft der Materialien sowohl in Bezug auf ihre Schadstoffgehalte als auch hinsichtlich ihrer physikalischen oder biologischen Eigenschaften normiert werden.⁴⁸²

Daneben wären auf Basis der Verordnungsermächtigung nach § 8 BBodSchG sowohl Prüf-, Maßnahmen- und Vorsorgewerte in Bezug auf eine schädliche Bodenveränderung speziell für Mikroplastik festzulegen. Diese sind »für den praktischen Behördenvollzug von herausragender Bedeutung«⁴⁸³.

11.3 Chemikalienrecht

Am 1. Juni 2007 ist die neue europäische Chemikalienverordnung REACH (1907/2006/EG) in Kraft getreten. REACH steht für »Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (Registrierung, Bewertung und Zulassung und Beschränkung von Chemikalien)«.

Mit dieser Verordnung werden die Vermarktung und Verwendung von chemischen Stoffen als solche, in Gemischen und in Erzeugnissen geregelt. Die Verantwortung für die sichere Verwendung von Chemikalien ist damit auf die Industrie übertragen worden.

Stoffhersteller- und -importunternehmen müssen dabei die in Verkehr gebrachten Stoffe bei der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) in Helsinki registrieren. Mit dem Registrierungsdossier müssen sie nicht nur Daten zu den Eigenschaften der chemischen Stoffe, sondern auch Informationen über die Verwendungen, in denen diese Stoffe eingesetzt werden, vorlegen. Für einige Stoffe (hohe Tonnage oder Gefährlichkeit) sind die Risiken der Verwendung zu bewerten. Mit Informationen zu möglichen Expositionen bei der Verwendung der Stoffe und Risiken für Mensch

⁴⁸² Vgl. BeckOK UmweltR/Ginzky, 53. Ed. 1.4.2018, BBodSchG § 6 Rn. 3-6a.

⁴⁸³ BeckOK UmweltR/Ginzky BBodSchG § 8 Rn. 1-20.

und Umwelt können Maßnahmen zum Risikomanagement zielgerichtet und effizient abgeleitet und kommuniziert werden. So soll gewährleistet werden, dass die Stoffe nur noch in sicheren Anwendungen eingesetzt werden. Dies gilt für den gesamten Lebenszyklus von der Herstellung bis zur Abfallphase.

Weitergehende Bewertungen der erhobenen Daten können zur Folge haben, dass besonders besorgniserregende Stoffe oder unannehmbare Risiken bei der Nutzung von Stoffen durch weitergehende Risikomanagementmaßnahmen im Rahmen der Verordnung beseitigt werden. Dazu dienen die Prozesse Zulassung und Beschränkung. Während die materiellen Wirkungen aufgrund einer eingeschränkten Stoffnutzung für die Marktakteure in weiten Bereichen gleich sein können, unterscheiden sich die beiden Instrumente hinsichtlich der prozeduralen Aspekte ihrer Erarbeitung und dabei insbesondere in der jeweiligen Darlegungslast deutlich.

Im Beschränkungsverfahren werden für einen Stoff oder eine Stoffgruppe allgemeingültige, materiell aber ggf. recht differenzierte Vermarktungs- und Verwendungsverbote formuliert. Grundlage dafür ist ein entweder von einer zuständigen Behörde der Mitgliedstaaten oder aber von der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) im Auftrag der EU-Kommission erstelltes Dossier. In diesem Dossier ist ein unannehmbares Risiko aus der Nutzung des entsprechenden Stoffes zu belegen, dessen Beherrschung einer EU-weiten Regulierung bedarf. Dabei können Risiken entlang des gesamten Lebenszyklus herangezogen werden. Es ist möglich sowohl einzelne als auch alle Verwendungen des Stoffes zu adressieren. Zudem kann auch die Anwesenheit des Stoffes in Erzeugnissen oder als Teil anderer Stoffe, seine Herstellung in der EU sowie der Import, Gegenstand der Beschränkung sein.

Im Zulassungsverfahren wird ein generelles Verbot der Verwendung eines Stoffes mit Erlaubnisvorbehalt in der EU festgelegt. Grundlage ist hier, dass der Stoff zuvor als besonders besorgniserregend (SVHC) identifiziert und in den Anhang XIV - Verzeichnis der zulassungspflichtigen Stoffe - der REACH-Verordnung aufgenommen wurde. Das Instrument der Zulassung beinhaltet die Möglichkeit für die einzelnen Marktakteure, auf Basis eines fundiert zu begründenden Antrages, eine, mit einer Überprüfungsfrist belegte, Zulassung für definierte Verwendungen des Stoffes zu erlangen.

Spezifische Vorgaben zum Umgang mit Mikroplastik (wie es sie bspw. seit 2018 für Nanomaterialien gibt) gibt es hier bislang nicht; jedoch hat die ECHA im Jahr 2019 einen Beschränkungsvorschlag für Mikroplastik unter REACH veröffentlicht, den sie im Auftrag der EU Kommission erarbeitet hat; dieser wird im nachfolgenden Abschnitt 11.3.1 ausführlicher dargelegt.

11.3.1 ECHA-Entwurf zur Regulierung von Mikroplastik

Die europäische Chemikalienagentur ECHA wurde im Januar 2018 von der EU Kommission beauftragt, einen Vorschlag für eine mögliche Beschränkung von Mikroplastik zu erarbeiten (*»The Commission has requested ECHA to prepare an Annex*

*XV restriction dossier concerning the use of intentionally added microplastic particles to consumer or professional use products of any kind.*⁴⁸⁴).

Der Auftrag bezieht sich explizit auf Mikroplastik, welches Produkten intendiert zugefügt wird. Mikroplastik, das in der Nutzung von Produkten oder in der Umwelt durch Verwitterung, Zersetzung, Abbau etc. von Makroplastik (von Folien, Verpackungen, Fischernetzen etc.) entsteht, ist explizit nicht Gegenstand des Regulierungsvorschlags.

11.3.1.1 Ziel

Ziel des Regulierungsvorschlags⁴⁸⁵ ist ein Vermarktungsverbot von Mikroplastik für alle Verwendungen, in denen eine Freisetzung in die Umwelt unvermeidlich ist. Dabei sind Ausnahmen für bestimmte bestehende Verwendungen vorgesehen, die bereits in anderem Kontext geregelt sind, so wie bspw. Düngemittel nach EU-Düngemittelverordnung. für Verwendungen, bei denen keine Freisetzung von Mikroplastik zu erwarten ist, sowie Verwendungen im industriellen Kontext gelten bestimmte Informations- und Berichtspflichten.

11.3.1.2 Definition von Mikroplastik im ECHA-Vorschlag

Der Regulierungsvorschlag für den verbotenen Stoff⁴⁸⁶ entspricht zunächst im Grunde der allgemeinen Definition eines Polymers, ohne konkret auf Mikroplastik einzugehen: »Polymers within the meaning of Article 3 (5) of Regulation (EC) No. 1907/2006⁴⁸⁷, «

Hier werden Polymere definiert als »*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:*

- eine einfache Gewichtsmehrheit von Molekülen mit mindestens drei Monomereinheiten, die zumindest mit einer weiteren Monomereinheit bzw. einem sonstigen Reaktanten eine kovalente Bindung eingegangen sind;
- weniger als eine einfache Gewichtsmehrheit von Molekülen mit demselben Molekulargewicht.«

Diese allgemeine Definition des zu beschränkenden Stoffes wird konkretisiert durch die Beschränkungsbedingungen in Spalte 2:

⁴⁸⁴ <https://echa.europa.eu/de/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18244cd73>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁸⁵ ECHA (2019): ANNEX XV Restriction Report – Proposal for a Restriction – intentionally added microplastics. Version number 1.2, 22 August 2019. <https://echa.europa.eu/de/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18244cd73>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁸⁶ Siehe Tabelle 3 und 17 im Restriction Report; Spalte 1 der Tabelle.

⁴⁸⁷ Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission.

»Shall not, from [entry into force] be placed on the market as a substance on its own or in a mixture as a microplastic in a concentration equal to or greater than 0.01 % w/w.«

Das Verbot betrifft also die Inverkehrbringung von (nicht natürlichen) Polymeren, sofern diese (in Reinform oder als Gemisch) als Mikroplastik eingesetzt werden. Mikroplastik werden dabei definiert als

»material consisting of solid polymer-containing particles, to which additives or other substances may have been added, and where $\geq 1\%$ w/w of particles have (i) all dimension $1\text{nm} \leq x \leq 5\text{mm}$ or (ii), for fibres, a length of $3\text{ nm} \leq x \leq 15\text{ mm}$ and length to diameter ration of >3 .«

Mikroplastik bezeichnet hier also ein Material bestehend aus festen Partikeln, die Polymere enthalten und dem zusätzlich Additive oder andere Stoffe zugesetzt sein können, mit mindestens 1 Gew.-% der Partikel zwischen 1 nm und 5 mm.

Darüber hinaus werden unterschieden bzw. definiert

- »microbeads« als »microplastic used in a mixture as an abrasive i. e. to exfoliate, polish or clean«
- »particle« als »minute piece of matter with defined physical boundaries; a defined physical boundary is an interface«
- »polymer containing particle« als »either a particle of any composition with a continuous polymer surface coating of any thickness or a particle of any composition with a polymer content of $\geq 1\%$ w/w«

11.3.1.3 Ausnahmen für natürlich vorkommende oder biologisch abbaubare Polymere

Mikroplastik im Sinne des Regulierungsvorschlags liegt nicht vor, wenn Polymere zum Einsatz kommen, die natürlich vorkommen und nicht chemisch modifiziert wurden (außer über Hydrolyse⁴⁸⁸). Hierhinter steht die Argumentation, dass eine Anreicherung in der Umwelt entfällt, da diese Stoffe in der beschriebenen Form ohnehin in der Umwelt vorkommen.

Ebenso besteht eine Ausnahme für Polymere, die biologisch abbaubar sind.

Als biologisch abbaubar in diesem Sinne gelten Materialien, die mindestens eines der folgenden vier Kriterien erfüllen oder – alternativ – deren biologische Abbaubarkeit durch ein »higher tier«-Assessment nachgewiesen wurde (vgl. auch Tab. 56):

- »Ready Biodegradation«
60 % Mineralisierung⁴⁸⁹ in 28 Tagen
Zulässige Testmethoden: OECD TG 301, B, C, D, F und OECD TG 310
- »Enhanced/ modified ready biodegradation«
60 % Mineralisierung in 60 Tagen

⁴⁸⁸ Da hier keine Modifikation stattfindet, die nicht natürlich vorkommen kann; entsprechend Anhang V, Ausnahmen von der Registrierungspflicht.

⁴⁸⁹ Abbau zu CO₂ und Wasser.

Zulässige Testmethoden: OECD TG 301, B, C, D, F und OECD TG 310 und OECD TG 306

- »Inherent Biodegradation«
≥ 70 % Mineralisierung in Erfüllung der Testkriterien von OECD 302B (Zahn-Wellens) oder OECD 302C (MITI II Test)
- »Bio(degradation) relative to a reference material«
≥ 90 % Mineralisierung in 6 Monaten in aquatischer Umwelt und 24 Monaten in Böden

Zulässige Testmethoden: EN ISO 14852:2018, 14851:2004, EN ISO 19679:2016, EN ISO 18830:2006, EN ISO 17556:2012

Für das alternative »higher tier«-Assessment sind Tests unter der Anwendung entsprechenden Umweltbedingungen durchzuführen. Diese müssen für das relevanteste Umweltkompartiment erfolgen, in dem von einem Verbleib des Mikroplastiks nach Anwendung auszugehen ist. Die konkreten Anforderungen sind im Regulierungsvorschlag weiter ausgeführt. Zulässige Testmethoden sind OECD TG 307, OECD TG 308 und OECD TG 309.

11.3.1.4 Weitere Ausnahmen

Eine Reihe von (weiteren) Ausnahmen ist im Regulierungsvorschlag vorgesehen, bei denen auf Regulierungen an anderer Stelle verwiesen wird:

- 4 (a): Verwendung in industriellen Anwendungen⁴⁹⁰
- 4 (b): Verwendung in Human- und Tierarzneimitteln (Verordnung (EU) Nr. 726/2004)⁴⁹¹
- 4 (c): Stoffe oder Gemische im Rahmen der EU-Düngemittelverordnung (Verordnung EU 2019/1009)⁴⁹²

Neben diesen vorgeschlagenen Ausnahmen, welche sich auf Regulierungen an anderer Stelle beruhen, sind expositionsbezogene Ausnahmen vorgesehen:

- 5 (a) Mikroplastik, bei dem keine Freisetzung aufgrund technischer Maßnahmen entlang des Lebenszyklus erfolgt (inkl. Abfallphase)
- 5 (b) Mikroplastik, das permanent so umgewandelt wird, dass es nicht mehr als Mikroplastik vorliegt (Verlust der partikulären Form), z.B. filmgebende Farben, Beschichtungen, Kosmetika, lösliche Polymere
- 5 (c) Mikroplastik, das permanent bei der Verwendung in eine Matrix eingeschlossen wird, z. B. Einsatz in Bauprodukten

Daneben besteht eine Kennzeichnungspflicht für Ausnahmen vom Inverkehrbringungsverbot nach 4 (a) und (b) sowie für die expositionsbezogenen Ausnahmen. Die Kennzeichnung muss Hinweise enthalten, die darauf hinwirken, dass jegliche Freisetzung unterbunden wird (einschließlich Entsorgung). Die Hinweise müssen

⁴⁹⁰ Unterscheidung zu professionellen Anwendungen gemäß ECHA Leitlinie R 12; https://echa.europa.eu/documents/10162/13632/information_requirements_r12_de.pdf/cee09f86-fdb1-4565-be6f-7c7bae797128, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁹¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32004R0726>, letzter Zugriff am 3.02.2021.

⁴⁹² https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.170.01.0001.01.DEU&toc=OJ:L:2019:170:TOC, letzter Zugriff am 3.21.2021.

klar sichtbar, dauerhaft und untrennbar (»clearly visible, legible and indelible«) vom Produkt sein (Optionen möglich, abhängig vom Produkt).

11.3.1.5 Berichtspflichten

Für Ausnahmen vom Inverkehrbringungsverbot nach 4 (a) und (b) sowie 5 (b) und (c) besteht zudem eine Berichtspflicht (jährlich zum 31. Januar, in festgelegten Format der ECHA, Artikel 111) bzgl.

- Identität der Mikroplastikpartikel
- Beschreibung der Verwendung inklusive der Funktion des Stoffs
- Menge
- Quantifizierung der Freisetzung

11.3.1.6 Zeitlinie

Während einige Regelungen direkt mit Inkrafttreten der Regulierung Gültigkeit erlangen sollen, sind für einige Übergangszeiten vorgeschlagen:

| Inkrafttreten | Gegenstand |
|--------------------------------|---|
| Direkt (Entry into force, EiF) | Rinse-off cosmetic products containing microbeads Detergents or maintenance products containing microbeads |
| EiF + 2 Jahre | Medical devices as defined in regulation (EC) 2017/745 and in vitro diagnostic medical devices as defined in regulation (EC) 2017/746. |
| EiF + 4 Jahre | Other rinse-off cosmetic products Detergents containing polymeric fragrance encapsulation Other detergents Waxes and polishes (maintenance products) |
| EiF + 5 Jahre | Fertilising products not regulated in the EU as fertilising Products under Regulation (EC) No 2019/1009 on Fertilising Products that do not meet the requirements for biodegradability contained in that Regulation Other agricultural and horticultural uses including seed treatment, plant protection products as defined in Regulation (EC) No 1107/2009 and biocides as defined in Regulation (EU) 528/2012 |
| EiF + 6 Jahre | »Leave-on« cosmetic products |

Tab. 54 Zeitlinie des Inkrafttretens des ECHA-Beschränkungsvorschlags für Mikroplastik

11.3.1.7 Zusammenfassung und Einordnung

Der ECHA Regulierungsvorschlag umfasst eine Beschränkung des Einsatzes intendiert hinzugefügten Mikroplastiks. Ausgenommen hiervon sind

- Polymere, die natürlich vorkommen und nicht chemisch modifiziert wurden
- biologisch abbaubare Polymere

(Nicht-intendierte) Mikroplastikeinträge in Folge von Verwitterung, Abrieb usw. von Produkten sind durch den Regulierungsvorschlag nicht adressiert. Das heißt, für die im Rahmen dieser Studie betrachteten Quellen in Kapitel 7.1 und 7.2, bei denen Abrieb in der Nutzung oder Verwitterung nach nicht erfolgter korrekter Entsorgung und Verbleib in der Umwelt die zentralen Eintragsmechanismen für Mikroplastik darstellen, weist der Regulierungsvorschlag keine Relevanz auf.

Eine Relevanz besteht für den Bereich des Saatguts und der Pflanzenschutzmittel. Hier kommen – biologisch nicht-abbaubare – Polymere zum Einsatz, die unter den Beschränkungsvorschlag fallen würden.

Intendiert hinzugefügte Mikroplastik kommen bei den im Rahmen dieser Studie untersuchten Quellen auch im Bereich der Düngemittel vor. Düngemittel (und Bodenverbesserer) nach EU-Düngemittelverordnung (welche ab 2026 eine biologische Abbaubarkeit vorsieht) sind jedoch von dem Beschränkungsvorschlag ausgenommen.⁴⁹³

Weiterhin können die im Rahmen dieser Studi adressierten Silobeschichtungen intendiert zugefügtes Mikroplastik enthalte. Hier greifen jedoch die Ausnahmen bzgl. Umwandlung (Verlust der partikulären Form) oder Einschluss in eine Matrix. Trotz Umwandlung oder Einschluss sind jedoch Umwelteinträge durch Verwitterung nicht auszuschließen.

11.4 Freiwillige Standards

11.4.1 Bahnenware

Eine Übersicht der relevanten freiwilligen Standards und Rücknahmesysteme im Bereich der Bahnenware findet sich in Tab. 55.

⁴⁹³ Düngemittel dürfen auch nach den Vorgaben nationaler Gesetzgebung in Verkehr gebracht werden (in Deutschland nach den Vorgaben des deutschen Düngegesetzes). Da die Ausnahme sich nur auf Düngemittel unter der EU-Verordnung bezieht, würden für solche Düngemittel die Vorgaben einer Regulierung entsprechend des ECHA Regulierungsvorschlags gelten. Das heißt, durch ECHA-Regulierungsvorschlag und EU-Düngemittelverordnung ergäbe sich, dass (ab 2026) nur noch abbaubare Polymere in Düngemitteln eingesetzt werden dürfen.

| Label / Standard | Scope | Verantwortliche Institution | Anforderungen an eingesetzte Kunststoffe | Anforderungen an die Entsorgung/ an das Recycling |
|----------------------|--|--|--|---|
| Rücknahmesystem ERDE | Rücknahme und Verwertung gebrauchter Kunststoffe aus der Landwirtschaft. Abgedeckte Fraktionen: 1: Flachsilofohlen, Unterziehföhlen, Siloschläuche; 2: Silagestretchfolien, Netzersatzfolien; 3: Rundballennetze | IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e. V. (in Kooperation mit RIGK) | Keine speziellen Anforderungen | Aktuell sammelt ERDE knapp 35 % der gebrauchten Silo- und Stretchfolien und führt diese zu 100 % der stofflichen Verwertung zu. 70 % werden in Deutschland, der Rest im EU-Ausland dem Recycling zugeführt |
| Bioland | Anbau landwirtschaftlicher Produkte; u. a. Anforderungen an Abdeckmaterialien | Bioland e. V. | Nur Abdeckmaterialien auf Basis von Polyolefinen (z. B. Polyethylen, Polypropylen) | Gebrauchte Folien müssen, wenn möglich dem Recycling zugeführt werden. Es ist verboten, Kunststoffe auf dem Feld zu verbrennen |
| Demeter | Anbau landwirtschaftlicher Produkte; u. a. Anforderungen an Abdeckmaterialien | Demeter e. V. | Mehrfach gebrauchsfähige oder verrottbare Materialien wie Baumwolle, Flachsmatten, Mulchpapier oder Folien aus nachwachsenden Rohstoffen sollen bevorzugt werden; Mulch- und Abdeckmaterialien aus PVC werden nicht verwendet | Nach der Verwendung müssen Mulch- und Abdeckmaterialien recycelt oder umweltgerecht entsorgt werden |
| Naturland | Anbau landwirtschaftlicher Produkte; u. a. Anforderungen an Abdeckmaterialien | Naturland e. V. | Abdeckmaterialien wie Abdeckfolien, Schutzvliese, Insektennetze und Silofolien dürfen nur dann eingesetzt werden, wenn es sich dabei um Erzeugnisse handelt, die auf der Basis von Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder Polycarbonaten hergestellt worden sind. Der Einsatz von Erzeugnissen aus Polyvinylchlorid (PVC) ist verboten | Nach Gebrauch sind Folien zu entfernen und dürfen nicht auf den Feldern verbrannt werden. Kunststofftöpfe, -schalen etc. müssen aus stabilen Materialien sein, die eine Mehrfachnutzung ermöglichen und recycelbar sind |

Tab. 55 Übersicht der relevanten Standards für Bahnware

12 Anhang IV: Biologische Abbaubarkeit

12.1 Nachweis der biologischen Abbaubarkeit

Zur Vermeidung potenziell negativer Wirkungen durch Kunststoffeinträge in Böden und Gewässer kann der Einsatz biologisch abbaubarer Polymere grundsätzlich einen Lösungsweg darstellen. Bezüglich des hierfür notwendigen Nachweises der biologischen Abbaubarkeit gibt es verschiedene Ansätze.

Biologisch abbaubare Polymere stellen für Mikroorganismen Nahrung dar. Da Polymere komplexe langkettige Moleküle sind, werden sie in mehreren Schritten stufenweise abgebaut. Ihr biologischer Abbau erfolgt somit unter dem Einfluss verschiedener Mikroorganismen, die in einem ersten Schritt durch ihre Enzyme Polymerketten in kleinere Moleküle spalten, welche anschließend von anderen Mikroorganismen meist innerhalb der Zellen weiter mineralisiert werden. Der erste Schritt, die Hydrolyse der stabilen Polymerketten, ist oftmals der limitierende Schritt im mehrstufigen Abbauprozess.⁴⁹⁴ Während der Stoffwechselforgänge werden die biologisch abbaubaren Polymere in der Endphase unter aeroben Bedingungen in Wasser, Kohlendioxid und Biomasse, unter anaeroben Bedingungen in Methan, Wasser und Biomasse umgewandelt. Da die Stoffwechselforgänge der aeroben Zersetzung einen höheren Energieertrag im Vergleich zur anaeroben Zersetzung erzielen, setzen sich aerobe Mikroorganismen in natürlichen Milieus, in denen Sauerstoff vorhanden ist, durch. Als anerkannte Messgröße für die biologische Abbaubarkeit unter aeroben Bedingungen, also in einem Milieu mit Sauerstoffzufuhr, wird die Produktion von Kohlendioxid als Endprodukt der vollständigen Mineralisierung herangezogen. Da im aeroben Milieu die CO₂-Produktion mit dem Sauerstoffverbrauch zusammenhängt, kann auch dieser in Testverfahren als Messgröße für den Abbau verwendet werden.

In Bezug auf den biologischen Abbau bedeutet vollständige Mineralisierung nicht 100 % Umwandlung des Kohlenstoffs in CO₂, da ein Teil des organischen Kohlenstoffs auch für das Wachstum der Mikroorganismen verwendet und in neue Biomasse umgesetzt wird.⁴⁹⁵ Der Anteil des Kohlenstoffs, der für die Biomasse assimiliert wird, liegt je nach Substrat zwischen 10 % und 40 % des gesamten Kohlenstoffs.⁴⁹⁶ Für den anaeroben Abbau gilt, dass nur etwa 10-20 % des Kohlenstoffs in mikrobielle Biomasse umgesetzt wird.⁴⁹⁷ Ein Abbaugrad von 90 % ist somit nur erreichbar, wenn auch ein Teil der neu gebildeten Biomasse wieder remineralisiert wird, was in der Regel erst erreicht wird, wenn die Nahrung zum Erhalt der Biomasse knapp wird. Aus diesem Grund wird als alternatives Bewertungskriterium zum absoluten Abbaugrad auch der Abbaugrad des Prüfmateriale im Verhältnis zum

⁴⁹⁴ Shah et al. (2008).

⁴⁹⁵ Atlas, Bartha und Atlas (1998).

⁴⁹⁶ Organic Waste Systems (27. Januar 2017).

⁴⁹⁷ Degli Innocenti (2019); Shah et al. (2008).

Abbaugrad einer Referenzprobe bewertet. Diese Referenzansätze mit einem gut abbaubaren Polymer werden parallel zum Prüfmateriale geführt und dienen einerseits zur Überprüfung der Aktivität des Testsystems, andererseits als Referenzwert. Hierbei muss ein Abbaugrad von mindestens 90 % in Bezug auf den maximalen Wert der Referenzsubstanz erreicht werden.

Die Labortests zur Prüfung der biologischen Abbaubarkeit werden unter optimalen Bedingungen (z. B. Temperatur, Nährstoffgehalt etc.) durchgeführt, es handelt sich also um beschleunigte Tests mit einer Abbau-Kinetik, die so in der natürlichen Umgebung nicht zu erwarten ist. Daher können aus den Labortests keine direkten Schlussfolgerungen zur Abbaukinetik unter realen Bedingungen gezogen werden.⁴⁹⁸ Die Bedingungen im Labor unterscheiden sich von denen in der Umwelt durch folgende Faktoren:⁴⁹⁹

- Mechanischer Einfluss: im Labor nicht vorhanden
- Physikalische Faktoren: im Labor konstant
- Nährstoffverfügbarkeit: Nährstoffzugabe beschleunigt den biologischen Abbau im Labor
- Vorhandenes mikrobielles Konsortium: auch bei Verwendung eines Inokulums aus der natürlichen Umwelt für die Labortests entwickeln sich die mikrobiellen Populationen unterschiedlich
- Dichte der mikrobiellen Population: Die Entwicklung ist in geschlossenen und offenen Systemen unterschiedlich

Für den anaeroben Abbau bestehen derzeit keine eigenen Prüfvorgaben. Es besteht in den Prüfprogrammen zur Kompostierbarkeit jedoch die optionale Forderung, bei einem anaeroben Abbau einen Abbaugrad von mindestens 50 % des theoretischen Wertes nach maximal zwei Monaten zu erreichen. Als Messparameter für die Mineralisierung unter anaeroben Bedingungen dient die Produktion von Methan und Kohlendioxid. Weitere Normen zur Prüfung der anaeroben Abbaubarkeit von Kunststoffen sind in Vorbereitung (Organic Waste Systems (OWS) 2017).

Zusätzlich zur Mineralisierung kann die Desintegration der Kunststoffe, also die Zersetzung unter Verlust der Sichtbarkeit über den Masseverlust des Kunststoffs bestimmt werden. Während die biologische Abbaubarkeit eines Materials unter kontrollierten Laborbedingungen ermittelt wird, in denen die Messparameter Kohlendioxid Produktion oder Sauerstoffverbrauch ermittelt werden können, erfolgt die Desintegrationsprüfung im halbtechnischen bis großtechnischen Maßstab unter realitätsnahen Bedingungen. Es ist zu berücksichtigen, dass der biologische Abbau nur an der Oberfläche von festen Kunststoffen stattfindet und daher die gemessene biologische Abbauraten eine scheinbare Rate ist, d. h. der Durchschnitt zwischen dem schnellen Abbau an der Oberfläche und dem Abbau im inneren Teil der Kunststoff-

⁴⁹⁸ Burgstaller et al. (2019).

⁴⁹⁹ Tosin et al. (October 2016).

partikel, welcher gleich Null ist. Studien haben gezeigt, dass die biologische Abbaurrate an der Oberfläche von biologisch abbaubaren Polymeren sehr schnell ist, vergleichbar mit leicht biologisch abbaubaren Chemikalien, wobei der begrenzende Faktor die verfügbare Oberfläche ist.⁵⁰⁰ Für die Desintegrationsprüfung bestehen daher Empfehlungen zur Art der Prüfstücke, welche in ihrer Form so eingesetzt werden sollen, wie sie für eine spätere Verwendung vorgesehen ist. Die Norm ISO 14855 enthält dabei Angaben zur vorgesehenen Größe der Prüfstücke (maximale Oberfläche 2 x 2 cm² oder Granulat, Pulver).

Da Abbaubarkeit und Abbaugeschwindigkeit von den unterschiedlichen Umweltbedingungen und beteiligten Mikroorganismen abhängen, wurden an die verschiedenen Lebensräume wie Kompost, Boden und wässrige Umgebung angepasste standardisierte Testmethoden entwickelt. Die gängigsten Normen und die entsprechenden Abbaukriterien sind in Tab. 56 gelistet.

⁵⁰⁰ Tosin, Pishedda und Degli-Innocenti (2019); Degli Innocenti (2019); Chinaglia, Tosin und Degli-Innocenti (2018).

| Verfahren | Norm/ Prüfverfahren | Anwendungsgebiet | Anforderungen |
|----------------------------------|---|--|---|
| Leichte biologische Abbaubarkeit | OECD TG 301 »Ready biodegradability« ⁵⁰² | In der Prüfrichtlinie werden sechs Methoden beschrieben, die das Testen von Chemikalien auf leichte biologische Abbaubarkeit in einem aeroben, wässrigen Medium ermöglichen. | Leichte biologische Abbaubarkeit: 70 % DOC-Entfernung (dissolved organic carbon) und 60 % des theoretischen Sauerstoffbedarfs (ThOD) – oder ThCO ₂ -Produktion für respirometrische Methoden in einem 10-Tage-Fenster innerhalb des 28-Tage-Zeitraums der Prüfung. |
| Inhärente Abbaubarkeit | OECD TG 302B »Zahn-Welens/EMPA Test« | Der Test dient zur Bestimmung der inhärenten biologischen Abbaubarkeit. | Ein Gemisch, das die nichtflüchtige und wasserlösliche Testsubstanz, Mineralstoffe und eine relativ große Menge Belebtschlamm in wässrigem Medium enthält, wird gerührt und bei 20-25°C im Dunkeln oder bei diffusem Licht bis zu 28 Tage lang belüftet. Der biologische Abbauprozess wird durch die Bestimmung des DOC, des gelösten organischen Kohlenstoffs, (oder des CSB, des chemischen Sauerstoffbedarfs) in gefilterten Proben überwacht, die in täglichen oder anderen Zeitabständen entnommen werden. Der Test gilt als gültig, wenn eine Entfernung der Referenzsubstanz um mindestens 70 % innerhalb von 14 Tagen erreicht wird und wenn der DOC (oder CSB) in der Prüfsuspension relativ allmählich über Tage oder Wochen entfernt wird. |
| Industriell kompostierbar | EN 13432 »Verpackung – Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau-Prüfschema und Bewertungskriterien für die | Prüfstandard für kompostierbare Biokunststoff-Verpackungen und deren Bestandteile, wie beispielsweise Farben, Kleber oder Etiketten. | Chemische Prüfung: Offenlegung aller Inhaltsstoffe, Grenzwerte für Schwermetalle Biologische Abbaubarkeit im wässrigen Medium (Sauerstoffbedarf und Entwicklung von CO ₂): Es ist nachzuweisen, dass mind. 90 % des organischen Materials absolut oder bezogen auf Referenzsubstrat innerhalb von 6 Monaten in CO ₂ umgewandelt werden (bei 58 ± 2 °C). |

Tab. 56 Normen zum Abbauverhalten biologisch abbaubarer Kunststoffe aus⁵⁰¹

⁵⁰¹ Burgstaller et al. (2019).

⁵⁰² Teil des ECHA Vorschlags zur Beschränkung von Mikroplastik.

| | |
|--|---|
| <p>Einstufung von Verpackungen« Und EN 14995 »Kunststoffe – Bewertung der Kompostierbarkeit«</p> | <p>Desintegration in Kompost: Nach 3 Monaten Kompostierung und anschließender Absiebung durch ein 2 mm Sieb dürfen nicht mehr als 10 % Rückstände bezogen auf die Originalmasse verbleiben. Praktische Prüfung der Kompostierbarkeit im Technikaßstab (oder einer Praxisanlage): es dürfen keine negativen Einwirkungen auf den Kompostierungsprozess erfolgen. Kompostanwendung: Untersuchung des Effekts von resultierenden Komposten auf das Pflanzenwachstum (Agronomischer Test), Ökotoxizitätstest</p> |
| <p>SPCR 141 »Certification rules for Classification for polymeric waste«</p> | <p>Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) Biologische Abbaubarkeit (Sauerstoffbedarf und Entwicklung von CO₂): Es ist nachzuweisen, dass mind. 90 % des organischen Materials absolut oder bezogen auf ein Referenzsubstrat innerhalb von 6 Monaten in CO₂ umgewandelt werden. Desintegration in Kompost: Nach 3 Monaten oder 6 Monaten (Industriell- oder Gartenkompostierung) Kompostierung und anschließender Absiebung durch ein 2 mm Sieb dürfen nicht mehr als 10 % Rückstände bezogen auf die Originalmasse verbleiben. Ökotoxizitätstest mit Pflanzen Funktionalität</p> |
| <p>AS 4736 ASTM D 6400 »Standard Specification for Compostable Plastics« ISO 14851:2019 »Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium — Method by</p> | |

| | | |
|----------------------|---|---|
| | measuring the oxygen demand in a closed respirometer« | |
| Garten-kompostierbar | AS 5810 Biodegradable plastics — Biodegradable plastics suitable for home composting | Chemische Prüfung: Offenlegung aller Inhaltsstoffe, Grenzwerte für Schwermetalle Biologische Abbaubarkeit (Sauerstoffbedarf und Entwicklung von CO ₂): Es ist nachzuweisen, dass mind. 90 % des organischen Materials absolut oder bezogen auf ein Referenzsubstrat innerhalb von 12 Monaten in CO ₂ umgewandelt werden (bei < 30 °C). |
| | NF T 51-800 Plastics — Specifications for plastics suitable for home composting | Desintegration in Bioabfall: Nach 6 Monaten Kompostierung und anschließender Absiebung durch ein 2 mm Sieb dürfen nicht mehr als 10 % Rückstände bezogen auf die Originalmasse verbleiben. Ökotoxizitätstest mit Pflanzen Regenwurmtest |
| Bioabbaubar in Böden | ISO 17556 »Plastics – Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in soil by measuring the oxygen demand in a respirometer or the amount of carbon dioxide evolved« | Biologische Abbaubarkeit (Sauerstoffbedarf und Entwicklung von CO ₂) |
| | EN 17033 »Biologisch abbaubare Mulchfolien für den Einsatz in Landwirtschaft und Gartenbau - Anforderungen und Prüfverfahren« | Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) Biologische Abbaubarkeit (Sauerstoffbedarf und Entwicklung von CO ₂): Es ist nachzuweisen, dass mind. 90 % des organischen Materials absolut oder bezogen auf das Referenzsubstrat innerhalb von 24 Monaten in CO ₂ umgewandelt werden (bei 20 - 28 °C (± 2°C); möglichst 25 °C). Keine Voraussetzungen für Desintegration Ökotoxizitätstest mit Pflanzen Einhaltung dimensionaler, mechanischer und optischer Eigenschaften |

| | | | |
|---------------------------|--|---|--|
| | DIN SPEC 1165 »Kunststoffe - Bioabbaubare Kunststoffe in oder auf Böden - Verwertung, Entsorgung und verwandte Umweltthemen« | | Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) Biologische Abbaubarkeit (Sauerstoffbedarf und Entwicklung von CO ₂): Es ist nachzuweisen, dass mind. 90 % des organischen Materials absolut oder bezogen auf das Referenzsubstrat innerhalb von max. 2 Jahren in CO ₂ umgewandelt werden (bei aquatischen Tests bei 25 ± 5 °C). Keine Voraussetzungen für Desintegration Ökotoxizitätstest mit Pflanzen |
| | ASTM D5988 - Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in Soil | | |
| Bioabbaubar in Meerwasser | ASTM D7081 »Standard Specification for Non-Floating Biodegradable Plastics in the Marine Environment« (zurückgezogen 2014 – Testmethoden jedoch noch in Anwendung) | | Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) Biologische Abbaubarkeit (Sauerstoffbedarf und Entwicklung von CO ₂): Es ist nachzuweisen, dass mind. 90 % des organischen Materials absolut oder bezogen auf das Referenzsubstrat innerhalb von 6 Monaten in CO ₂ umgewandelt werden. Desintegrations-Anforderungen unter TS-OK-15 Ökotoxizitätstest mit Pflanzen mit 3 Monaten Inkubation des Testmaterials vor Testdurchführung |
| | ASTM D6691-09 | Testmethode zur Bestimmung des biologischen Abbaus von Kunststoffmaterialien in der marinen Umwelt. | |
| Bioabbaubar in Süßwasser | EN 13432 und EN 14995 (adaptiert an Süßwasser) EN 14987 (wasserlösliche/-dispersierbare Kunststoffe) | | Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) Biologische Abbaubarkeit (Sauerstoffbedarf und Entwicklung von CO ₂): Es ist nachzuweisen, dass mind. 90 % des organischen Materials absolut oder bezogen auf das Referenzsubstrat innerhalb von 56 Tagen in CO ₂ umgewandelt werden (bei 20-25 °C). |

| | |
|-------------------------------|--|
| Entsorgbarkeit in Kläranlagen | DIN EN 14987 »Kunststoffe - Bewertung der Entsorgbarkeit in Kläranlagen - Prüfplan für Endabnahme und Spezifikationen« |
|-------------------------------|--|

12.2 Zersetzung von biologisch abbaubaren Kunststoffen unter realen Bedingungen

Eine Literaturrecherche von Burgstaller et al. (2018) zeigt anhand von Ergebnissen aus der Fachliteratur, dass der biologische Abbaustark von den Umgebungsbedingungen abhängt.⁵⁰³

| Polymer | Unter Bedingungen der »industriellen Kompostierbarkeit« ⁵⁰⁴ | Biologisch abbaubar im Boden ⁵⁰⁵ | Biologisch abbaubar in Süßwasser ⁵⁰⁶ | Biologisch abbaubar in Meerwasser ⁵⁰⁷ |
|---|--|---|---|--|
| Polyhydroxyalkanoate (PHA) | ca. 4-6 Wochen | ca. 7-12 Monate | <56 Tage | <6 Monate |
| Polycaprolactone (PCL) | ca. 4-6 Wochen | ca. 7-12 Monate | <56 Tage | <6 Monate |
| Thermoplastic starch (TPS) | ca. 4-6 Wochen | ca. 7-12 Monate | <56 Tage | <6 Monate |
| Polybutylene succinate (PBS) | ca. 21 Wochen | ca. 4-7 Monate | ca. 3 Monate | <6 Monate |
| Polybutylene succinate copolymer (PBSA) | - | - | ca. 3 Monate | - |
| Polybutylene succinate copolymer (PBST) | ca. 6-9 Wochen | ca. 7-12 Monate | - | - |
| Polybutyrate adipate terephthalate (PBAT) | ca. 6-9 Wochen | ca. 7-12 Monate | >1,5 Jahre | >1,5 Jahre |
| Polylactic acid oder polylactide (PLA) | ca. 6-9 Wochen | kein Abbau nach 1 Jahr | >1,5 Jahre | >1,5 Jahre |

Tab. 57 Ergebnisse des biologischen Abbaus in unterschiedlichen Umweltmilieus⁵⁰³

Der Abgleich mit den Anforderungen der einschlägigen Standards zur biologischen Abbaubarkeit Tab. 56 lässt erkennen, dass die Polymere PHA, PCL, TPS und PBS die zeitlichen Vorgaben für den Abbau durchweg einhalten.

Unter Bedingungen der »industriellen Kompostierbarkeit« sieht EN 13432 einen vollständigen Abbau innerhalb von maximal 6 Monaten bei 58 ± 2 °C vor – ein Zeitraum, welcher für alle getesteten Kunststoffarten erreicht wird. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass in industriellen Kompostierungsanlagen zwischen der Phase der Intensivrotte bei 60-80 °C über zwei Wochen und der anschließenden Nachrotte unterschieden wird, welche mehrere Wochen bis Monate (8-10 Wochen) dauern kann und während derer der Kompost auf Umgebungstemperatur abkühlt. Der gesamte Kompostierungsprozess dauert zwischen 3 und 6 Monaten. Der Standard für den Abbau in einer »industrielle[n] Kompostierung«, für den Zeitraum von 6 Monaten bei Höchsttemperatur des Prozesses von ca. 60 °C entspricht folglich nicht den realen Bedingungen in der Abfallbehandlung. Die Anforderungen zur biologischen Abbaubarkeit in Böden (Abbau innerhalb von maximal 2 Jahren bei 20-28 °C), wie sie in ISO 17556 festgelegt sind, werden durch alle Kunststoffe

⁵⁰³ Burgstaller et al. (Juli 2018).

⁵⁰⁴ Biologisch abbaubar bei 58 ± 2 °C, max. 6 Monate

⁵⁰⁵ Biologisch abbaubar bei 20-28 °C, max. 2 Jahre

⁵⁰⁶ Biologisch abbaubar bei 20-25 °C, max. 56 Tage

⁵⁰⁷ Biologisch abbaubar bei 30 °C, max. 6 Monate

eingehalten mit Ausnahme von PLA, für welchen die Ergebnisse aus der Literatur nicht eindeutig sind. Bei den Bedingungen für den Abbau im Süßwasser (Abbau innerhalb von maximal 56 Tagen bei 20-25 °C) und in Salzwasser (Abbau innerhalb von maximal 6 Monaten bei 30 °C) aus EN 13432 und EN 14995 erreichen alle Kunststoffe mit Ausnahme von PBAT und PLA einen ausreichenden Abbaugrad innerhalb der vorgegebenen Zeiträume.

Im Folgenden wird der Abbau unterschiedlicher Polymere in den verschiedenen Umweltmilieus Boden, Süßwasser und Meer genauer betrachtet.

12.2.1 Zersetzung im Boden

Die Untersuchungen zur Abbaubarkeit unterschiedlicher Polymere unter industriellen Kompostierungsbedingungen, zeigen einen signifikanten Abbau der Polymere PHA, PCL, TPS und PBS nach bis zu sechs Wochen. Am schnellsten abgebaut wird hierbei TPS und PHA (ca. 30-45 Tage) PLA und PBAT/PBST haben etwas längere Abbauezeiten (60-80 Tage) und PBS benötigt aufgrund seiner kristallinen Struktur bis zu 160 Tage, um einen vollständigen Abbau unter industriellen Kompostierungsbedingungen zu erreichen.⁵⁰⁸

Unter Bedingungen einer »Heimkompostierung« bei Temperaturen von maximal 30 °C kann bei Kunststoffen aus PLA hingegen kaum ein biologischer Abbau beobachtet werden, da der erforderliche erste Abbauschritt der Hydrolyse des Polymers höhere Temperaturen erfordert, welche in nicht industriellen Kompostierungsumgebungen und beim Abbau im Boden unter natürlichen Bedingungen nicht erreicht werden. Auch für andere Polymere verlangsamt sich der biologische Abbau im Boden verglichen mit der industriellen Kompostierung um ein Vielfaches. Für die Polymere PHA, PCL, TPS, PBST und PBAT wurde in Versuchen in Böden bei 20-28 °C erst nach sechs bis sieben Monaten ein vollständiger Abbau erreicht, für PBSe-Film wurde im Rahmen des »Open-Bio Projekts« in zwei parallelen Prüflaboren ein Abbau innerhalb von 4 bzw. 7 Monaten festgestellt.⁵⁰⁹

Neben den Abbauversuchen in Laboren wurden auch zahlreiche Feldversuche zur Zersetzung biologisch abbaubarer Kunststoffe in Böden durchgeführt. Bei Feldversuchen in Frankreich wurde nach 24 Monaten eine vollständige Zersetzung der Proben von PHB, PCL, PCL/TPS und Zellophan an allen Standorten (Schluff mit viel Organik, Schluff mit Sand, Sandboden und Schluff mit Sand und Ton) bei Bodentemperaturen von 10,6-14,5 °C festgestellt. Die Zersetzung von PLA hingegen war, ähnlich wie im Laborversuch, im Feldversuch gering und schwankte stark in Abhängigkeit von der Schichtdicke.⁵¹⁰ Bei Versuchen mit PLA-Filmproben (Dicke 20-400 µm) und -Fasern in mediterranen Böden Griechenlands konnte anhand einer optischen

⁵⁰⁸ Weng, Wang und Wang (2011); Degli Innocenti, Tosin und Bastioli (1998); Du et al. (2008); Ahn et al. (2011); Kale et al. (2007); Yousefzadeh Tabasi und Ajji (2015).

⁵⁰⁹ Altaee et al. (2016); Adhikari et al. (2016); Gómez und Michel (2013); Arcos-Hernandez et al. (2012); Zumstein et al. (2018).

⁵¹⁰ Calmon et al. (1999).

Beurteilung und Bestimmung der Dissimilation ebenfalls nur geringe Zersetzungsgrade für die Filmproben und keine Zersetzung für die Faserproben festgestellt werden.⁵¹¹ Auch in China wurde die Zersetzung von PBAT, PLA und PBAT/PLA-Mischungen in Böden über einen Zeitraum von vier Monaten getestet, wobei im Gegensatz zu den Feldversuchen in Frankreich und Griechenland hier ein fast vollständiger Abbau des PLA Films und vollständiger Abbau des PBAT Films beobachtet werden konnte, was möglicherweise auf die künstliche Bewässerung des Bodens oder die Zerkleinerung der Folie (5 cm x 10 cm Stücke) zurückzuführen ist.⁵¹² Bei Versuchen mit PBS in Japan wurde in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Feuchtigkeit ein Zersetzungsgrad von < 10 % nach 12 Monaten bis zu > 90 % nach 10 Monaten festgestellt.⁵¹³

Aus den Feldversuchen kann geschlussfolgert werden, dass der Grad des Abbaus im natürlichen Bodenmilieu stark von der Bodentemperatur und der Feuchtigkeit abhängt. Zudem wurde bei Versuchen mit unterschiedlichen Schichtdicken festgestellt, dass sich der Zersetzungsgrad mit abnehmender Schichtdicke vergrößert. Im Vergleich mit den Versuchen zur biologischen Abbaubarkeit im Labormaßstab wurden im Feldversuch längere Zeiträume bis zur vollständigen Zersetzung beobachtet. Stärke-basierte Polymere, PHA, PCL, PBAT, PBS und PBSA sind im Boden, bei guten Bedingungen, nach etwa 12 Monaten vollständig zersetzt. Die gemessenen Zersetzungsgrade und Zeiträume bis zur vollständigen Zersetzung von PLA variieren hingegen stark zwischen den einzelnen Feldversuchen von nicht zersetzt (was sich mit den Versuchen im Labor bei Raumtemperatur deckt) bis hin zu vollständig zersetzt innerhalb von vier Monaten.

12.2.2 Zersetzung in Süßwasser und Salzwasser

Die Tests zur Zersetzung von biologisch abbaubaren Polymeren in Süßwasser, welche im Labormaßstab durchgeführt wurden, zeigen eine gute Abbaubarkeit thermoplastischer Stärke und der Polymere PHA und PC. Die Zersetzung von PBS dauerte etwa drei Monate, die des Co-Polymers PBSA verläuft etwas schneller. Im Meerwassermilieu sind, ähnlich wie im Süßwasser, stärkebasierte Werkstoffe und die Polymere PHA und PCL gut abbaubar und im besten Fall bereits nach 28 Tagen vollständig abgebaut. Bis auf PLA und die Polyester PBS, PBAT, welche nur langsam abgebaut werden, zeigen Kunststoffe eine bessere Abbaubarkeit im wässrigen Milieu als im Boden.

Die biologische Abbaubarkeit im wässrigen Milieu wurde auch im Rahmen des Open-Bio Projektes in einem Ringversuch mit verschiedenen Laboratorien getestet, welcher von November 2013 bis Oktober 2016 stattfand. Untersucht wurde hier die Abbaubarkeit der Polymere PHB, PBSe, PBSeT und LDPE im Frischwasser und Salzwasser-Milieu⁵¹⁴. Es wurden hierzu zwei Methoden entwickelt: (1) Biobasierte ProdukteÖ Bestimmung des aeroben biologischen Abbaus von biobasierten Pro-

⁵¹¹ Rudnik und Briassoulis (2011).

⁵¹² Weng et al. (2013).

⁵¹³ Yamamoto-Tamura et al. (2015).

⁵¹⁴ Wilde et al. (October 2016).

dukten in einer wässrigen Lösung - Prüfmethode auf der Grundlage des O₂-Verbrauchs, das auf OECD 301F, ISO 9408, ISO 14851, EN 14048 und ASTM D6731 basiert, und (2) Biobasierte Produkte - Bestimmung des aeroben biologischen Abbaus von biobasierten Produkten in einer wässrigen Lösung - Prüfmethode basierend auf der CO₂-Produktion, die auf OECD 301B, ISO 9439, ISO 14852, EN 14047, ASTM D5864 und ASTM D6139 basiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen zwischen den Laboratorien waren vergleichbar und zeigten im Süßwasser- wie auch im Salzwasser-Milieu eine abnehmende Abbaubarkeit in folgender Reihenfolge: Cellulose > PHB > PBSe > PBSeT > LDPE (kein Abbau).⁵¹⁴ Nur bei PBSeT wurde festgestellt, dass sich das biologische Abbauverhalten zwischen den Laboren und sogar zwischen verschiedenen Wiederholungen im selben Labor unterscheidet. Dies wurde auch bei den Tests zum biologischen Abbau im marinen pelagischen Lebensraums beobachtet, aber nicht bei der Prüfung der biologischen Abbaubarkeit im Boden. Dieses Polymer benötigt vermutlich ein spezielles Bakterienkonsortium um den biologischen Abbau zu ermöglichen.

Zusätzlich zu Überprüfungen der biologischen Abbaubarkeit im Labor liefern Experimente in realen Süßwasser- und Salzwasser-Milieus wichtige Erkenntnisse zum Abbauverhalten biologisch abbaubarer Kunststoffe. In Versuchen mit PHA (Flaschen, Film mit 17 µm Dicke) in der Schweiz wurde das Abbauverhalten im Luganer See untersucht.⁵¹⁵ Innerhalb des Versuchszeitraums von 254 Tagen wurden die PHA-Filmproben vollständig zersetzt, sowohl im anoxischen Bereich auf ca. 40 m Wassertiefe bei 6 °C als auch im aeroben Bereich an der Oberfläche des Sees bei 20 °C. Die Zersetzung der PHA-Flaschen hingegen verlief langsamer und erreichte lediglich einen Abbaugrad von ca. 10 % nach Ablauf der 257 Tage in 85 m Tiefe und von ca. 16 % nach 260 Tagen in 20 m Tiefe. Weitere Tests mit PHBHV-Filmproben in einem Belebungsbecken bei 12-22 °C in den USA⁵¹⁶ sowie in einem Stausee in Russland bei 10-25 °C⁵¹⁷ gelangten zu Abbauraten von ca. 50 % Abbau nach fünf Monaten im Belebungsbecken beziehungsweise nach 17-66 Tagen im Stausee. Bei Versuchen in tropischen Salzwasser-Milieus im Meer von Vietnam mit Temperaturen von 27-30 °C konnte für PHB und PHBHV-Filmproben (100 µm Filmdicke) ein ähnliches Abbauverhalten wie in einem Süßwasser Stausee festgestellt werden mit einem Abbau von 54-58 % nach fünf Monaten (160 Tagen). Die Wassertemperatur hatte bei allen Versuchen großen Einfluss auf die Abbaugeschwindigkeit der Proben.

Der Zeitraum für einen vollständigen biologischen Abbau im realen wässrigen Milieu ist für die getesteten PHA-Polymere folglich länger als bei den entsprechenden Labor-Prüfungen zur biologischen Abbaubarkeit. Entscheidende Parameter für den Abbau unter realen Bedingungen ist die Temperatur und die Sauerstoffzufuhr, welche beide mit der Gewässertiefe abnehmen. Während unter Laborbedingungen ein vollständiger Abbau von PHA bereits nach vier Wochen erzielt wird, ist ein vollständiger Abbau in realen wässrigen Milieus erst nach mehreren Monaten erreicht.

12.2.3 Ökologische Bewertung der Kompostierung von Kunststoffen

⁵¹⁵ Brandl und Püchner (1992).

⁵¹⁶ Gilmore et al. (1993).

⁵¹⁷ Volova et al. (2015).

Die Behandlung von biologisch abbaubaren Kunststoffen in Kompostierungsanlagen ist laut der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. von Anlagenbetreibern nicht gewünscht, da sie zu Problemen in den Anlagen führt. Unvollständig abgebaute Kunststoffe, welche nach der Kompostierungszeit im Kompostgut verbleiben, verringern die Qualität des Komposts und werden von der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. wie auch vom Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft (BDE) und der Bundesvereinigung der Humus- und Erdenwirtschaft e. V. (BHE) als Störstoffe im Kompostgut angesehen. Da nicht für jeden Prozess und nicht für jede Art des biologisch abbaubaren Kunststoffes gewährleistet werden kann, dass innerhalb der regulären Kompostierungszeit von 3 bis 6 Wochen ein vollständiger Abbau erreicht wird, lehnen die Verbände die Entsorgung von biologisch abbaubaren Kunststoffen über die Biotonne gänzlich ab.

Des Weiteren, werden biologisch abbaubare Kunststoffe, welche mit der Biotonne entsorgt wurden, aufgrund der einzuhaltenden Anforderungen an den Störstoffgehalt im fertigen Kompostgut und da sie nicht als abbaubar erkannt werden, oftmals bereits vor der Kompostierung aussortiert, um einer thermischen Verwertung zugeführt zu werden. Dasselbe Schicksal erwartet biologisch abbaubare Kunststoffe, die über die Gelbe Tonne entsorgt werden, da ein Recycling derzeit aufgrund unwirtschaftlich kleiner Mengenströme und/oder eingeschränkter Recyclingfähigkeit faktisch nicht wirtschaftlich möglich ist. Nichtsdestotrotz ist hier eine differenzierte Sichtweise notwendig. Bis zu einer gewissen Grenze sind Biokunststoffe für das Recycling unproblematisch und ein langfristiger Pfadwechsel von fossilen zu nachwachsenden Rohstoffen erfordert auch ein Recycling der Biokunststoffe.⁵¹⁸

Werden die biologisch abbaubaren Kunststoffe nicht bereits im Vorfeld der Kompostierung aussortiert, so gelangen sie in die Kompostierung, wo sie durch Mikroorganismen zu Kohlenstoffdioxid und Wasser abgebaut werden. Dieser Abbau generiert jedoch weder Humus noch pflanzenverfügbare Nährstoffe, welche einen Beitrag zur Verbesserung der Kompostqualität leisten würden. Die Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffe über die Kompostierung trägt somit nicht zur stofflichen Nutzung des Kohlenstoffs bei. Als Alternative bietet sich daher die thermische Verwertung an. Hier besteht bei Biokunststoffen, die aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt sind, der Vorteil, dass im Vergleich zu Kunststoffen aus fossilen Ressourcen kein Kohlendioxid aus nicht erneuerbaren Quellen freigesetzt wird.

Biologisch abbaubare Bioabfall-Beutel haben allerdings das Potenzial die Sammelbereitschaft deutlich zu erhöhen. Allerdings können diese Vorteile nur dann aktiviert werden, wenn eine Verwechslung mit nicht abbaubaren Beuteln ausgeschlossen ist und die Beutel in den heutigen Kompostieranlagen vollständig abgebaut werden.

12.3 Oxo-abbaubare bzw. oxo-fragmentierbare Kunststoffe

⁵¹⁸ <https://biowerkstoffe.fnr.de/fileadmin/baw/pdf/positionspapier-recycling-von-biokunststoffen.pdf>; Letzter Zugriff: 29.03.,.2020

Oxo-biologisch abbaubare Kunststoffe sind auf Erdölbasis produzierte Kunststoffe mit chemischen Additiven, die den Abbau des Kunststoffs beschleunigen sollen. Diese oxo-Additive führen dazu, dass die Kunststoffe unter Einfluss von UV-Licht, Hitze oder Feuchtigkeit zerfallen. Sie verwandeln sich in kleine Plastikfragmente (Mikroplastik), die sich in der Umwelt verteilen. In diesem Zusammenhang sollte man daher besser von oxo-Fragmentierung sprechen. Eine den standardisierten Normen entsprechende biologische Abbaubarkeit der Fragmente wurde bisher nicht belegt. Das Europäische Parlament hat 2014 im Rahmen der Entschließung zur Änderung der bestehenden Verpackungs-Richtlinie dazu aufgerufen, auf oxo-biologisch-abbaubare Kunststoffe für Verpackungen gänzlich zu verzichten. In Artikel 5 der Single-Use-Plastic-Directive (SUPD) wurde jetzt der Einsatz von oxo-abbaubaren Kunststoffen für Einweganwendungen verboten.⁵¹⁹

⁵¹⁹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0904&from=EN>

13 Einbindung von Expertenmeinungen

Vorstellung und kritische Diskussion der Zwischenergebnisse im Rahmen eines Fachgesprächs »(MIKRO)PLASTIK IN BÖDEN« bei der NABU Bundesgeschäftsstelle, Berlin am Freitag, 14. Februar 2020, 11-14 Uhr

| NAME | ORGANISATION |
|-----------------------------|--|
| Isabelle Lampe | GKL - Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau |
| Günter Bornschein | GKL - Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau |
| Johanna Preuß | Bundesverband Agrarhandel |
| Jenny Richter | Bundesverband Agrarhandel |
| Dr. Michael Reiningger | Deutscher Raiffeisenverband e. V. |
| Dr. Jürgen Bruder | Initiative ERDE; RIGK; Industrievereinigung Kunststoffverpackungen |
| Michael Hillenbrand | PlasticsEurope |
| Steffen Pinggen | Deutscher Bauernverband |
| Ralf Bertling | Fraunhofer UMSICHT |
| Jürgen Bertling | Fraunhofer UMSICHT |
| Dr. Till Zimmermann | Ökopol |
| Indra Enterlein | NABU Bundesverband |
| Katharina Istel | NABU Bundesverband |
| Dr. Michael Jedelhauser | NABU Bundesverband |
| Dr. Verena Riedl | NABU Bundesverband |
| Dr. Christine Tölle-Nolting | NABU Bundesverband |

Tab. 58 Teilnehmende Fachgespräch

Expertenrunde zu Kunststoffemissionen durch Folieneinsatz in der Landwirtschaft im Rahmen der Fördermaßnahme »Plastik in der Umwelt« des BMBF; 18. August 2020

| NAME | ORGANISATION |
|------------------|-------------------|
| Dr. Elke Brandes | Thünen-Institut |
| Frederick Büks | TU Berlin |
| Raphael Rehm | |
| Hannes Schritt | Ecologic-Institut |

Tab. 59 Teilnehmende Expertenrunde im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme »Plastik in der Umwelt«

Es wurden zahlreiche Telefonate oder Emailkorrespondenz mit externen Experten statt, um in bestimmten Aspekten, die Ergebnisse der Studie zu diskutieren und ggf. anzupassen.

| NAME | ORGANISATION |
|-----------------------|--|
| Alexander Weis | Gebr. Brill Substrate GmbH & Co. KG |
| Matthias Lesch | Pöppelmann Holding GmbH & Co. KG |
| Andreas Reisinger | REMA Kunststoffteile GmbH & Co.KG |
| Elke Müller | KME-AGROMAX GmbH |
| Ulrike Wegener | Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzen e. V. |
| Dr. Arne B. Hückstädt | Industrieverband Garten (IVG) e. V. |
| Christoph Lindner | Conversio |
| Heinrich Beltz | Landwirtschaftskammer Niedersachsen |
| Jens Noordhof | Chefredakteur Lohnunternehmen |
| Jürgen Bruder | ERDE Recycling |
| Hr. Eilers | LUFÄ Nord |
| C. Riedl | Evonik Industries |
| Hr. Kiesling | ICL Polymers |
| Axel Steer | Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit |
| Jörg Albertsen | Hego Biotec |
| Luise Engelke | Landwirtschaftskammer Niedersachsen |
| Frank Berkenbusch | PWL Anlagentechnik |

Tab. 60 Im
Rahmen der Studie
telefonisch oder
via Email konsultierte
Experten

14 Literatur

- ACCINELLI, C., H.K. ABBAS, W.T. SHIER, A. VICARI, N.S. LITTLE, M.R. ALOISE und S. GIACOMINI, 2019. Degradation of microplastic seed film-coating fragments in soil. *Chemosphere*, **226**, 645-650. ISSN 00456535.
- ADHIKARI, D., M. MUKAI, K. KUBOTA, T. KAI, N. KANEKO, K.S. ARAKI und M. KUBO, 2016. Degradation of Bioplastics in Soil and Their Degradation Effects on Environmental Microorganisms [online]. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, **05**(01), 23-34. ISSN 2325-7458 [Zugriff am: 9. Dezember 2019]. Verfügbar unter: doi:10.4236/jacen.2016.51003
- AHN, H.K., M.S. HUDA, M.C. SMITH, W. MULBRY, W.F. SCHMIDT und J.B. REEVES, 2011. Biodegradability of injection molded bioplastic pots containing polylactic acid and poultry feather fiber [online]. *Bioresource technology*, **102**(7), 4930-4933. Bioresource technology. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.biortech.2011.01.042
- ALTAEI, N., G.A. EL-HITI, A. FAHDIL, K. SUDESH und E. YOUSIF, 2016. Biodegradation of different formulations of polyhydroxybutyrate films in soil [online]. *SpringerPlus*, **5**(1), 762. ISSN 2193-1801. Verfügbar unter: doi:10.1186/s40064-016-2480-2
- AMEC FORSTER WHEELER ENVIRONMENT & INFRASTRUCTURE UK LIMITED, 2017. *Intentionally added microplastics in products. Final Report*.
- ANBUMANI, S. und P. KAKKAR, 2018. Ecotoxicological effects of microplastics on biota: a review [online]. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**(15), 14373-14396. ISSN 1614-7499 [Zugriff am: 19. August 2020]. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11356-018-1999-x
- ANDREAS RÜSCH, 2017. *Bewässerung im Kartoffelbau*.
- ARCOS-HERNANDEZ, M.V., B. LAYCOCK, S. PRATT, B.C. DONOSE, M.A.L. NIKOLIĆ, P. LUCKMAN, A. WERKER und P.A. LANT, 2012. Biodegradation in a soil environment of activated sludge derived polyhydroxyalkanoate (PHBV) [online]. *Polymer Degradation and Stability*, **97**(11), 2301-2312. ISSN 01413910. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.polyimdegstab.2012.07.035
- ASK CHEMICALS, 2020. *Langzeitdünger* [online] [Zugriff am: 8. Januar 2020]. Verfügbar unter: <https://specialties.ask-chemicals.com/de/duengemittel>
- ATLAS, R.M., R. BARTHA und D. ATLAS, 1998. *Microbial Ecology: Fundamentals and Applications* [online]: Benjamin/Cummings. Benjamin Cummings series in the life sciences. ISBN 9780805306552. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=jXsXAQAIAAJ>
- BAHADIR, M. und R. PFISTER, 1990. Controlled Release: Möglichkeiten zum wenig belastenden Pflanzenschutzmittel-Einsatz. *Nachrichtenblatt Deut. Pflanzenschutzd.*, **42**(12), 179-187. Nachrichtenblatt Deut. Pflanzenschutzd.

BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WEINBAU UND GARTENBAU, Hg., 2019. *Folieneinsatz im Gemüse- und Obstbau sowie in sonstigen gärtnerischen Kulturen* [online].

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2015. *Straßenkehrriecht*.

BERTLING ET AL., 2021. *Kompendium zu Kunststoffen in der Umwelt*.

BERTLING, J., L. HAMANN und M. HIEBEL, 2018. *Mikroplastik und synthetische Polymere in Kosmetikprodukten sowie Wasch-, Putz- und Reinigungsmitteln* [online]. Fraunhofer UMSICHT. Oberhausen [Zugriff am: 30. August 2019]. Verfügbar unter: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2018/umsicht-studie-mikroplastik-in-kosmetik.pdf>

BERTLING, J., L. HAMANN und R. BERTLING, 2018. *Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen*.

BERTLING, J., R. BERTLING und L. HAMANN, 2018. *Plastics in the environment: micro- and macroplastic. Reasons, quantities, environmental fates, effects, possible solutions, recommendations* [online]. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT [Zugriff am: 20. Dezember 2018]. Verfügbar unter: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2018/kunststoffe-id-umwelt-konsortialstudie-mikroplastik.pdf>

BEYER, H.-J. und G. WINTER, 2016. *Ausmaß, Qualität und Implikationen von Littering und sonstigen Abfallablagerungen in der freien Landschaft im Großherzogtum Luxemburg*. Eco Conseil.

BKV GMBH, 2018. *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017* [online]. Kurzfassung [Zugriff am: 27. August 2019]. Verfügbar unter: https://www.bkv-gmbh.de/fileadmin/documents/Studien/Kurzfassung_Stoffstrombild_2017_190918.pdf

BKV GMBH, Hg., 2017. *Vom Land ins Meer. Modell zur Erfassung landbasierter Kunststoffabfälle* [online].

BKV GMBH, Hg., 2020. *Potenzial zur Verwendung von Recycling-Kunststoffen in der deutschen Produktion von Kunststoffverpackungen* [online].

BOOTS, B., C.W. RUSSELL und D.S. GREEN, 2019. *Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground* [online]. *Environmental science & technology*, **53**(19), 11496-11506. ISSN 1520-5851. Verfügbar unter: doi:10.1021/acs.est.9b03304

BRANDL, H. und P. PÜCHNER, 1992. *Biodegradation of plastic bottles made from ?Biopol? in an aquatic ecosystem under in situ conditions* [online]. *Biodegradation*, **2**(4), 237-243. ISSN 1572-9729. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF00114555

BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL, Hg., 2019. *Konzept für eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung von verpackten Lebensmittelabfällen* [online]. Verfügbar unter: https://www.laga-online.de/documents/laga_konzept_verpackte-lebensmittelabfaelle_20190618_umk-uml35-2019_vollzugshilfe-bioabfall_1574075804.pdf

BUNDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT, Hg., 2020. *Absatz an Pflanzenschutzmitteln in der Bundesrepublik Deutschland. Ergebnisse der Meldungen gemäß §64 Pflanzenschutzgesetz für das Jahr 2018* [online]. korrigierte Version. Verfügbar unter: https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/meld_par_64_2018.pdf?__blob=publication-file&v=2

BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST E. V., 2008. Gefahr der Übertragung des Feuerbrandes durch Verwendung von Grünguthäcksel [online]. *H&K aktuell*, (1), 45. H&K aktuell. Verfügbar unter: https://www.kompost.de/fileadmin/news_import/Gefahr_der_Uebertragung_des_Feuerbrandes.pdf

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, 2017. *Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung)*. *BioAbfV* [online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bioabfv/>

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, 2019. *Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung)*. *DüMV* [online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/___3.html

BURGSTALLER, M., A. POTRYKUS, J. WEIßENBACHER, S. KABASCI, U. MERRETTIG-BRUNS und B. SAYDER, Juli 2018. *Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe*. Dessau.

BURGSTALLER, M., U. MERRETTIG-BRUNS, S. KABASCI, A. POTRYKUS und J. WEIßENBACHER, 2019. *Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe*. 01/2019. BiPRO GmbH; Fraunhofer UMSICHT Oberhausen. Texte. 57.

CALMON, A., S. GUILLAUME, V. BELLON MAUREL, P. FEUILLOLEY und F. SILVESTRE, 1999. Evaluation of Material Biodegradability in Real Conditions—Development of a Burial Test and an Analysis Methodology Based on Numerical Vision [online]. *Journal of Polymers and the Environment*, **7**, 157-166. Journal of Polymers and the Environment. Verfügbar unter: doi:10.1023/A:1022849706383

CHINAGLIA, S., M. TOSIN und F. DEGLI-INNOCENTI, 2018. Biodegradation rate of biodegradable plastics at molecular level [online]. *Polymer Degradation and Stability*, **147**, 237-244. ISSN 01413910. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2017.12.011

CONSULTIC MARKETING & INDUSTRIEBERATUNG GMBH, Hg., 2014. *Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2013* [online].

CONSULTIC MARKETING & INDUSTRIEBERATUNG GMBH, Hg., 2016. *Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015* [online]. Kurzfassung.

CONVERSIO, Hg., 2018. *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017* [online]. Verfügbar unter: <https://www.plasticseurope.org/de/resources/publications/543-kurzfassung-studie-stoffstrombild-kunststoffe-deutschland-2017>

CONVERSIO, Hg., 2020a. *Global Plastics Flow 2018* [online].

- CONVERSIO, Hg., 2020b. *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019* [online].
- CORRADINI, F., P. MEZA, R. EGUILUZ, F. CASADO, E. HUERTA-LWANGA und V. GEISEN, 2019. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal [online]. *The Science of the total environment*, **671**, 411-420. ISSN 1879-1026. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.368
- DEGLI INNOCENTI, F., 2019. Biodegradability: the principles behind the standards [online]. *Acta Horticulturae*, 51-56. Acta Horticulturae. Verfügbar unter: doi:10.17660/ActaHortic.2019.1252.7
- DEGLI INNOCENTI, F., M. TOSIN und C. BASTIOLI, 1998. Evaluation of the Biodegradation of Starch and Cellulose Under Controlled Composting Conditions [online]. *Journal of Polymers and the Environment*, **6**, 197-202. Journal of Polymers and the Environment. Verfügbar unter: doi:10.1023/A:1021825715232
- DING, L., S. ZHANG, X. WANG, X. YANG, C. ZHANG, Y. QI und X. GUO, 2020. The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in north-western China [online]. *The Science of the total environment*, **720**, 137525. ISSN 1879-1026. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137525
- DOW, Hg., Februar 2005. *Marktbericht Ballensilage Deutschland. Eine Umfrage über aktuelle Praktiken und Trends und Entwicklungsmöglichkeiten* [online].
- DU, Y.-L., Y. CAO, F. LU, F. LI, Y. CAO, X.-L. WANG und Y.-Z. WANG, 2008. Biodegradation behaviors of thermoplastic starch (TPS) and thermoplastic dialdehyde starch (TPDAS) under controlled composting conditions [online]. *Polymer Testing*, **27**, 924-930. ISSN 01429418. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.polymertesting.2008.08.002
- DUIS, K. und A. COORS, 2016. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects [online]. *Environmental Sciences Europe*, **28**(1). ISSN 2190-4707. Verfügbar unter: doi:10.1186/s12302-015-0069-y
- DWA, 2012. *DWA-Stellungnahme zur bestehenden Regelung der Düngemittelverordnung vom 05. 12. 2012 hinsichtlich des Einsatzes synthetischer Polymere bei der Klärschlammverwertung* [online].
- DWA, 2015. Positionen zur Klärschlamm Entsorgung.
- ECHA, 2019. *Intentionally added microplastics* [online]. *ANNEX XV Restriction Report*. Version 1.2. 22. August 2019 [Zugriff am: 8. Januar 2020]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/05bd96e3-b969-0a7c-c6d0-441182893720>
- EERKES-MEDRANO, D., R.C. THOMPSON und D.C. ALDRIDGE, 2015. Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs [online]. *Water Research*, **75**, 63-82. ISSN 00431354. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.watres.2015.02.012
- EU-KOMMISSION und EU-PARLAMENT, 8. Mai 2019. *Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009*

und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 [online] [Zugriff am: 19. September 2019]. Verfügbar unter: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-76-2018-INIT/de/pdf>

EUROPEAN CHEMICALS AGENCY, Hg., 22. August 2019. *Intentionally added microplastics. Annex to Annex XV Restriction Report* [online]. Helsinki, Finland. Version 1.2. Verfügbar unter: https://echa.europa.eu/documents/10162/13641/rest_microplastics_axvreport_annex_en.pdf/01741d07-f06b-bf32-8d6f-d6a8de54c4d0

Faustzahlen für die Landwirtschaft, 2018. 15. Auflage. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). ISBN 3945088593.

FEHRADVICE & PARTNERS AG, Hg., 2014. *Littering in der Schweiz. Studie zur Wirksamkeit von Maßnahmen unter Berücksichtigen verhaltensökonomischer Erkenntnisse* [online].

FINNISON, A., 2021. *Présentation PowerPoint. Microplastic Capture: Microplastic Sampling in Wastewater and their Capture at Wastewater Treatment Plant Level*, 2021.

GESELLSCHAFT FÜR KUNSTSTOFFE IM LANDBAU E.V., 2020. *Kunststoffe im Agrarsektor* [online] [Zugriff am: 3. September 2019]. Verfügbar unter: <https://www.gkl-online.de/agrar-kunststoffe.html>

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (GVM), 2020. *Aufkommen von Agrarkunststoffen in Deutschland 2019* [online].

GILMORE, D.F., S. ANTOUN, R.W. LENZ und R.C. FULLER, 1993. Degradation of poly(β -hydroxyalkanoates) and polyolefin blends in a municipal wastewater treatment facility [online]. *Journal of Environmental Polymer Degradation*, **1**(4), 269-274. *Journal of Environmental Polymer Degradation*. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF01458293

GIONFRA, S., 2018. *Plastic Pollution in Soil*. Interacitive Soil Quality Paper.

GÓMEZ, E. und F. MICHEL, 2013. Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation [In press] [online]. *Polymer Degradation and Stability*, **98**. ISSN 01413910. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2013.09.018

GUILHERME, M.R., F.A. AOUADA, A.R. FAJARDO, A.F. MARTINS, A.T. PAULINO, M.F.T. DAVI, A.F. RUBIRA und E.C. MUNIZ, 2015. Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review [online]. *European Polymer Journal*, **72**, 365-385. ISSN 00143057. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017

HEEB, J. und w. HOFFELNER, 2004. *Litteringstudie - Teil 1. Auswertung und Synthese aller Datenaufnahmen*. Universität Basel.

HEEB, J. und w. HOFFELNER, 2005. *Litteringstudie - Teil 2. Wahrnehmung und Maßnahmen*. Universität Basel.

HEEB, J., M. ABLEIDINGER, T. BERGER, HOFFELNER und W.:, 2005. *Littering - ein Schweizer Problem? Eine Vergleichsstudie Schweiz - Europa* [online] [Zugriff am: 30. Juni 2020]. Verfügbar unter: https://gewerbe-basel.ch/content/uploads/2016/12/Littering_Vergleichsstudie_05.pdf

HEGO BIOTEC GMBH, Hg., 2020. *GoFloc - Polymere für die Gärrestentwässerung. Produktinformation* [online].

HENNECKE, D., A. BAUER, M. HERRCHEN, E. WISCHERHOFF und F. GORES, 2018. Cationic polyacrylamide copolymers (PAMs): environmental half life determination in sludge-treated soil [online]. *Environmental Sciences Europe*, **30**(1), 16. ISSN 2190-4707. Verfügbar unter: doi:10.1186/s12302-018-0143-3

HUANG, Y., Q. LIU, W. JIA, C. YAN und J. WANG, 2020. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment [online]. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, **260**, 114096. ISSN 1873-6424. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.envpol.2020.114096

HUERTA LWANGA, E., H. GERTSEN, H. GOOREN, P. PETERS, T. SALANKI, M. VAN DER PLOEG, E. BESSELING, A.A. KOELMANS und V. GEISSEN, 2016a. Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris* [online]. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*. ISSN 1873-6424. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.envpol.2016.09.096

HUERTA LWANGA, E., H. GERTSEN, H. GOOREN, P. PETERS, T. SALÁNKI, M. VAN DER PLOEG, E. BESSELING, A.A. KOELMANS und V. GEISSEN, 2016b. Microplastics in the Terrestrial Ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae) [online]. *Environmental science & technology*, **50**(5), 2685-2691. ISSN 1520-5851. Verfügbar unter: doi:10.1021/acs.est.5b05478

HUERTA LWANGA, E., J. MENDOZA VEGA, V. KU QUEJ, J.d.L.A. CHI, L. SANCHEZ DEL CID, C. CHI, G. ESCALONA SEGURA, H. GERTSEN, T. SALÁNKI, M. VAN DER PLOEG, A.A. KOELMANS und V. GEISSEN, 2017. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain [online]. *Scientific Reports*, **7**(1), 14071. ISSN 2045-2322. Verfügbar unter: doi:10.1038/s41598-017-14588-2

ICL SPECIALTY FERTILIZERS, 2017. *Umhüllte Streudünger zur bedarfsgerechten Düngung* [online] [Zugriff am: 8. Januar 2020]. Verfügbar unter: <https://erdbeerportal.de/wp-content/uploads/2018/03/Spec-Ag-Streud%C3%BCnnger-Brosch%C3%BCre-April-2017-1.pdf>

ICL SPECIALTY FERTILIZERS, 2018. *Umhüllte Streudünger zur bedarfsgerechten Düngung* [online]. Verfügbar unter: https://www.iclfertilizers.com/uploads/Broschure%20and%20catalog/ICL_Agromaster_Broschuere_2018.pdf

ILYAS, M., W. AHMAD, H. KHAN, S. YOUSAF, K. KHAN und S. NAZIR, 2018. Plastic waste as a significant threat to environment – a systematic literature review [online]. *Reviews on Environmental Health*, **33**(4), 383-406. ISSN 0048-7554. Verfügbar unter: doi:10.1515/reveh-2017-0035

INDUSTRIEVERBAND AGRAR E.V. PFLANZENERNÄHRUNG, 2018. *Wichtige Zahlen* [online] [Zugriff am: 18. September 2019]. Verfügbar unter: https://www.iva.de/sites/default/files/benutzer/%25uid/publikationen/wichtige_zahlen_2017-2018.pdf

INDUSTRIEVERBAND AGRAR E.V., Hg., 2020. *zur Höhe des Selbstversorgungsgrads bei Acker- und Sonderkulturen in Deutschland und Veränderungen dieser Maßzahl bei alternativen Szenarien* [online].

JAMBECK, J.R., R. GEYER und C. WILCOX, 2015. Plastic waste inputs from land into the Ocean [online]. *Science*, **347**(6223), 764-768. Science. Verfügbar unter: doi:10.1126/science.1260879

KALE, G., R. AURAS, S.P. SINGH und R. NARAYAN, 2007. Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions [online]. *Polymer Testing*, **26**(8), 1049-1061. ISSN 01429418 [Zugriff am: 28. Oktober 2019]. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.polymeresting.2007.07.006

KEHRES, B., 2014. *Grüngutverwertung nach der BioAbfV 2012* [online]. Verfügbar unter: https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Themen_Positionen/5.3.7_Thema_Gruengutverwertung_nach_der_BioAbfV_2012.pdf

KEHRES, B., 2016. *Sortenreinheit von Bioabfällen gewährleisten* [online]. BGK Standpunkt. Verfügbar unter: https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/HUK-Dateien/6_2016/5.4.6_Position_Sortenreinheit_von_Bioabfaellen_gewaehrleisten.pdf

KEHRES, B., 2020. *Kunststoffe in Kompost und Gärprodukten. Herkunft - Bedeutung - Vermeidung* [online]. Verfügbar unter: https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Themen_Positionen/5.3.16_Thema_Kunststoffe_in_Kompost_und_Gaerprodukten.pdf

KERN, M., 2019. Unterschied zwischen Theorie und Praxis. Kunststoffeinträge aus Kompost in die Umwelt sind geringer als gedacht. *Entsorga Magazin*, (3). Entsorga Magazin.

KIRSCH, A., 2016. *Aufbereitung weiter möglich* [online]. H&K aktuell. Verfügbar unter: https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/HUK-Dateien/7_2016/Aufbereitung_weiter_moeglich_HUK_07_2016.pdf

KRAUS, F., M. ZAMZOW, L. CONZELMANN, C. REMY, KLEYBÖCKER, A. SEIS, W. MIEHE, U., L. HERMANN, R. HERMANN und c. KRABBE, 2018. *Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung* [online]. Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH (KWB). UBA-Texte. Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3716_31_330_phosphor-rueckgewinnung_abwasserstrom_bf.pdf

KRAUSS, R.M., J.L. FREEDMAN und M. WHITCUP, 1978. Field and laboratory studies of littering [online]. *Journal of Experimental Social Psychology*, **14**(1), 109-122. ISSN 00221031. Verfügbar unter: doi:10.1016/0022-1031(78)90064-1

KUHN, M. und H. GREGOR, 2011. *Rechengutanfall und -qualität*.

KUHN, M., 2014. Mengen und Trockenrückstand von Rechengut kommunaler Kläranlagen.

LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN, Hg., 2013. *Hinweise zur Verwertung von Grünguthäcksel auf Ackerflächen. Unbehandelte Bioabfälle zur Direktverwertung* [online]. Verfügbar unter: file:///C:/Users/bj/AppData/Local/Temp/merkblatt_verwertung_gruenguthaeksel_2013-07-04.pdf

LANER, D., H. RECHBERGER und T. ASTRUP, 2014. Systematic Evaluation of Uncertainty in Material Flow Analysis [online]. *Journal of Industrial Ecology*, **18**(6), 859-870. ISSN 1088-1980. Verfügbar unter: [doi:10.1111/jiec.12143](https://doi.org/10.1111/jiec.12143)

LEIFHEIT, E.F. und M.C. RILLIG, 2020. Mikroplastik in landwirtschaftlichen Böden - eine versteckte Gefahr? [online]. *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft, Aktuelle Beiträge / Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft, Aktuelle Beiträge*. Verfügbar unter: [doi:10.12767/buel.v98i1.279](https://doi.org/10.12767/buel.v98i1.279)

LIU, M., S. LU, Y. SONG, L. LEI, J. HU, W. LV, W. ZHOU, C. CAO, H. SHI, X. YANG und D. HE, 2018. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China [online]. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, **242**(Pt A), 855-862. ISSN 1873-6424. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.envpol.2018.07.051](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.051)

LJUNG, E., OLESEN, K. B., ANDERSSON, P. G., FÄLTSTRÖM, E., VOLLERTSEN, J., WITTGREN, H. B., AND HAGMAN, M., 2018. *Mikroplaster i kretsloppet*. Svenskt Vatten Utveckling Rapport. 13.

LUCCHESI, V., V. ZLOF und U. HEIMBACH, 2016. Results of the EPPO Survey on dose expression for seed treatment and authorized dose for plant protection products in general [online]. *EPPO Bulletin*, **46**(3), 618-624. ISSN 02508052. Verfügbar unter: [doi:10.1111/epp.12342](https://doi.org/10.1111/epp.12342)

MARIA THELEN-JÜNGLING, 2020. Vewertung von Bioabfällen [online]. BGK-Statistik. *H&K aktuell*, (Q1/2020), 7-8. H&K aktuell. Verfügbar unter: https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/HUK-Dateien/2020/Q1_2020/Verwertung_von_Bioabfaellen_2019_HUK_Q1_2020.pdf

MARTIN MÜLLER, 2016. *Kartoffeln tropfgenau bewässern*.

MÖLLER, J.N., M.G.J. LÖDER und C. LAFORSCH, 2020. Finding Microplastics in Soils: A Review of Analytical Methods [online]. *Environmental science & technology*, **54**(4), 2078-2090. ISSN 1520-5851. Verfügbar unter: [doi:10.1021/acs.est.9b04618](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04618)

MÜNCH, J., 2008. *Nachaltig nutzbares Getreidestroh in Deutschland. Positionspapier*.

MUROI, F., Y. TACHIBANA, Y. KOBAYASHI, T. SAKURAI und K.-i. KASUYA, 2016. Influences of poly(butylene adipate-co-terephthalate) on soil microbiota and plant growth [online]. *Polymer Degradation and Stability*, **129**, 338-346. ISSN 01413910. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.polymdegradstab.2016.05.018](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.05.018)

NEETHU, T.M., P.K. DUBEY und A.R. KASWALA, 2018. Prospects and Applications of Hydrogel Technology in Agriculture [online]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, **7**(05), 3155-3162. ISSN 23197692. Verfügbar unter: doi:10.20546/ijcmas.2018.705.369

NG, E.-L., E. HUERTA LWANGA, S.M. ELDRIDGE, P. JOHNSTON, H.-W. HU, V. GEISEN und D. CHEN, 2018. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems [online]. *The Science of the total environment*, **627**, 1377-1388. ISSN 1879-1026 [Zugriff am: 12. November 2020]. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.01.341

NIZZETTO, L., M. FUTTER und S. LANGAAS, 2016. Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin? [online]. *Environmental Science & Technology*, **50**(20), 10777-10779. ISSN 0013-936X. Verfügbar unter: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.6b04140>

NUTRIEN LTD., 2018. *Safety Data Sheet ESN Polymer Coated Urea 44-0-0* [online]. 13. Juni 2018 [Zugriff am: 8. Januar 2020]. Verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwilhKfhIPTmAhWL-KQKHcPmCxoQFjACegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fag-products.nutrien.com%2Fproducts%2Fcode%2F3196-14250NM%2Fen_US%2FSDS%2F3196-14250NM_SDS_en_US.pdf&usg=AOvVaw2Qs_zkwv6k5nUf_0swM7KH

ORGANIC WASTE SYSTEMS, 27. Januar 2017. *Expert statement (bio)degradable mulching films*. Gent, Belgium.

PEDRINI, S., D.J. MERRITT, J. STEVENS und K. DIXON, 2017. Seed Coating: Science or Marketing Spin? [online]. *Trends in plant science*, **22**(2), 106-116. Trends in plant science. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tplants.2016.11.002

PLASTIC SOUP FOUNDATION, Hg., 2016. *Icoonprojekt Siertelt. Position Paper* [online].

PLASTICS EUROPE, 2019a. *Kunststoffe in der Landwirtschaft* [online]. Verfügbar unter: <https://www.plasticseurope.org/de/about-plastics/agriculture>

PLASTICS EUROPE, Hg., 2019b. *Plastics - the facts 2019. An Analysis of European plastics production, demand and waste data* [online].

POCHRON, S.T., A. FIORENZA, C. SPERL, B. LEDDA, C. LAWRENCE PATTERSON, C.C. TUCKER, W. TUCKER, Y.L. HO und N. PANICO, 2017. The response of earthworms (*Eisenia fetida*) and soil microbes to the crumb rubber material used in artificial turf fields [online]. *Chemosphere*, **173**, 557-562. ISSN 00456535. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.chemosphere.2017.01.091

RAUSSEN, T. und M. KERN, 2016. *Optimale Aufbereitung von Gärresten aus der Bioabfallbehandlung* [online]. Verfügbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/2016_Leitfaden_Gaerreste_Bioabfallbehandlung.PDF

RICE, P.J., L.L. MCCONNELL, L.P. HEIGHTON, A.M. SADEGHI, A.R. ISENSEE, J.R. TEASDALE, A.A. ABDUL-BAKI, J.A. HARMAN-FETCHO und C.J. HAPEMAN, 2001. Runoff loss of pesticides and soil: a comparison between vegetative mulch and plastic mulch in vegetable production systems [online]. *Journal of environmental quality*, **30**(5), 1808-1821. ISSN 0047-2425. Verfügbar unter: doi:10.2134/jeq2001.3051808x

RILLIG, M.C. und A. LEHMANN, 2020. Microplastic in terrestrial ecosystems [online]. *Science (New York, N.Y.)*, **368**(6498), 1430-1431. ISSN 1095-9203. Verfügbar unter: doi:10.1126/science.abb5979

RILLIG, M.C., 2012. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [online]. *Environmental science & technology*, **46**(12), 6453-6454. ISSN 1520-5851. Verfügbar unter: doi:10.1021/es302011r

RILLIG, M.C., A. LEHMANN, A.A. de SOUZA MACHADO und G. YANG, 2019. Microplastic effects on plants [online]. *The New phytologist*, **223**(3), 1066-1070. The New phytologist. Verfügbar unter: doi:10.1111/nph.15794

RUDNIK, E. und D. BRIASSOULIS, 2011. Degradation behaviour of poly(lactic acid) films and fibres in soil under Mediterranean field conditions and laboratory simulations testing [online]. *Industrial Crops and Products*, **33**(3), 648-658. ISSN 0926-6690. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.indcrop.2010.12.031

SCHAAF, H., B. SCHWESINGER, M. WOHLRAB, L. HÖLZLE, T. SCHILLING und M. THELEN-JÜNGLING, 2018. *Länderübergreifender Ringversuch Bioabfall für das Fachmodul Abfall* [online]. Verfügbar unter: https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/HUK-Dateien/2018/Q3_2018/Bericht_LUERV_2018_West.pdf

SCHEURER, M. und M. BIGALKE, 2018. Microplastics in Swiss Floodplain Soils [online]. *Environmental science & technology*, **52**(6), 3591-3598. ISSN 1520-5851. Verfügbar unter: doi:10.1021/acs.est.7b06003

SCHMILEWSKI, G.K., 2018. *Kultursubstrate und Blumenerden - Eigenschaften, Ausgangsstoffe, Verwendung*.

SENATSVORWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT BERLIN, 2012. *Entsorgung von Regen- und Abwasser (Ausgabe 2012)*.

SHAH, A.A., F. HASAN, A. HAMEED und S. AHMED, 2008. Biological degradation of plastics: a comprehensive review [online]. *Biotechnology advances*, **26**(3), 246-265. ISSN 0734-9750. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.biotechadv.2007.12.005

SHERINGTON, C. und BRADLEY, C. HANN, S., 2020. *Conventional and Biodegradable Plastics in Agriculture. Webinar*. Eunomia Research & Consulting Ltd.

SOUZA MACHADO, A.A. de, W. KLOAS, C. ZARFL, S. HEMPEL und M.C. RILLIG, 2018. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems [online]. *Global change biology*, **24**(4), 1405-1416. Global change biology. Verfügbar unter: doi:10.1111/gcb.14020

STAMICARBON, 2019. *Controlled-Release Fertilizer Design* [online]. Verfügbar unter: <https://www.stamicarbon.com/controlled-release-fertilizer>

STATISTISCHES BUNDESAMT UND DWA-ARBEITSGRUPPE KEK-1.2 "STATISTIK", 2014. Abwasser und Klärschlamm in Deutschland - statistische Betrachtungen [online]. Teil 2: Klärschlamm, Klärgas, Rechen- und Sandfanggut. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, **61**(12). Korrespondenz Abwasser, Abfall. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/abwasser-klärschlamm-5322102159004.pdf?__blob=publicationFile&v=5

STATISTISCHES BUNDESAMT, 2019a. *Klärschlammverwertung nach Bundesländern* [online] [Zugriff am: 20. August 2020]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/liste-klärschlammverwertungsart.html>

STATISTISCHES BUNDESAMT, Hg., 2010. *Bodenbearbeitung, Bewässerung, Landschaftselemente. Erhebung über landwirtschaftliche Produktionsmethoden (ELPM)* [online]. Fachserie 3. Heft 5.

STATISTISCHES BUNDESAMT, Hg., 2013. *Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung* [online]. Wiesbaden.

STATISTISCHES BUNDESAMT, Hg., 2017. *Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben. Agrarstrukturerhebung - 2016* [online].

STATISTISCHES BUNDESAMT, Hg., 2018. *Abwasserbehandlung - Klärschlamm. Tabellenband 2015/2016* [online]. Umwelt. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/klärschlamm-5322101169004.pdf?__blob=publicationFile

STATISTISCHES BUNDESAMT, Hg., 2019b. *19 Land- und Forstwirtschaft* [online]. Statistisches Jahrbuch. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/jb-land-forstwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile

STATISTISCHES BUNDESAMT, Hg., 2019c. *Kaufwerte für landwirtschaftliche Grundstücke 2018* [online]. Land- und Forstwirtschaft, Fischerei.

STATISTISCHES BUNDESAMT, Hg., 2019d. *Statistisches Jahrbuch 2019. 19 Land- und Forstwirtschaft* [online]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/jb-land-forstwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile

STATISTISCHES BUNDESAMT, Hg., 2019e. *Umwelt - Abfallentsorgung 2017* [online]. Fachserie 19, Reihe 1. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallentsorgung-2190100177004.pdf?__blob=publicationFile

STATISTISCHES BUNDESAMT, Hg., 2020. *Wachstum und Ernte - Feldfrüchte - 2019* [online]. Fachserie 3 Reihe 3.2.1.

STEIN, S.R., 2009. *2008 National Visible Litter Survey and Litter Cost Research Study. Final Report*. Stamford, Connecticut.

SZU-YING TUNG, NORIAKI HARADA, YUICHI SEKIGUTI, AND HIROSHI AOKI, 2017. *DEVELOPMENT AND APPLICATION OF CONTROLLED RELEASE FERTILIZER "MEISTER (COATED UREA)"* [online].

TALVITIE, J., A. MIKOLA, O. SETALA, M. HEINONEN und A. KOISTINEN, 2017. How well is microlitter purified from wastewater? - A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant [online]. *Water Research*, **109**, 164-172. ISSN 00431354. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.watres.2016.11.046

THOMPSON, B., 2012. *Inlet Screens for STWs/WwTWs*. Version 5.0.

TOSIN, M., A. PISCHEDDA und F. DEGLI-INNOCENTI, 2019. Biodegradation kinetics in soil of a multi-constituent biodegradable plastic [online]. *Polymer Degradation and Stability*, **166**, 213-218. ISSN 01413910. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.034

TOSIN, M., M. POGNANI, F. DEGLI INNOCENTI, M. WEBER, C. LOTT, D. MAKAROW, B. UNGER, D. BRIASSOULIS, A. MISTRIOSIS, A. PIKASI, B. de WILDE, N. MORTIER, E. SCHUMAN, M. VAN EEKERT und M. VAN DER ZEE, October 2016. *Validation of lab and mesocosm tests against field experiments*. Novara.

TRENKEL, M.E., 2010. *Slow- an Controlled-Release an Stabilized Fertilizers. An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture*. Paris.

UBA, 2020. *Kunststoffe in Böden* [online]. *Derzeitiger Kenntnisstand zu Einträgen und Wirkungen*. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kunststoffe-in-boeden-derzeitiger-kenntnisstand-zu>

UHL ET AL., 2011. *Entwicklung einer Siloabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffe* [online]. Straubing, Grub, Dresden. Berichte aus dem TFZ. 27 [Zugriff am: 7. Mai 2020]. Verfügbar unter: http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/biokraftstoffe/dateien/27_bericht.pdf

UNICE, K.M., M.P. WEEBER, M.M. ABRAMSON, R.C.D. REID, J.A.G. VAN GILS, A.A. MARKUS, A.D. VETHAAK und J.M. PANKO, 2019a. Characterizing export of land-based microplastics to the estuary - Part I: Application of integrated geospatial microplastic transport models to assess tire and road wear particles in the Seine watershed [online]. *The Science of the total environment*, **646**, 1639-1649. ISSN 1879-1026 [Zugriff am: 22. Februar 2019]. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.07.368

UNICE, K.M., M.P. WEEBER, M.M. ABRAMSON, R.C.D. REID, J.A.G. VAN GILS, A.A. MARKUS, A.D. VETHAAK und J.M. PANKO, 2019b. Characterizing export of land-based microplastics to the estuary - Part II: Sensitivity analysis of an integrated geospatial microplastic transport modeling assessment of tire and road wear particles [online]. *The Science of the total environment*, **646**, 1650-1659. ISSN 1879-1026 [Zugriff am: 22. Februar 2019]. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.301

VAN DEN BERG, P., E. HUERTA-LWANGA, F. CORRADINI und V. GEISSEN, 2020. Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in eastern Spanish agricultural soils [online]. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, **261**, 114198. ISSN 1873-6424. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.envpol.2020.114198

VAN DER ZEE, M. und K. MOLENVELD, 2020. *The fate of (compostable) plastic products in a full scale industrial organic waste treatment facility.*

VOLOVA, T.G., A.N. BOYANDIN, M.I. GLADYSHEV, I.I. GITELSON und S.V. PRUDNIKOVA, 2015. Biodegradation of Polyhydroxyalkanoates in Natural Water Environments [online]. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, **8**(2), 168-186. ISSN 19971389. Verfügbar unter: doi:10.17516/1997-1389-2015-8-2-168-186

WEIDEMA, B.P. und M.S. WESNÆS, 1996. Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators [online]. *Journal of Cleaner Production*, **4**(3), 167-174. ISSN 09596526. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0959-6526(96)00043-1

WENG, Y.-X., X.-L. WANG und Y.-Z. WANG, 2011. Biodegradation behavior of PHAs with different chemical structures under controlled composting conditions [online]. *Polymer Testing*, **30**(4), 372-380. ISSN 01429418. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.polymertesting.2011.02.001

WENG, Y.-X., Y.-J. JIN, Q.-Y. MENG, L. WANG, M. ZHANG und Y.-Z. WANG, 2013. Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions [online]. *Polymer Testing*, **32**(5), 918-926. ISSN 01429418. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.polymertesting.2013.05.001

WIESLER, F., K. HUND-RINKE, S. GÄTH, E. GEORGE, GREEF, PROF. DR. JÖRG MICHAEL, HÖLZLE, PROF. DR. LUDWIG E., F. HOLZ, K.-J. HÜLSBERGEN, R. PFEIL, K. SEVERIN, H.-G. FREDE, D.-I.A.B. BLUM, H. SCHENKEL, W. HORST, K. DITTERT, T. EBERTSEDER, D.-I.A.B. OSTERBURG, W. PHILIPP und M. PIETSCH, 2016. Anwendung von organischen Düngern und organischen Reststoffen in der Landwirtschaft [online]. *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*, Band 94, Mai 2016 / *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*, Band 94, Heft 1, Mai 2016. Verfügbar unter: doi:10.12767/BUEL.V94I1.124

WILDE, B. de, N. MORTIER, M. TOSIN, M. POGNANI, F. DEGLI INNOCENTI, D. BRIASSOULIS und A. MISTRIOSIS, October 2016. *Open-BIO. Opening bio-based markets via standards, labelling and procurement.* Round robin test on freshwater biodegradation. Gent, Belgium.

WIRTSCHAFTSVERBAND DER DEUTSCHEN KAUTSCHUKINDUSTRIE, Hg., 2020. *die-kautschukindustrie-2019-2020* [online].

WOLTER und MARTIN. *Biologische Abbaubarkeit synthetischer superabsorbierender Bodenhilfsstoffe.*

WRIGHT, S.L., R.C. THOMPSON und T.S. GALLOWAY, 2013. The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review [online]. *Environmental Pollution*, **178**, 483-492. ISSN 02697491. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.envpol.2013.02.031

WU, P., J. HUANG, Y. ZHENG, Y. YANG, Y. ZHANG, F. HE, H. CHEN, G. QUAN, J. YAN, T. LI und B. GAO, 2019. Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics [online]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **184**, 109612. ISSN 01476513. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ecoenv.2019.109612

XIONG, B., R.D. LOSS, D. SHIELDS, T. PAWLIK, R. HOCHREITER, A.L. ZYDNEY und M. KUMAR, 2018. Polyacrylamide degradation and its implications in environmental systems [online]. *npj Clean Water*, **1**(1). npj Clean Water. Verfügbar unter: doi:10.1038/s41545-018-0016-8

YAMAMOTO-TAMURA, K., S. HIRADATE, T. WATANABE, M. KOITABASHI, Y. SAMESHIMA-YAMASHITA, T. YARIMIZU und H. KITAMOTO, 2015. Contribution of soil esterase to biodegradation of aliphatic polyester agricultural mulch film in cultivated soils [online]. *AMB Express*, **5**, 10. ISSN 2191-0855. Verfügbar unter: doi:10.1186/s13568-014-0088-x

YOUSEFZADEH TABASI, R. und A. AJJI, 2015. Selective Degradation of Biodegradable Blends in Simulated Laboratory Composting [online]. *Polymer Degradation and Stability*, **120**. ISSN 01413910. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.polymdegradstab.2015.07.020

ZHANG, D., H.-b. LIU, W.-l. HU, X.-h. QIN, X.-w. MA, C.-r. YAN und H.-y. WANG, 2016. The status and distribution characteristics of residual mulching film in Xinjiang, China [online]. *Journal of Integrative Agriculture*, **15**(11), 2639-2646. ISSN 20953119. Verfügbar unter: doi:10.1016/S2095-3119(15)61240-0

ZHANG, S., J. WANG, X. LIU, F. QU, X. WANG, X. WANG, Y. LI und Y. SUN, 2019. Microplastics in the environment: A review of analytical methods, distribution, and biological effects [online]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **111**, 62-72. ISSN 01659936. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.trac.2018.12.002

ZHANG, S., X. LIU, X. HAO, J. WANG und Y. ZHANG, 2020. Distribution of low-density microplastics in the mollisol farmlands of northeast China [online]. *The Science of the total environment*, **708**, 135091. ISSN 1879-1026. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135091

ZHOU, Q., H. ZHANG, C. FU, Y. ZHOU, Z. DAI, Y. LI, C. TU und Y. LUO, 2018. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea [online]. *Geoderma*, **322**, 201-208. ISSN 00167061. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.geoderma.2018.02.015

ZHOU, Y., J. WANG, M. ZOU, Z. JIA, S. ZHOU und Y. LI, 2020. Microplastics in soils: A review of methods, occurrence, fate, transport, ecological and environmental risks [online]. *The Science of the total environment*, **748**, 141368. ISSN 1879-1026. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141368

ZIMMERMANN, T., d. JEPSEN, L. SPENGLER, L. RÖDIG, R. BLIKLEN, J. WAGNER, K. STRUCK, L. HIESTER und H. SCHULZ, 2019. *Kunststoffe in der Umwelt. Erarbeitung einer Systematik für erste Schätzungen zum Verbleib von Abfällen und anderen Produkten aus Kunststoffen in verschiedenen Umweltmedien* [online]. Verfügbar unter: https://oekopol.de/src/files/Endbericht_UBA_Kunststoffe-in-der-Umwelt.pdf

ZUMSTEIN, M.T., A. SCHINTLMEISTER, T.F. NELSON, R. BAUMGARTNER, D. WOEBKEN, M. WAGNER, H.-P.E. KOHLER, K. MCNEILL und M. SANDER, 2018. Bio-degradation of synthetic polymers in soils: Tracking carbon into CO_2 and microbial biomass [online]. *Science Advances*, 4(7), eaas9024. Science Advances. Verfügbar unter: doi:10.1126/sciadv.aas9024

