



Hochschule **RheinMain**
University of Applied Sciences
Wiesbaden Rüsselsheim

Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Studiengang Bio- und Umwelttechnik

MASTERARBEIT

Fremdstoffe und Mikroplastik in Komposten

Name:	Sarah Mareike Lang
Matrikelnummer:	380875
Referentin:	Prof. Dr. Ursula Deister
Korreferent:	Prof. Dr. Thomas Schmid

INHALTSVERZEICHNIS

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	<i>II</i>
<i>Versicherung.....</i>	<i>V</i>
<i>Danksagung</i>	<i>VI</i>
<i>Vorwort.....</i>	<i>VII</i>
<i>Verzeichnisse</i>	<i>VIII</i>
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
Abbildungsverzeichnis.....	XI
Tabellenverzeichnis.....	XIII
<i>1 Einleitung</i>	<i>1</i>
1.1 Ausgangslage.....	1
1.2 Ziele	2
1.3 Arbeitsschritte und Untersuchungsmethoden.....	2
<i>2 Stand von Wissenschaft und Technik.....</i>	<i>3</i>
2.1 Begriffe und Definitionen	3
2.1.1 Definition / Einteilung von Mikroplastik	3
2.1.2 Biologische Abfallbehandlung.....	5
2.2 Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt.....	13
2.2.1 Eintragsquellen von Mikroplastik	13
2.2.2 Fremdstoffe in Kompost.....	16
2.3 Verbreitungswege von Mikroplastik in der Umwelt	19
2.4 Auswirkungen von Mikroplastik	23
2.4.1 Additive im Kunststoff.....	24
2.4.2 Anhaftende Umweltschadstoffe im Kunststoff	25
2.4.3 Auswirkungen auf die Biota	25
2.4.4 Auswirkungen auf den Menschen.....	27
2.5 Untersuchungsmethoden für Mikroplastik im Kompost	28
2.5.1 Methoden der Probenahme	28
2.5.2 Methoden der Probenaufbereitung.....	29
2.5.3 Methoden der Mikroplastik-Analytik.....	30

2.6	Bisherige Studien über Mikroplastik in Kompost	32
2.6.1	Überblick	32
2.6.2	Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment	34
2.6.3	Identifizierung und Quantifizierung von Mikroplastik auf landwirtschaftlichem Ackerland	37
2.6.4	Bundesgütegemeinschaft Kompost – standardisierte Methoden zur Bestimmung des Fremdstoffgehaltes in Biogut	40
2.6.5	Sortenreinheit von Bioabfällen – Datenerhebung am Beispiel zweier öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger in Baden-Württemberg	45
2.7	Rechtliche Grundlagen	48
3	<i>Methodenentwicklung zur Bestimmung von Fremdstoffen und Mikroplastik in Kompost</i>	49
3.1	Erste Versuche	49
3.2	Optimierung der Methode	51
3.3	Durchführung der Versuche	52
3.3.1	Blindproben	52
3.3.2	Tests zur Ermittlung der Wiederfindungsrate	54
3.3.3	Untersuchung mit dem Lichtmikroskop	56
3.3.4	Untersuchung mit dem Raman-Spektrometer	56
3.4	Ergebnisse der Versuche	57
3.4.1	Blindproben	57
3.4.2	Tests zur Ermittlung der Wiederfindungsrate	59
3.4.3	Untersuchung mit dem Lichtmikroskop	64
3.4.4	Untersuchung mit dem Raman-Spektrometer	65
4	<i>Bestimmung von Fremdstoffen und Mikroplastik in ausgewählten Kompostproben...</i>	66
4.1	Einführung	66
4.2	Probenahme	67
4.3	Durchführung der Versuche	68
4.4	Ergebnisse und Diskussion	69
4.4.1	Pflanzenabfallkompostierungsanlage	69
4.4.2	Bioabfallvergärungsanlage	72
4.4.3	Zusammenfassung der beprobten Komposte	75
4.4.4	Diskussion	77
5	<i>Zusammenfassung und Fazit</i>	81

6	<i>Literaturverzeichnis</i>	XIV
7	<i>Anhang</i>	XXI
7.1	Sortierhilfe nach Anlage 2 der Gebiets- und Chargenanalyse der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK)	XXI
7.2	Materialliste	XXIV
7.3	Fremdstoffe in ausgewählten Kompostproben	XXVI
7.3.1	Pflanzenabfallkompostierungsanlage	XXVI
7.3.2	Bioabfallvergärungsanlage	XXVIII
7.4	Aufnahmen der Fraktion < 1 mm	XXX
7.4.1	Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop.....	XXX
7.4.2	Aufnahmen mit dem Ramen-Spektrometer	XXXII

VERSICHERUNG

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Texte, Gedankengänge, Konzepte usw. in meinen Ausführungen habe ich als solche eindeutig gekennzeichnet und mit vollständigen Verweisen auf die jeweilige Urheberschaft und Quelle versehen.

Alle weiteren Inhalte wie Textteile, Abbildungen, Tabellen etc. ohne entsprechende Verweise stammen im urheberrechtlichen Sinn von mir.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch vorliegt, wenn sich eine der vorstehenden Versicherungen als unrichtig erweist.

Dauborn, 27.08.2019

Ort, Datum

Unterschrift Verfasserin

DANKSAGUNG

Ich möchte Frau Prof. Dr. Ursula Katharina Deister besonders für ihre Bereitschaft danken, diese Masterarbeit zu ermöglichen. Für die vielen hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich recht herzlich bedanken.

Herrn Volker Kummer möchte ich für die tatkräftige Unterstützung und Beratung danken.

Herrn Dr. Thomas Schmid möchte ich ebenfalls für die Bereitschaft zur Übernahme des Ko-referates danken.

Danke an meine Familie für die aufgewendete Zeit zur kritischen Durchsicht und meinen Freunden für die fortgesetzte Unterstützung.

VORWORT

Im Rahmen eines gemeinsamen Projektes der Hochschule RheinMain mit dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) soll die Belastung von Komposten untersucht werden. Das Thema der Masterthesis lautet „Fremdstoffe und Mikroplastik in Komposten“.

Die Aufgabenstellung wurde in einem 6-monatigem Zeitrahmen vom 01.03.2019 bis 31.08.2019 bearbeitet.

VERZEICHNISSE**Abkürzungsverzeichnis**

3D	Dreidimensional
a	Jahr
ATR	Attenuated Total Reflection
BGK	Bundesgütegemeinschaft Kompost
BHKW	Blockheizkraftwerk
cm	Zentimeter
cm ⁻¹	Wellenzahl
d	Fehler der Analysenwaage
E	Einwohner
EDS	energiedispersiven Röntgenspektroskopie
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot
g	Gramm
GC	Gaschromatographie
Gew.-%	Gewichtsprozent
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
ha	Hektar
HCl	Salzsäure
HNO ₃	Salpetersäure
K	Kompost / Komposterde
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KOH	Kalilauge

KS	Kristallisationsschale
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
L	Liter
Lkw	Lastkraftwagen
m ³	Kubikmeter
m	Meter
m (Kapitel 3 und 4)	Masse
Mio.	Millionen
ml	Milliliter
mm	Millimeter
µm	Mikrometer
MP	Mikroplastik
MPP	Mikroplastikpartikel
MS	Massenspektrometrie
NaOH	Natronlauge
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PA	Polyamid
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PBDE	Polybromierte Diphenylether
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PE	Polyethylen
PES	Polyester
PET	Polyethylenterephthalat
Pkw	Personenkraftwagen
PP	Polypropylen

PS	Polystyrol
PTFE	Polytetrafluorethen
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
REACH	Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals
RM	Raman
SEM	Elektronenmikroskop
SVHC	substances of very high concern
t	Tonnen
TS	Trockensubstanz
TSG ML	Technical Subgroup on Marine Litter
UBA	Umweltbundesamt
UMSICHT	Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik
UV	Ultraviolett

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ANTEILE AN PRIMÄREM MIKROPLASTIK UNTERSCHIEDEN NACH TYP A UND TYP B (ANGELEHNT AN [4])	4
ABBILDUNG 2: ZUSAMMENHANG DER HERKUNFT DES PLASTIKS MIT DER VERANTWORTUNG ZUR VERMEIDUNG [4]	5
ABBILDUNG 3: VERWERTUNGSWEGE DES BIOABFALLS [12].....	6
ABBILDUNG 4: BUNDESWEIT AN BIOABFALLBEHANDLUNGSANLAGEN ANGELIEFERTE BIOLOGISCH ABBAUBARE ABFÄLLE VON 1990 – 2016 [12].....	7
ABBILDUNG 5: ZUSAMMENSETZUNG DER BUNDESWEIT AN BIOABFALLBEHANDLUNGSANLAGEN ANGELIEFERTEN BIOABFÄLLE 2016 (ANGELEHNT AN [12])	8
ABBILDUNG 6: ÜBERBLICK ÜBER MÖGLICHE KOMPOSTIERUNGSVERFAHREN (ANGELEHNT AN [16] [10]).....	10
ABBILDUNG 7: ABSATZBEREICHE FÜR RAL-GÜTEGESICHETERTE KOMPOSTE 2017 (ANGELEHNT AN [12])	11
ABBILDUNG 8: ÜBERBLICK ÜBER MÖGLICHE VERGÄRUNGSVERFAHREN (ANGELEHNT AN [16], S. 14).....	12
ABBILDUNG 9: AUFTEILUNG DES PRIMÄREN MIKROPLASTIKS NACH BEREICHEN (ANGELEHNT AN [4])	13
ABBILDUNG 10: POTENTIELLE EROSIONSGEFÄHRDUNG DER ACKERBÖDEN DURCH WIND (LINKS) UND WASSER (RECHTS) IN DEUTSCHLAND [28]	20
ABBILDUNG 11: ENTSORGUNG UND VERWERTUNG VON KLÄRSCHLAMM (ANGELEHNT AN [30])	21
ABBILDUNG 12: INFRAROT-SPEKTREN DER KUNSTSTOFFE PP, PE UND PA [9]	32
ABBILDUNG 13: FORM DER GEFUNDENEN MPP (ANGELEHNT AN [3])	39
ABBILDUNG 14: HÄUFIGSTEN KUNSTSTOFFARTEN DER GEFUNDENEN MPP (ANGELEHNT AN [3])	40
ABBILDUNG 15: AUFTEILUNG DER CHARGE NACH SEGMENTEN	41
ABBILDUNG 16: SCHEMA DER ABFALLANALYSE MITTELS TROMMELSIEBMASCHINE [47]	46
ABBILDUNG 17: BEISPIELE FÜR ZUR ABFUHR BEREITSTEHENDE BIOTONNEN UND IHRE BEWERTUNG (A BIS E) [47]	47
ABBILDUNG 18: AUFBAU FÜR DIE ERSTEN VERSUCHE MIT DER KOMPOSTERDE	50
ABBILDUNG 19: SIEBE IM TROCKENSCHRANK.....	50
ABBILDUNG 20: VERSUCHSAUFBAU MIT DER SIEBKASKADE AUF DEM EDELSTAHLMEIER.....	51
ABBILDUNG 21: VORGEHEN ZUM UNTERSUCHEN DER PROBEN AUF FREMDSTOFFE.....	52
ABBILDUNG 22: AUSGEBREITETE KOMPOSTERDE IN SEGMENTE UNTERTEILT.....	54
ABBILDUNG 23: VORGEHEN ZUM UNTERSUCHEN DER PROBEN AUF FREMDSTOFFE UND BESTIMMUNG DER WIEDERFINDUNGSRATE	55
ABBILDUNG 24: VISUALISIERUNG DER FREMDSTOFFE UND MPP IM BAUMARKT- UND GARTENKOMPOST	59
ABBILDUNG 25: GEFUNDENE ZUGESetzte MPP IN PROBE 3	61
ABBILDUNG 26: WIEDERFINDUNGSRATE UND KORRIGIERTE WIEDERFINDUNGSRATE DER KOMPOSTERDE AUS DEM BAUMARKT (PROBEN 1 - 6) UND DES GARTENKOMPOSTS (PROBEN 7 - 10)	63
ABBILDUNG 27: VERGLEICH DER ZUGESetzten PARTIKEL (LINKS) UND DER GEFUNDENEN PARTIKEL (RECHTS)	64
ABBILDUNG 28: FREMDSTOFFPARTIKEL UNTER DEM LICHTMIKROSKOP: PLASTIKFOLIE, GLAS, TEXTILFASER (VON LINKS NACH RECHTS)	64
ABBILDUNG 29: STICHPROBE DER FRAKTION < 1 MM UNTER DEM RAMAN-SPEKTROMETER.....	65
ABBILDUNG 30: FERTIGKOMPOSTMIETE MIT PROBENAHMEBEREICH.....	67
ABBILDUNG 31: NAHAUFNAHME DES KOMPOSTS DER KOMPOSTIERUNGSANLAGE (LINKS) UND DER VERGÄRUNGSANLAGE (RECHTS)	68
ABBILDUNG 32: MIETE DES AEROB NACHBEHANDELTEN GÄRRÜCKSTANDES	68

ABBILDUNG 33: VORGEHEN ZUM UNTERSUCHEN DER PROBEN AUF MIKROPLASTIK UND FREMDSTOFFE	69
ABBILDUNG 34: GEFUNDENE FREMDSTOFFE DER KOMPOSTIERUNGSANLAGE SORTIERT NACH FOLIEN, FASERN, FRAGMENTEN, GLAS UND METALL / ALU (VON LINKS NACH RECHTS)	72
ABBILDUNG 35: GEFUNDENE FREMDSTOFFE DER VERGÄRUNGSANLAGE SORTIERT NACH FOLIEN, FASERN, FRAGMENTEN, GLAS UND METALL / ALU (VON LINKS NACH RECHTS)	74
ABBILDUNG 36: VERGLEICH DER GEFUNDENEN FREMDSTOFFE UND MPP PRO KILOGRAMM TS DER BEIDEN UNTERSUCHTEN ANLAGEN	75
ABBILDUNG 37: PARTIKELZAHLEN DER ISOLIERTEN FREMDSTOFFE IN DEN EINZELNEN FRAKTIONEN PRO KG TS.....	76
ABBILDUNG 38: NAHAUFNAHME EINES FOLIENFRAGMENTS (LINKS) UND EINES GLASFRAGMENTS (RECHTS) IN DER FRAKTION 2-5 MM	77
ABBILDUNG 39: VERGLEICH DER PARTIKELZAHLEN DER UNTERSUCHTEN ANLAGEN DIESER MASTERARBEIT MIT DEN UNTERSUCHTEN ANLAGEN DER STUDIE DER UNIVERSITÄT BAYREUTH.....	80
ABBILDUNG 40: PROBE 1 DER PFLANZENABFALLKOMPOSTIERUNGSANLAGE	XXVI
ABBILDUNG 41: PROBE 2 DER PFLANZENABFALLKOMPOSTIERUNGSANLAGE	XXVI
ABBILDUNG 42: PROBE 3 DER PFLANZENABFALLKOMPOSTIERUNGSANLAGE	XXVII
ABBILDUNG 43: PROBE 4 DER PFLANZENABFALLKOMPOSTIERUNGSANLAGE	XXVII
ABBILDUNG 44: PROBE 1 DER BIOABFALLVERGÄRUNGSANLAGE	XXVIII
ABBILDUNG 45: PROBE 2 DER BIOABFALLVERGÄRUNGSANLAGE	XXVIII
ABBILDUNG 46: PROBE 3 DER BIOABFALLVERGÄRUNGSANLAGE	XXIX
ABBILDUNG 47: PROBE 4 DER BIOABFALLVERGÄRUNGSANLAGE	XXIX
ABBILDUNG 48: PROBE 5 DER BIOABFALLVERGÄRUNGSANLAGE	XXX
ABBILDUNG 49: ÜBERSICHTSAUFNAHME MIT DEM LICHTMIKROSKOP	XXX
ABBILDUNG 50: AUFNAHME EINES PARTIKELS MIT DEM LICHTMIKROSKOP	XXXI
ABBILDUNG 51: AUFNAHME EINER FASER MIT DEM LICHTMIKROSKOP	XXXI
ABBILDUNG 52: AUFNAHME MIT DEM RAMAN-SPEKTROMETER DER UNTEREN EBENE AUF EINEM SILITHIUMFILTER.....	XXXII
ABBILDUNG 53: AUFNAHME MIT DEM RAMAN-SPEKTROMETER DER OBEREN EBENE AUF EINEM SILITHIUMFILTER	XXXII

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: UNTERSCHIEDE ZWISCHEN KONTINUIERLICHEN UND DISKONTINUIERLICHEN VERGÄRUNGSVERFAHREN (INHALT AUS [16])	12
TABELLE 2: DIE ZEHN HÄUFIGSTEN QUELLEN VON MIKROPLASTIK IN DER UMWELT MIT EMISSIONEN PRO EINWOHNER UND JAHR (ANGELEHNT AN [4])	14
TABELLE 3: EINTRÄGE VON MIKROPLASTIK IN AQUATISCHE UND TERRESTRISCHE ÖKOSYSTEME (ANGELEHNT AN [27], S. 25)	22
TABELLE 4: PUNKTUELLE UND DIFFUSE EINTRÄGE VON MIKROPLASTIK IN DIE UMWELT (INHALT AUS [4])	23
TABELLE 5: EINTEILUNG POTENZIELLER WIRKUNGEN VON MIKROPLASTIK [27]	26
TABELLE 6: ÜBERBLICK ÜBER ANLAGEN UND VERWERTETE ABFÄLLE SOWIE GEFUNDENEN MIKROPLASTIKPARTIKEL GRÖßER ALS 1 MM (ANGELEHNT AN [2])	36
TABELLE 7: KRITERIEN ZUR BEURTEILUNG DER SORTENREINHEIT DER BIOTONNEN [47]	46
TABELLE 8: BEISPIELE GEFUNDENER FREMDSTOFFE IM BIOGUT SORTIERT NACH FRAKTIONEN (ANGELEHNT AN [47])	47
TABELLE 9: PROBEN FÜR DIE WIEDERFINDUNGSRATE, EINGEWOGENE ERDE UND ZUGESetzte MPP	55
TABELLE 10: EINWAAGEN VON KOMPOSTERDE (NASS) AUS DEM BAUMARKT	57
TABELLE 11: EINWAAGEN VON KOMPOSTERDE (TROCKEN) AUS EINEM GARTEN	57
TABELLE 12: GEWOGENE FRAKTIONEN AUF DEN SIEBEN	58
TABELLE 13: GEFUNDENE FREMDSTOFFE IN DEN BLINDPROBEN	58
TABELLE 14: TROCKENSUBSTANZ DER PROBEN	60
TABELLE 15: EINGEWOGENE MASSEN AN BAUMARKTKOMPOST UND GARTENKOMPOST (TROCKEN)	60
TABELLE 16: GEWOGENE FRAKTIONEN AUF DEN SIEBEN DER PROBEN FÜR DIE WIEDERFINDUNGSRATE	62
TABELLE 17: BERECHNUNG DER WIEDERFINDUNGSRATE DURCH ZUGESetzte UND GEFUNDENE PARTIKEL	62
TABELLE 18: TROCKENSUBSTANZ DER PROBEN	69
TABELLE 19: EINGEWOGENE MASSEN AN KOMPOST (TROCKEN)	70
TABELLE 20: ZEITDAUER UND WASSERVERBRAUCH DER SIEBDURCHGÄNGE	70
TABELLE 21: GEWOGENE FRAKTIONEN AUF DEN SIEBEN DER PROBEN	71
TABELLE 22: GEFUNDENE FREMDSTOFFPARTIKEL IN DEN PROBEN	71
TABELLE 23: TROCKENSUBSTANZ DER PROBEN	72
TABELLE 24: EINGEWOGENE MASSEN AN KOMPOST (TROCKEN)	73
TABELLE 25: ZEITDAUER UND WASSERVERBRAUCH DER SIEBDURCHGÄNGE	73
TABELLE 26: GEWOGENE FRAKTIONEN AUF DEN SIEBEN DER PROBEN	73
TABELLE 27: GEFUNDENE FREMDSTOFFPARTIKEL IN DEN PROBEN	74
TABELLE 28: MATERIALLISTE DER VERWENDETEN GERÄTE INKLUSIVE BEZEICHNUNG	XXIV

1 EINLEITUNG

In den folgenden Abschnitten wird auf die Thematik der Arbeit eingegangen sowie die Ziele und die Herangehensweise erläutert.

1.1 Ausgangslage

Kunststoffe, die in vielen Bereichen eingesetzt werden, finden sich auch in den Umweltmedien wieder. In Deutschland wurden im Jahr 2017 rund 12,6 Millionen Tonnen Kunststoffe aus Primärrohstoffen zu werkstofflichen Anwendungen, wie zum Beispiel Verpackungen, verarbeitet. [1]

Viele dieser Kunststoffe gelangen ungeplant in die Umwelt. Beispiele sind Plastikinseln in Meeren, Kunststoffabfälle in Flüssen, Wäldern oder auf Straßen. Sind diese Kunststoffe in die Umwelt gelangt, verbleiben sie aufgrund ihrer hohen Persistenz über lange Zeit dort. Wetterbedingungen wie Wind und (Ab-)Wasser oder Transport durch Tiere verteilen die Kunststoffabfälle in der Umwelt und unterliegen Abbauprozessen.

Durch die Fragmentierung von Kunststoffteilen in Makro- und Mikroplastik erhöhen sich die Partikelzahlen und Reichweiten der Verteilung der Kunststoffe. Im Gegensatz zu den Bereichen Gewässer und Ozeane ist der Wissensstand zum Vorkommen von Kunststoffen im Boden deutlich geringer. Bislang gibt es nur wenige Untersuchungen oder Aussagen, die Einträge von Kunststoffen aus unterschiedlichen Quellen z.B. in Ackerboden oder Kompost quantifizieren bzw. abschätzen. [2] [3]

Eine international normierte Definition der Größe von Mikroplastik existiert zurzeit nicht. Eine gängige Definition in vielen Veröffentlichungen legt Mikroplastikpartikel als Partikel mit einem Größendurchmesser kleiner als 5 mm fest. Ebenso gibt es keine einheitliche Methodik zur Untersuchung von Kompost auf Fremdstoffe und Mikroplastik. Dadurch sind verschiedene Studien und deren Untersuchungsergebnisse kaum vergleichbar und eine abschließende Bewertung über mögliche Auswirkungen von Mikroplastik ist nur eingeschränkt möglich.

1.2 Ziele

Vorrangiges Ziel der Masterthesis ist die Quantifizierung von Fremdstoffen und Mikroplastikpartikeln im Kompost. Dazu wird eine Untersuchungsmethode entwickelt.

Die Herkunft der Fremdpartikel wird erläutert sowie die negativen Auswirkungen auf die Umwelt und Lebewesen beschrieben. Ein weiteres Ziel ist es, einen ganzheitlichen Ansatz zur Sortenreinheit von Bioabfällen aufzuzeigen. Motivation ist die nachhaltige Minderung von Umweltbelastungen durch die Reduzierung der Fremdstoffe an der Quelle.

1.3 Arbeitsschritte und Untersuchungsmethoden

In Kapitel 2 wird ein Überblick zu der Thematik Fremdstoffe und Mikroplastik in Kompost gegeben. Eine umfangreiche Literaturrecherche zu bisherigen Untersuchungen wird zusammengefasst. Zu Beginn wird eine Definition und Einteilung von Mikroplastik vorgenommen. Es folgt der Eintrag und die Verteilung der Partikel in der Umwelt. Die Auswirkungen auf Biota und den Menschen werden diskutiert. Die bekannten Untersuchungsmethoden für Mikroplastik werden vorgestellt und einige ausgewählte Studien mit besonderer Relevanz zusammengefasst. Als Abschluss der Literaturrecherche werden die rechtlichen Grundlagen zu Kunststoffen und Fremdstoffen in Kompost beschrieben.

In Kapitel 3 wird auf Grundlage der Literaturrecherche eine Methodik zur Separation von Fremdstoffen und Mikroplastik zwischen 1 und 5 mm Partikelgröße aus der organischen Substanz von Kompost erläutert. Ein Bestandteil der Methodik sind Tests zur Wiederfindungsrate mit industriell gefertigten Pellets sowie gefundenen Mikroplastikpartikeln.

Im Kapitel 4 wird die Methodik an Kompostproben aus einer Kompostierungs- und einer Vergärungsanlage angewendet. Die Probenahmen an den Anlagen werden beschrieben sowie die Ergebnisse der Untersuchungen.

2 STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

2.1 Begriffe und Definitionen

In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick über einige Definitionen von Mikroplastikpartikeln (MPP) gegeben sowie eine Einteilung nach der Herkunft der Partikel vorgenommen. Des Weiteren werden die Grundlagen der Bioabfallbehandlung dargestellt.

2.1.1 Definition / Einteilung von Mikroplastik

Mikroplastik (MP) wurde schon in den 70er Jahren in der Umwelt entdeckt. [4] Jedoch wurde erstmals 2008 der Begriff „Mikroplastik“ von der „National Oceanic and Atmospheric Administration“ (NOAA) als Kunststoffteilchen mit einem Teilchendurchmesser kleiner als fünf Millimeter (mm) definiert. [5]

Aktuell werden Kunststoffteilchen zwischen 1 und 1000 Mikrometer (μm) als „Mikroplastik“ bezeichnet. Bei Partikeln zwischen 1 und 5 mm Partikeldurchmesser wird von „großem Mikroplastik“ gesprochen. [6] In einer Stellungnahme der Bundesregierung zu „Mikroplastik – Gefahr für Mensch und Umwelt“ wird diese Definition ebenfalls genutzt. [7] Unterhalb von 1 mm ist eine weitere Klassifizierung von Mikroplastik sinnvoll, um eine bessere Bewertung von möglichen Auswirkungen auf die Umwelt oder eine Vereinfachung bei der analytischen Nachweisbarkeit zu erreichen. Braun et. al. schlägt folgende Einteilung vor: 1.000 - 500 μm , 500 - 100 μm , 100 - 50 μm , 50 - 10 μm , 10 - 5 μm , 5 - 1 μm . [6]

Eine Studie des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) teilt Mikroplastik aufgrund der Entstehungsart in Kategorien ein. [4] Es gibt primäres und sekundäres Mikroplastik. [8] Primäres Mikroplastik ist wiederum in Typ A und Typ B gegliedert. Kunststoffpartikel vom Typ A werden gezielt für unterschiedliche Zwecke industriell hergestellt, z.B. für den Einsatz in Kosmetikprodukten oder als Lasersinterpulver für den 3D-Druck. Mikroplastik, welches bei der Nutzung von Plastikartikeln entsteht, wird der Kategorie primär Typ B zugeordnet. Deren Entstehung ist häufig nur schwer vermeidbar. Beispiele sind der Reifenabrieb, beim Waschen freigesetzte synthetische Fasern oder die Verwitterung von Farben.

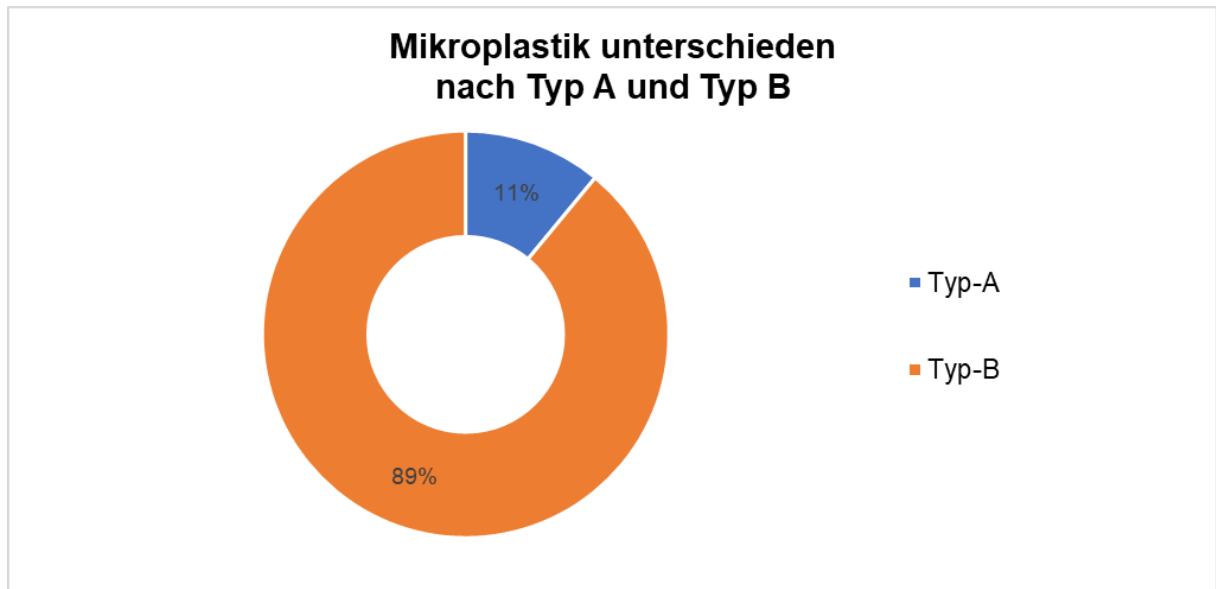


Abbildung 1: Anteile an primärem Mikroplastik unterschieden nach Typ A und Typ B (angelehnt an [4])

Prozentual betrachtet spielt Typ B eine sehr viel entscheidendere Rolle. 89 % des Mikroplastiks werden zu dieser Kategorie gezählt. [4] Dies ist in folgender Abbildung 1 grafisch verdeutlicht.

Sekundäres Mikroplastik entsteht durch Verwitterung und Fragmentierung von Makroplastik, das in die Umwelt gelangt ist – beispielsweise durch wilde Müllablagerungen und Littering¹ gelangen Kunststoffe in die Umwelt. [4]

Die Einteilung in primäres und sekundäres Mikroplastik ist zum einen wichtig für die Beurteilung der Wirkung in der Umwelt. Zum anderen lässt eine Unterscheidung in primäres und sekundäres Mikroplastik eine Schlussfolgerung auf die Entstehungsquelle zu. Bei der Entstehung von sekundärem Mikroplastik bildet sich beispielsweise durch UV-Einstrahlung auf den Oberflächen des Makroplastiks eine poröse aufgeraute Fläche. Diese bietet eine Haftfläche für mögliche Umweltschadstoffe. [9]

¹ Wegwerfen oder Liegenlassen von Abfällen im öffentlichen Raum, ohne die dafür vorgesehenen Abfalleimer zu verwenden. [50]

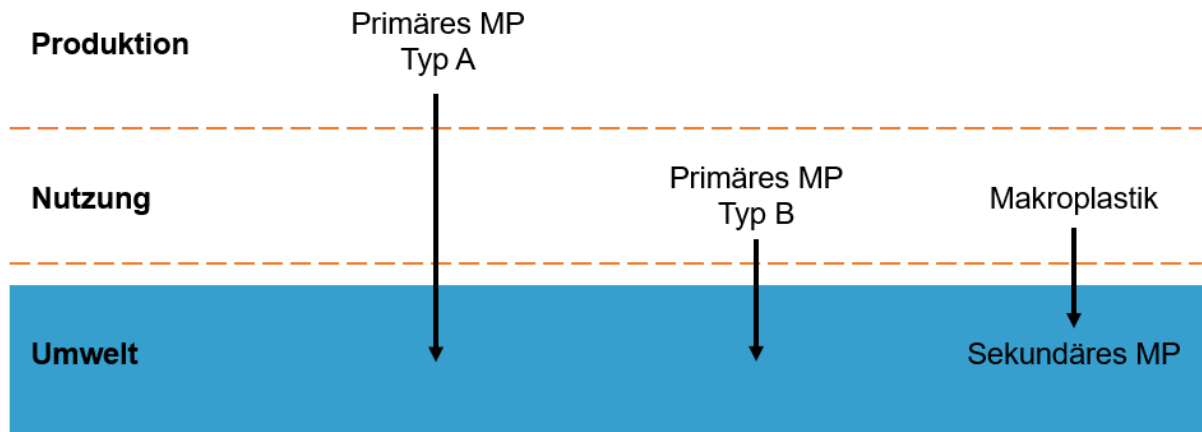


Abbildung 2: Zusammenhang der Herkunft des Plastiks mit der Verantwortung zur Vermeidung [4]

Abbildung 2 setzt die Herkunft des Plastiks mit der Verantwortung zur Vermeidung in einen Zusammenhang. Die Verantwortung für die Entstehung von primärem Mikroplastik liegt direkt bei Typ A und indirekt bei Typ B auf Seiten des Herstellers und der Produktion. Wie bereits beschrieben, ist die Vermeidung von Typ B-Mikroplastik nur schwer erreichbar und erfordert Innovationen. „Die Freisetzung von primärem Mikroplastik Typ A kann intendiert, bewusst in Kauf genommen oder durch einen Unfall verursacht sein“ [4] und ist somit vermeidbar. Ebenso vermeidbar (oder reduzierbar) ist die Entstehung von sekundärem Mikroplastik aus Makroplastik. Die Verantwortung wird vor allem durch den Konsumenten getragen. Ein wichtiger Ansatzpunkt sind Anreize, die vom Staat zur Vermeidung von Littering und wilden Müllablagerungen geschaffen werden sollten. [4]

Eine detailliertere Beschreibung der Quellen und der Auswirkungen von Mikroplastik in der Umwelt und speziell in Kompost erfolgt in den folgenden Kapiteln.

2.1.2 Biologische Abfallbehandlung

2.1.2.1 Allgemeines

Verfahren

Laut der Studie „Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung“ des Umweltbundesamtes [10] gibt es 2008 etwa 1000 Kompostierungsanlagen und 85 Vergärungsanlagen. Verarbeitet werden Bioabfälle aus Haushalten und Gewerbe sowie Garten- und Parkabfälle. 46 % der Verbraucher steht eine Biotonne zur Verfügung, 56 % können oder wollen Bioabfall

nicht getrennt sammeln. Durch eine stärkere Verbreitung der Biotonne könnten ca. zwei Millionen Tonnen mehr Bioabfälle gesammelt werden, wodurch der Restmüll bis zu einem Drittel reduziert werden könnte. Dies hätte eine erleichterte Behandlung des Restmülls aufgrund geringerer nasser Anteile zur Folge. Als Ergebnis fasst die Studie zusammen, dass eine getrennte Erfassung und Verwertung von Bioabfällen umweltfreundlicher ist als eine thermische Verwertung oder eine mechanisch-biologische Behandlung. Voraussetzung für die ökologische Wiederverwertung ist eine Behandlung der Bioabfälle nach Stand der Technik und eine möglichst hochwertige Trennung der Bestandteile. Eine Vergärung ist zu bevorzugen, wenn es technisch möglich ist. Das entstehende Biogas kann in Strom umgewandelt und beispielsweise zum Betreiben der Anlage genutzt werden. Der Gärrest als flüssiges, oder nach Kompostierung als festes Gärprodukt, kann als Düngemittel vermarktet werden. Es entsteht eine Kaskadennutzung: erst die Nutzung des Energiegehaltes und anschließend der stofflichen Eigenschaften des Bioabfalls. [10]

Es gibt zwei Verfahren der biologischen Abfallbehandlung, die aerobe und die anaerobe Methodik. Das erste Verfahren ist die Kompostierung. Diese Variante findet unter aeroben Bedingungen (mit Sauerstoff) statt. Produkte sind organische Substanz, Wasser und Sauerstoff. Das zweite Verfahren ist die Vergärung. Im anaeroben Milieu (ohne Sauerstoff) entstehen organische Substanz, Wasser und Wärme. Ebenso ist es möglich, beide Verfahren zu kombinieren (aerob/anaerob). [11]

Abbildung 3 zeigt die verschiedenen Verwertungswege des Bioabfalls.

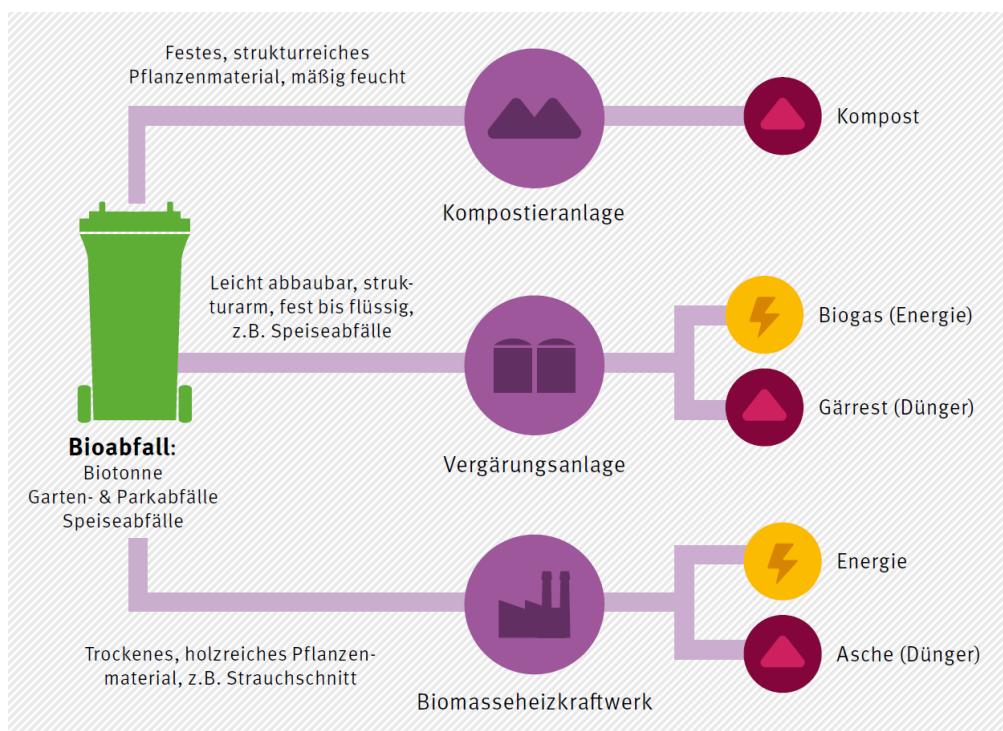


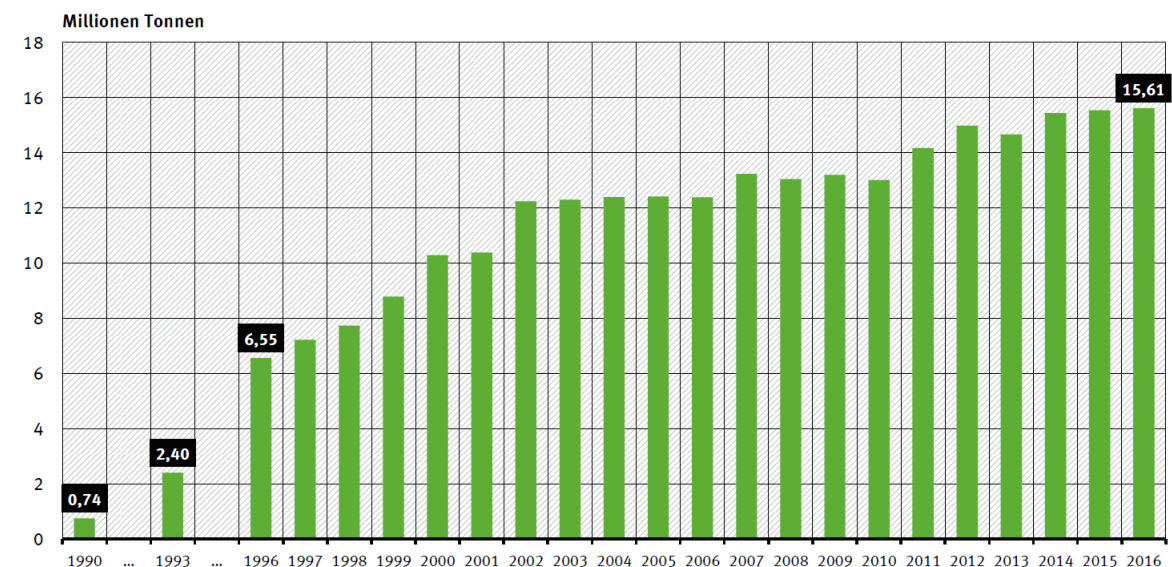
Abbildung 3: Verwertungswege des Bioabfalls [12]

Mengen

In Deutschland erfolgt seit ca. 34 Jahren eine getrennte Sammlung von biogenen Abfällen mit anschließender Kompostierung oder Vergärung. Die Menge an verwertbaren Bioabfällen ist stetig gestiegen. In folgender Abbildung 4 sind die Mengen in den Jahren von 1990 bis 2016 graphisch aufgetragen. Das Statistische Bundesamt gibt an, dass aus diesen biogenen Abfällen etwa 1,6 Mio. t Bioabfallkompost, 2,0 Mio. t Grünabfallkompost, 4,1 Mio. t Gärreste und kompostierbare Gärreste sowie 0,3 Mio. t Klärschlammkomposte erzeugt und anschließend an verschiedene Nutzer weitergegeben wurden. [12]

In Abbildung 4 sind die bundesweit an Bioabfallbehandlungsanlagen angelieferten biologischen Abfälle von 1990 bis 2016 graphisch dargestellt.

An Bioabfallbehandlungsanlagen angelieferte biologisch abbaubare Abfälle*



* zum Beispiel Bioabfälle aus Haushalten, Gärten, Parkabfälle und Landwirtschaftsabfälle

Quelle: Statistisches Bundesamt, Fachserie 19 Umwelt, R. 1 Abfallentsorgung, verschiedene Jahrgänge; Abfallentsorgung 2016, Wiesbaden, Stand 06/2018

Abbildung 4: Bundesweit an Bioabfallbehandlungsanlagen angelieferte biologisch abbaubare Abfälle von 1990 – 2016 [12]

Zusammensetzung des Ausgangsmaterials der biologischen Behandlung

Voraussetzung für die biologische Behandlung ist die getrennte Erfassung der Bioabfälle zur hochwertigen Produktion von Komposten und Gärrückständen. Das Ausgangsmaterial wird durch die Herkunft, die Zusammensetzung und Güte sowie den Verlauf des Abbauprozesses und die Marktfähigkeit der Produkte bestimmt.

In Privathaushalten findet sich eine starke Schwankung in der Zusammensetzung. Ca. 90 % besteht aus organischem Anteil, 2-4 % aus Papier und Pappe, 3-8 % sind Störstoffe und 0,5-2 % Glas und Metalle. [13] Unter organischen Abfällen sind unter anderem Gartenabfälle (Grüngut), Obst-, Gemüse- und Speisereste und schnell abbaubares Papier (Hygieneartikel, Zeitungspapier, Kaffeefilter) zusammengefasst.

Abfälle aus dem öffentlichen Bereich fallen aus der Unterhaltung öffentlicher Flächen an (Straßenbegleitgrün, Laub, Gehölz- und Grasschnitt). Die Behandlung von Gewerbeabfällen aus Gastronomie und Großküchen, Märkten und Lebensmitteleinzelhandel, welche unter die Verordnung EG 1069/2009 fallen, muss auch die Hygieneanforderungen an tierische Nebenprodukte erfüllen.

Eine konstante Zusammensetzung mit wenigen Störstoffen weisen biologische Abfälle aus Industrie und Landwirtschaft auf. Unter diesem Sammelbegriff werden pflanzliche Erzeugnisse wie überproduzierte Feldfrüchte, Stroh, Gras, etc. und tierische Erzeugnisse wie Gülle oder Abfälle aus Schlachtereien/Fleischereien (erst nach der Hygienisierung biologisch behandelt) zusammengefasst. [13]

Abbildung 5 zeigt die Zusammensetzung der bundesweit in den Behandlungsanlagen erfassten Bioabfällen 2016.

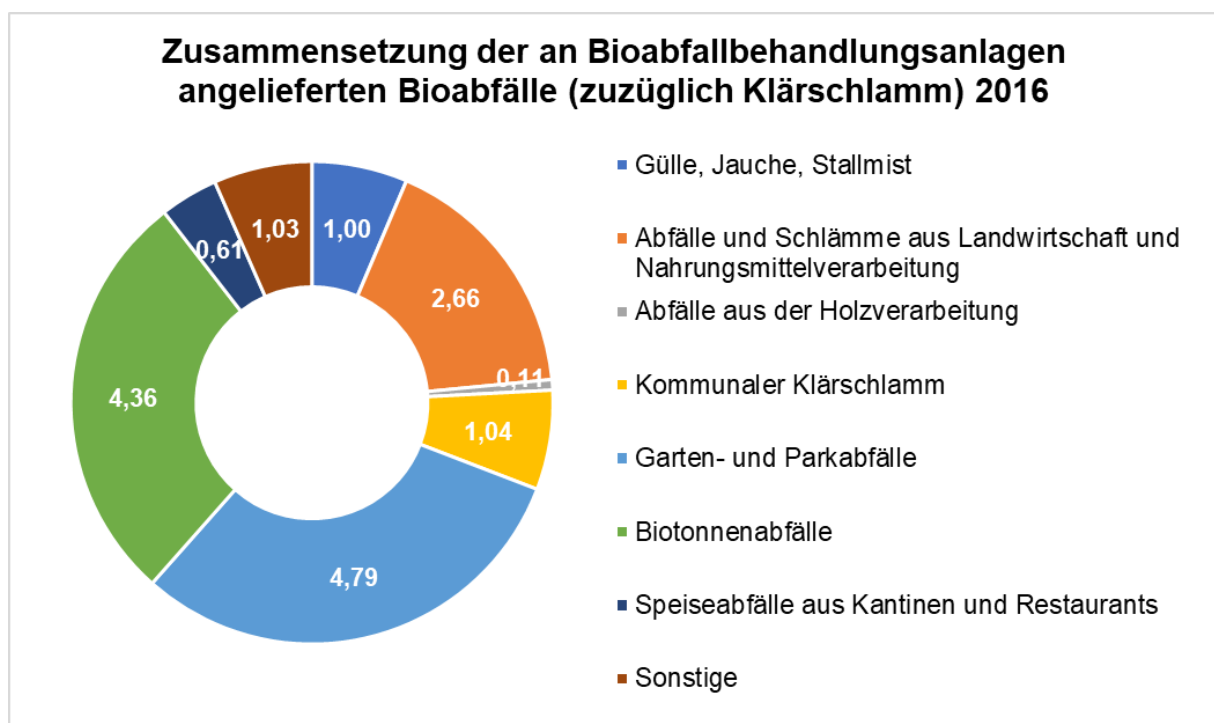


Abbildung 5: Zusammensetzung der bundesweit an Bioabfallbehandlungsanlagen angelieferten Bioabfälle 2016 (angelehnt an [12])

Sammlung / Transport / Aufbereitung für die biologische Behandlung

Unter dem Begriff Sammlung werden das Bereitstellen und das Leeren der Sammelgefäße für biologische Abfälle verstanden. Der Transport beschreibt die Beförderung der gesammelten Abfälle von der Anfahrtstelle bis zur Übergabe in einer Behandlungsanlage.

Die Aufbereitung für die biologische Behandlung hat mehrere Ziele. Zum einen wird eine Optimierung der Startbedingungen für die Abbauprozesse angestrebt. Zum anderen werden unerwünschte Stoffe entfernt, um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Weiterhin trägt eine Abtrennung von Störstoffen zur Verbesserung der Produktqualität bei.

Störstoffe können mittels Handlese, Siebung, Eisenmetallabscheidung oder Schwimm- Sink-Trennung entfernt werden. Der verbleibende Bioabfall wird vor der weiteren Behandlung zerkleinert, gemischt und gegebenenfalls homogenisiert. [13]

Ziele der biologischen Verwertung

Ziel der biologischen Abfallbehandlung ist die stoffliche Nutzung des Wertstoffpotenzials organischer Abfälle im Rahmen der Ressourcenschonung und des Stoffkreislaufes. [11] Der organische Dünger soll vorrangig für die Landwirtschaft verwendet werden und dient der Rückführung von Pflanzennährstoffen. Weitere Anwendungen sind die Substitution von Torf bei der Herstellung von Blumenerden und anderen Substraten sowie die Erzeugung von Biogas. [14] Durch die stoffliche Verwertung wird eine Bodenverbesserung erreicht, da die Produkte den Humusgehalt der Böden stabilisieren bzw. verbessern. Durch die Vermeidung der Deponierung von organischen Abfällen werden daraus resultierende umweltschädliche Auswirkungen (Methanemissionen) verhindert. [15]

2.1.2.2 Kompostierung

Die Kompostierung ist ein biologisches Abbauprozess für organische Abfälle. Das Verfahren findet unter aeroben Bedingungen statt, der Abbau erfolgt unter Sauerstoffzufuhr. Mikroorganismen und Kleinlebewesen zersetzen das Ausgangsmaterial. Als Endprodukt entstehen Kompost, ein organischer Pflanzennährstoff und ein Humuslieferant.

Seit Mitte der 1980er Jahre wird die Kompostierung getrennt erfasster organischer Abfälle großtechnisch betrieben.

Die Verfahren unterscheiden sich nach ihrer Bauweise (offen, überdacht, gekapselt), der Art der Belüftung und der Zeitdauer der Intensivrotte (Kompostreife). Beim Reifekompost als Endprodukt der Intensivrotte sind Haupt- und Nachrotte integriert. Ist ein hygienisierter Frischkompost das Ende der Intensivrotte, kann zur Erreichung eines höheren Rottegrades eine Nachrotte erfolgen. Folgende Abbildung 6 zeigt eine mögliche Einteilung von Kompostierungsverfahren.

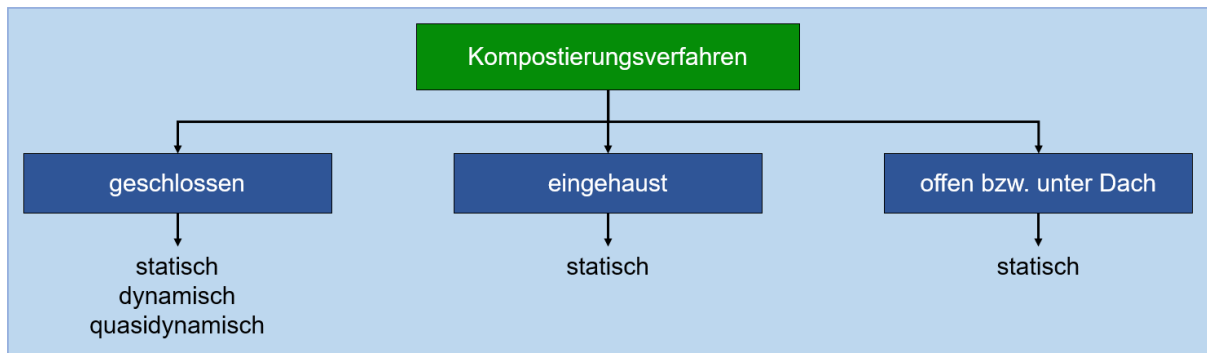


Abbildung 6: Überblick über mögliche Kompostierungsverfahren (angelehnt an [16] [10])

In Deutschland gibt es zurzeit etwa 1.000 Kompostierungsanlagen. Die eine Hälfte behandelt ausschließlich Grünabfälle, die andere Hälfte kompostiert sowohl Bio- als auch Grünabfälle. Die Gesamtkapazität beträgt mehr als 10 Millionen Tonnen. Die derzeit erfassten Mengen an Bio- und Grünabfällen sind etwa 9 Millionen Tonnen. [16] In Deutschland wird am häufigsten mit 61 % die Mietenkompostierung betrieben. [10] Zur Gewährleistung einer hohen Produktqualität wurde die Gütesicherung Kompost (RAL-GZ 251) eingeführt.

Komposte sind Bodenverbesserer in der Landwirtschaft, dienen der Rekultivierung und können zur Herstellung von Substraten und fertigen Endmischungen verwendet werden.

Abbildung 7 zeigt die verschiedenen Absatzbereiche der RAL-gütesicherten Komposte im Jahr 2017.

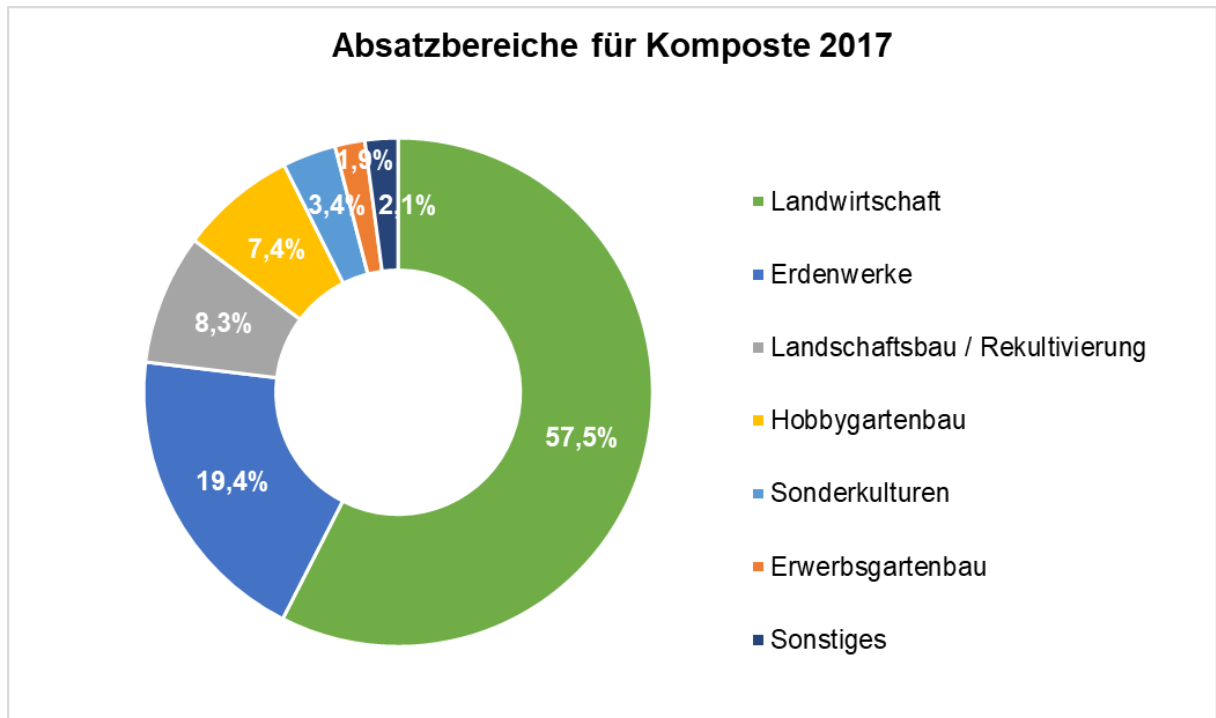


Abbildung 7: Absatzbereiche für RAL-gütesicherte Komposte 2017 (angelehnt an [12])

2.1.2.3 Vergärung

Die Vergärung ist eine weitere Variante für ein biologisches Abbauverfahren organischer Abfälle. Im Gegensatz zu Kompostierungsanlagen können flüssige oder pastöse Stoffe verwertet werden. Das Verfahren findet unter anaeroben Bedingungen statt, der Abbau erfolgt unter Sauerstoffabschluss. Als Endprodukte entstehen ein nährstoffreicher Gärückstand und Biogas. Letzteres kann in der Strom- und Wärmeproduktion eingesetzt werden. Der nährstoffreiche Gärückstand ist flüssig oder fest und findet in der Landwirtschaft oder verwandten Bereichen als Düngemittel Anwendung.

Für dieses Verfahren weniger geeignet sind Holz und andere ligninhaltige Materialien wie Stroh oder Langgras, da die anaeroben Mikroorganismen diese nur bedingt abbauen können. Geeignet sind getrennt erfasster Bioabfall und Speisereste sowie der krautige Anteil des Grünabfalls.

Eine Einteilung der Vergärungsverfahren erfolgt nach der Betriebsweise in kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren. In folgender Tabelle sind die Unterschiede beider Verfahren dargestellt und in Abbildung 8 graphisch verdeutlicht.

Tabelle 1: Unterschiede zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Vergärungsverfahren (Inhalt aus [16])

kontinuierliche Verfahren	diskontinuierliche Verfahren
<i>Kontinuierlicher Betrieb:</i> Bioabfall wird automatisch kontinuierlich in den Gärreaktor (Fermenter) gegeben	<i>Batchbetrieb:</i> Fermenter per Radlader befüllt, nach mehreren Wochen entleert, erneut befüllt
<i>kontinuierliche Biogasproduktion:</i> mit konstanter Qualität	<i>nicht kontinuierliche Biogasproduktion:</i> durch Parallelschaltung mehrerer zeitversetzt arbeitender Fermenter weitestgehend zu kompensieren
<i>Vorteil gegenüber diskontinuierlichen Verfahren:</i> höhere Raum-Zeit-Ausbeute → geringeres Reaktorvolumen besser zu automatisieren	<i>Vorteil gegenüber kontinuierlichen Verfahren:</i> technisch einfachere Reaktorsysteme

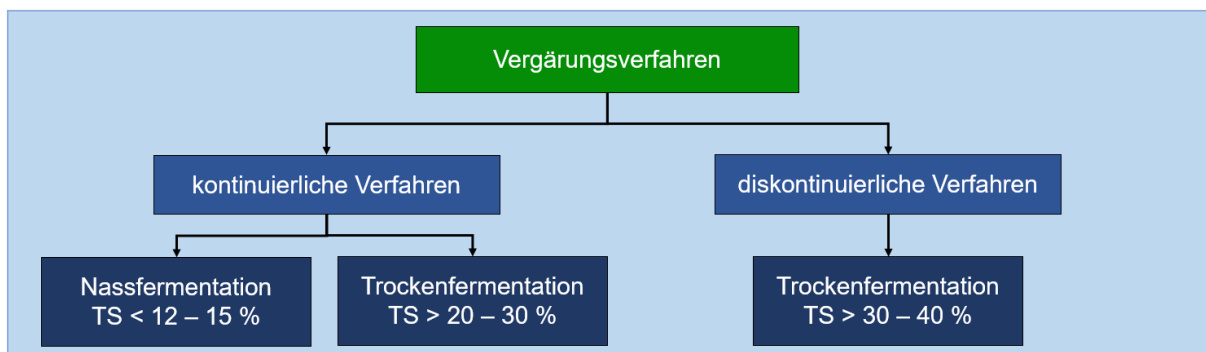


Abbildung 8: Überblick über mögliche Vergärungsverfahren (angelehnt an [16], S.14)

In Deutschland gibt es mehrere tausend Vergärungsanlagen. [16] Die meisten davon sind in der Landwirtschaft eingesetzte sogenannte „NawaRo-Anlagen“ (nachwachsende Rohstoffe). Zur Vergärung werden hier ausschließlich Gülle- und Energiepflanzen verwendet. Die Vergärungskapazität für Bioabfälle befindet sich noch im Aufbau. 2018 waren etwa 86 reine Bioabfallvergärungsanlagen im Betrieb. [17]

Die Ausbeute an Biogas beträgt pro Tonne Bioabfall ungefähr 80-140 m³. Davon sind 50 - 65 % Methangas, der Energiegehalt entspricht dabei 50-80 m³ Erdgas. Meist erfolgt eine direkte Umwandlung des Biogases über ein Blockheizkraftwerk (BHKW) in Strom und Wärme. Pro Tonne Input werden sowohl 200-300 kWh Strom als auch Wärme erzeugt (Beispiel: 20.000

Tonnen Bioabfall pro Jahr: BHKW mit einer Leistungsklasse von 600 kW kann betrieben werden → erzeugt Strom für 1.000-1.500 Haushalte). Da die dezentrale Nutzung der Wärme häufig nicht oder nur erschwert umsetzbar ist, ist eine weitere Möglichkeit das Biogas auf Erdgasqualität aufzubereiten, um es ins Erdgasnetz einzuspeisen. [16]

Der Gärrückstand kann in flüssiger Form in der Landwirtschaft als Düngemittel eingesetzt und in fester Form als Kompost vermarktet werden.

2.2 Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt

In den folgenden Kapiteln werden einige Eintragsquellen von Mikroplastik in die Umwelt dargestellt. Weiterhin wird auf die Problematik der Sortenreinheit von Bioabfällen und damit von Fremdstoffen (speziell Kunststoffe) in Kompost genauer eingegangen.

2.2.1 Eintragsquellen von Mikroplastik

Die Entstehung von primärem Mikroplastik ist hauptsächlich in drei große Bereiche aufgeteilt. Emissionen aus dem produzierenden Gewerbe liegen mit 14 % deutlich hinter den Emissionen aus privatem Konsum und gewerblichen Endanwendern mit 24 %.

Der mit Abstand größte Anteil an Mikroplastik wird mit 62 % im Bereich Verkehr, Infrastruktur und Gebäude emittiert. [4] In Abbildung 9 ist die Entstehung des primären Mikroplastiks nach Bereichen aufgeteilt nochmals graphisch dargestellt.

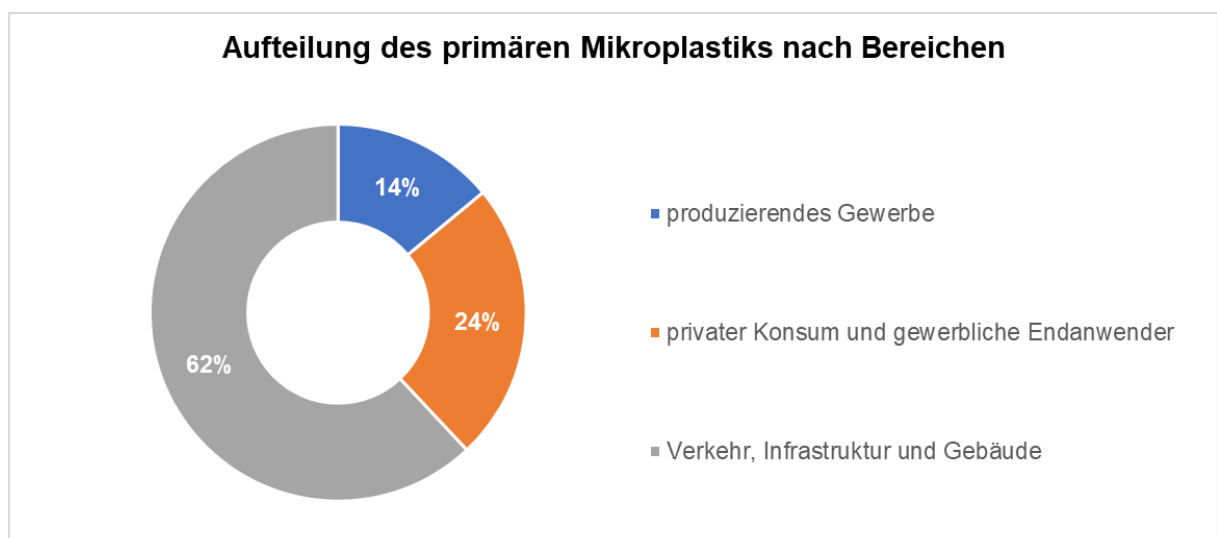


Abbildung 9: Aufteilung des primären Mikroplastiks nach Bereichen (angelehnt an [4])

Einträge von Kunststoffen in die terrestrische Umwelt sind nicht umfangreich erforscht und erst recht nicht quantitativ erfasst. [14]

Schätzungen für die gesamten Mikroplastikemissionen in Deutschland pro Jahr ergeben 330.000 t/a. Errechnet wurde dieser Wert über Einträge pro Kopf von verschiedenen Quellen. Eine Studie von „Fraunhofer UMSICHT“ ermittelte 74 potenziell relevante Quellen und quantifizierte davon 51. Das Ergebnis dieser Abschätzung /Hochrechnung ergibt eine Emission von ungefähr 4 kg Mikroplastik pro Einwohner und Jahr. [4]

Die zehn häufigsten Quellen sind in folgender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 2: Die zehn häufigsten Quellen von Mikroplastik in der Umwelt mit Emissionen pro Einwohner und Jahr (angelehnt an [4])

Nummer	Quelle	Emissionen $\left[\frac{g}{E \cdot a}\right]$
1	Abrieb Reifen	1.228,5
2	Freisetzung bei der Abfallentsorgung	302,8
3	Abrieb von Bitumen in Asphalt	228,0
4	Pelletverluste	182,0
5	Verwehungen von Sport- und Spielplätzen	131,8
6	Freisetzung auf Baustellen	117,1
7	Abrieb Schuhsohlen	109,0
8	Abrieb Kunststoffverpackungen	99,1
9	Abrieb Fahrbahnmarkierungen	91,0
10	Faserabrieb bei der Textilwäsche	76,8
Summe		2.566,1

Primäres Mikroplastik wird industriell eingesetzt. Beispiele sind die Verwendung in u.a. Wasch-, Reinigungs- und Pflegemittel sowohl in privaten Haushalten als auch in der Industrie, als Strahlmittel zum Entgraten von Oberflächen², in technischen Anwendungen wie Kunststoffwachse oder in der Medizin. In letzterem Anwendungsgebiet fungieren die Mikroplastikpartikel als Vektoren für Arzneimittelwirkstoffe. Das bedeutet, dass die Wirkstoffe in Hohlräume eingebracht werden und im Körper langsam aus ihnen heraus diffundieren.

² Glätten von scharfen, bei einem Bearbeitungs- oder Herstellungsvorgang entstandenen Kanten, Auffaserungen oder Splintern eines meist metallischen Werkstückes, hauptsächlich in der metallverarbeitenden Industrie benutzt

In Tabelle 2 ist zu sehen, dass der Reifenabrieb die häufigste Quelle von Mikroplastik in der Umwelt ist. Reifen bestehen aus Elastomeren. Zur Herstellung von Reifen werden hauptsächlich Styrol-Butadien-Kautschuk und Butadien-Kautschuk verwendet. Die Konzentration in Bodenproben nahe der Straße ist abhängig vom Verkehrsaufkommen, dem Abstand zur Straße sowie den Bodeneigenschaften. Die Partikelgröße beträgt etwa 65 µm bei Pkw-Reifen und 80 µm bei Lkw-Reifen. Die Angaben zu Anteilen im Feinstaub aus dem Reifenabrieb variieren sehr stark in verschiedenen Studien zwischen 0,5 %, 10 % oder 5-30 %. Geschätzt werden in Deutschland 111.420 Tonnen Gesamtabriebmengen pro Jahr, davon sind ca. 39 % Kunststoffe. Somit ergibt sich rechnerisch eine Freisetzung von 43.454 t/a Mikroplastik an Reifenabrieb. [4]

Der viel diskutierte Eintrag von Mikroplastik durch Kosmetika liegt mit 19 g/E*a nur auf Platz 17 der Studie. [4] Durch Mikroplastik in Kosmetika wird die seidige Struktur, die Fließfähigkeit oder die Stabilität der Produkte beeinflusst. Die häufigste Anwendung jedoch ist der „Peeling-Effekt“. Für die abrasive Wirkung werden vom Hersteller eher scharfkantige, kleine, unlösliche und feste Kunststoffpartikel mit einer Größe von ca. 200 – 380 µm hinzugefügt. [18] Gemessene Extremwerte sind 4 µm bzw. 1200 µm. [9] Da die Formen der Mikroplastikpartikel eine sehr hohe Vielfalt aufweisen, wird eine Unterscheidung zu sekundärem Mikroplastik erschwert. Hauptsächlich eingesetzte Kunststoffe in Kosmetika sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET), Polyamid (PA), Polytetrafluorethen (PTFE, auch „Teflon“), Polystyrol (PS), Polyurethan (PUR) und Co-Polymere. 2012 wurden in Europa 4.360 Tonnen Mikrokunststoffe in Duschgels und Peelings verwendet. [9] In die Umwelt gelangen Partikel aus sämtlichen Körperpflegeprodukten vorwiegend nach direkter Anwendung (z.B. Duschgel oder Zahnpasta) durch den Abfluss und die Kanalisation.

Durch fehlendes Umweltbewusstsein wird Plastik in der Umwelt emittiert. Littering trägt entscheidend zur Mikroplastik-Problematik bei. Witterung, UV-Strahlung oder mechanische Beanspruchung fragmentieren das Makroplastik zu sekundärem Mikroplastik. Die genauen Mengen können durch gesammelte Kunststoffe im Straßenkehrsicht, durch Rechengut aus Kläranlagen oder durch Flurreinigungsaktionen nur abgeschätzt werden. Die Zuordnung des Mikroplastiks zum Makroplastik ist kaum möglich, da die Zerfallsmechanismen nicht zuzuordnen sind.

2.2.2 Fremdstoffe in Kompost

2.2.2.1 *Kunststoffe als Verunreinigungen in Bioabfällen*

Hochwertige Produkte der Bioabfallverwertung setzen sortenreine Ausgangsstoffe voraus. Dies gilt nicht nur im Bereich der Bioabfälle, sondern für alle Recyclingprodukte. Verantwortlich sind sowohl die Erzeuger, als auch die für die Erfassung und Entsorgung verantwortlichen Betriebe. Der Anteil an Fremdstoffen bestimmt die Sortenreinheit von Bioabfällen. Dazu zählen unter anderem Verunreinigungen durch Glas, Metall und Kunststoff. Durch hohe Fremdstoffgehalte erhöht sich der Aufwand für dessen Abtrennung deutlich, wodurch auch die Behandlungskosten steigen. Fremdstoffe, vor allem Mikroplastik, sind häufig noch im Endprodukt enthalten. Dadurch wird die Qualität gemindert und die Vermarktung kann gefährdet sein. Die separierten Fremdstoffe müssen gegebenenfalls teuer entsorgt werden. Insgesamt sinkt die Effizienz der Bioabfallverwertung mit steigendem Fremdstoffanteil. [19]

Wie in Kapitel 2.1.2.1 bereits beschrieben, werden pro Jahr in Deutschland etwa 15 Millionen Tonnen biogene Abfälle biologisch behandelt. Diese Abfälle stammen hauptsächlich aus Sammlungen von Garten- und Parkabfällen, dem Gewerbe sowie der getrennten Sammlung aus den privaten Haushalten. Mit der Steigerung der Gesamtmengen ist auch der Anteil an Verunreinigungen in Bioabfällen gestiegen. Kontaminationen des Bioabfalls durch Kunststoffe werden vor allem durch Fehlwürfe in der Getrenntsammlung verursacht. Dazu zählen auch die biologisch abbaubaren Kunststoffkompostbeutel. Diese werden vor der Behandlung (wie auch normale Plastikbeutel) aussortiert. Laut der Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) sind eine nachlassende Öffentlichkeitsarbeit sowie nicht identifizierbare punktuelle Eintragspfade von Fremdstoffen dafür verantwortlich. Folienkunststoffe sind im Mittel zu etwa 0,01 Gewichtsprozent (Gew.-%) in RAL-gütesicherten Komposten und Gärprodukten enthalten. In Einzelproben können die Gehalte trotzdem stark variieren. Der Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt durch Produkte der biologischen Abfallbehandlung beträgt ca. 0,2 % der Gesamtkunststoffeinträge.

Durch folgende Pfade gelangen Kunststoffe in Komposte und Gärprodukte:

Laut dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (§11, Absatz 1, Überlassungspflicht) sind Bioabfälle spätestens ab dem 01. Januar 2015 getrennt zu sammeln. [20] Diese Pflicht gilt auch für öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger (§20, Absatz 1, Entsorgungspflicht), indem entsprechende Getrenntsammlersysteme für Bioabfälle zur Verfügung gestellt werden. [21] Üblicherweise werden Bioabfälle über die Biotonne gesammelt. Enthalten sind meist organische Küchen- und Gartenabfälle. Die Inhalte der Biotonne werden auch als „Biogut“ bezeichnet. Kunststoffe in der

Biotonne werden z.B. durch fehlerhafte Nutzung der Biotonne verursacht und haben hauptsächlich folgenden Ursprung:

- Plastiktüten (auch biologisch abbaubare Bioplastikbeutel, die zum Sammeln verwendet und zusammen mit den Bioabfällen in die Biotonne entsorgt werden)
- Kunststoffverpackungen (mit Resten von Lebensmitteln)
- weitere Kunststoffprodukte (u.a. Kaffeekapseln, Milchdöschen, Blumentöpfe)
- Fehlwürfe

In der Kategorie Garten- und Parkabfälle werden Abfälle aus der öffentlichen Grünflächenpflege, aus privaten Gärten (Entsorgung nicht durch Biotonne, sondern durch Bündelsammlung oder Bringsysteme) sowie pflanzliche Abfälle aus dem Garten- und Landschaftsbau zusammengefasst. Diese separat erfassten Garten- und Parkabfälle werden als „Grüngut“ bezeichnet. Kunststoffe im Grüngut sind vor allem folgende:

- Kunststoffsäcke (nicht entleerte Säcke, in denen die Pflanzenabfälle transportiert werden)
- Pflanztöpfe sowie Materialien wie Schnüre, Klammern und Bindedrähte aus Kunststoff, die in Gärten verwendet werden

In Grüngut sind herkunftsbedingt weniger Kunststoffe enthalten als in Biogut. Dennoch ist es nicht immer frei von Kunststoffen, wie häufig angenommen wird.

Für gewerbliche Bioabfälle aus dem Einzelhandel oder der Nahrungsmittelverarbeitung gilt die Überlassungspflicht nicht. Die Erzeuger sind selbst für die Entsorgung verantwortlich. Dennoch gilt die Getrenntsammlungspflicht für Bioabfälle. (GewAbfV §3, Absatz 1, Nr. 7, [22]) Gewerbliche Bioabfälle sind vor allem Speisereste aus der Gastronomie sowie Kantinen und Großküchen, Rückstände aus der Herstellung von Lebensmitteln und überlagerte oder verdorbene Lebensmittel aus dem Handel. Diese werden häufig in Kunststoffverpackungen entsorgt, über die Gewerbeabfallsammlung getrennt erfasst und in der Regel in Biogasanlagen verwertet. [14] Jedes Jahr werden mehr als 750.000 t in Kunststoff verpackte Lebensmittelabfälle durch den Handel in den Abfall entsorgt. [23] Die Aufbereitung erfolgt meist in mehreren Stufen. Die Verpackungsmaterialien werden zunächst abgetrennt und in Wertstofffraktionen sortiert. Recyclbare Materialien, z.B. Papier, werden in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt. Anschließend werden die Verpackungsmaterialien zerrissen und von den organischen Bestandteilen getrennt. Die Lebensmittel werden biologisch und die Verpackungsmaterialien werden thermisch verwertet. [23]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei der biologischen Abfallbehandlung ein Großteil der Fremdstoffe abgetrennt werden kann. Dennoch ist eine vollständige Abscheidung nicht möglich. Vor diesem Hintergrund, zur Reduzierung von Aufbereitungskosten und zum

Aufrechterhalten einer hohen Produktqualität müssen Kunststoffe in Bioabfällen bereits bei der Sammlung vermieden werden. [24] Im folgenden Kapitel wird auf einige Maßnahmen für möglichst sortenreinen Bioabfall eingegangen.

2.2.2.2 Sortenreinheit von Bioabfällen gewährleisten

Der Vermeidung von Kunststoffeinträgen in den Stoffstrom Bioabfall kommt eine besondere Bedeutung zu. Entsprechende Maßnahmen für sauberen Bioabfall sind Teil des Systems der Getrennsammlung. Die Sammelsysteme können das Verhalten der Abfallerzeuger beeinflussen. So führen kleine Gefäßvolumina der Restabfalltonne dazu, dass die Biotonne ebenfalls vereinzelt zur Entsorgung des Restmülls genutzt wird. Folgende Maßnahmen können die Sortenreinheit von Bioabfällen unterstützen:

Kommunikation: Kontinuierliche Öffentlichkeitsarbeit ist ein wichtiger Bestandteil zur Bewusstseinsförderung der Konsumenten. [25] Einmalige Kampagnen sind nicht ausreichend. Die Bedeutung und Resultate der Kreislaufwirtschaft von Wertstoffen sollten regelmäßig erklärt werden. [24] Bei Bioabfall ist dies von besonderer Bedeutung, da das Bewusstsein für Bioabfall als Wertstoff nicht genügend ausgeprägt ist. Die Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit müssen an die jeweiligen Gegebenheiten der unterschiedlichen Sammelgebiete und Bevölkerungsstrukturen angepasst werden.

Vereinbarungen zur Sortenreinheit: Leistungsbeschreibungen zur Bioabfallerfassung und -behandlung sollten Angaben über die zu erwartende Sortenreinheit der Bioabfälle enthalten. Dazu werden möglichen Maßnahmen angegeben, die bei höheren Fremdstoffgehalten getroffen werden. Damit können Fremdstoffeinträge an der Quelle vermieden und Risiken in der Bioabfallbehandlung reduziert werden. [26]

Kontrolle: Um Maßnahmen zur Verbesserung der Sortenreinheit auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen, sind regelmäßige Kontrollen der Bioabfälle sinnvoll. Die Feststellung des Trennverhaltens der Bürger und die Identifikation der Verunreinigungen in Biotonnen können durch Stichproben in wechselnden Sammelgebieten erfolgen. Mögliche Methoden sind dabei Sichtkontrollen oder mechanische/elektronische Kontrollen. [25] Als direkte Gegenmaßnahme bei gefundenen Fremdstoffen kann auf dem Behälter ein Hinweis zum richtigen Trennverhalten angebracht werden. Bei wiederholten Verstößen gegen die Sortenreinheit bleibt der jeweilige Behälter stehen und muss separat entsorgt werden. Satzungsrechtliche Voraussetzungen müssen ggf. angepasst werden. Die Kosten werden im Entsorgungspreis berücksichtigt.

Abweisung von Anlieferungen: Sollten Bioabfälle erhöht mit Fremdstoffen belastet sein, ist eine Maßnahme die Abweisung von Anlieferungen. Dem Konsumenten sollte sein Fehlverhalten im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit transparent gemacht werden. Jeder einzelne Bürger kann zur Recycling- und Kreislaufwirtschaft beitragen. [19]

2.3 Verbreitungswege von Mikroplastik in der Umwelt

Je nach Eintragspfad gelangen Kunststoffpartikel in Oberflächengewässer, auf landwirtschaftlich genutzte Böden, auf Straßen und andere versiegelte Flächen. Die Partikel werden durch Winde oder abfließendes Niederschlagswasser verdriftet und durch die verschiedenen Umweltmedien Boden, Wasser und Luft verteilt. Die Transportprozesse sind stark abhängig von den Mikroplastikpartikeleigenschaften. Je nach Dichte, Form und Größe sind die Transportmechanismen unterschiedlich. [27] Polyolefine oder geschäumte Kunststoffe sind leichter als Wasser. Deswegen können sie vereinfacht von Niederschlägen transportiert werden. Im Gegensatz dazu sind vor allem Elastomere, Duroplaste und technische Thermoplaste schwerer und weisen zumeist höhere Dichten auf. Aufgrund hoher Dichten wird eine Sedimentierung begünstigt und die Fortbewegung in der Umwelt ist deutlich langsamer. Ein ähnliches Verhalten zeigen sehr feine Partikel, die zur Kohäsion neigen. [4]

Aufgrund der potentiellen Erosionsgefährdungen für Ackerböden lässt sich der Transport von Mikroplastikpartikeln durch Wind oder Wasser in Nord- und Süddeutschland unterscheiden. In Küstennähe in Norddeutschland ist der Wind entscheidend, während in den Gebirgen in Mittel- und Süddeutschland das Niederschlagswasser eine große Rolle beim Transport spielt. Die folgende Abbildung zeigt die Zusammenhänge graphisch. [28]

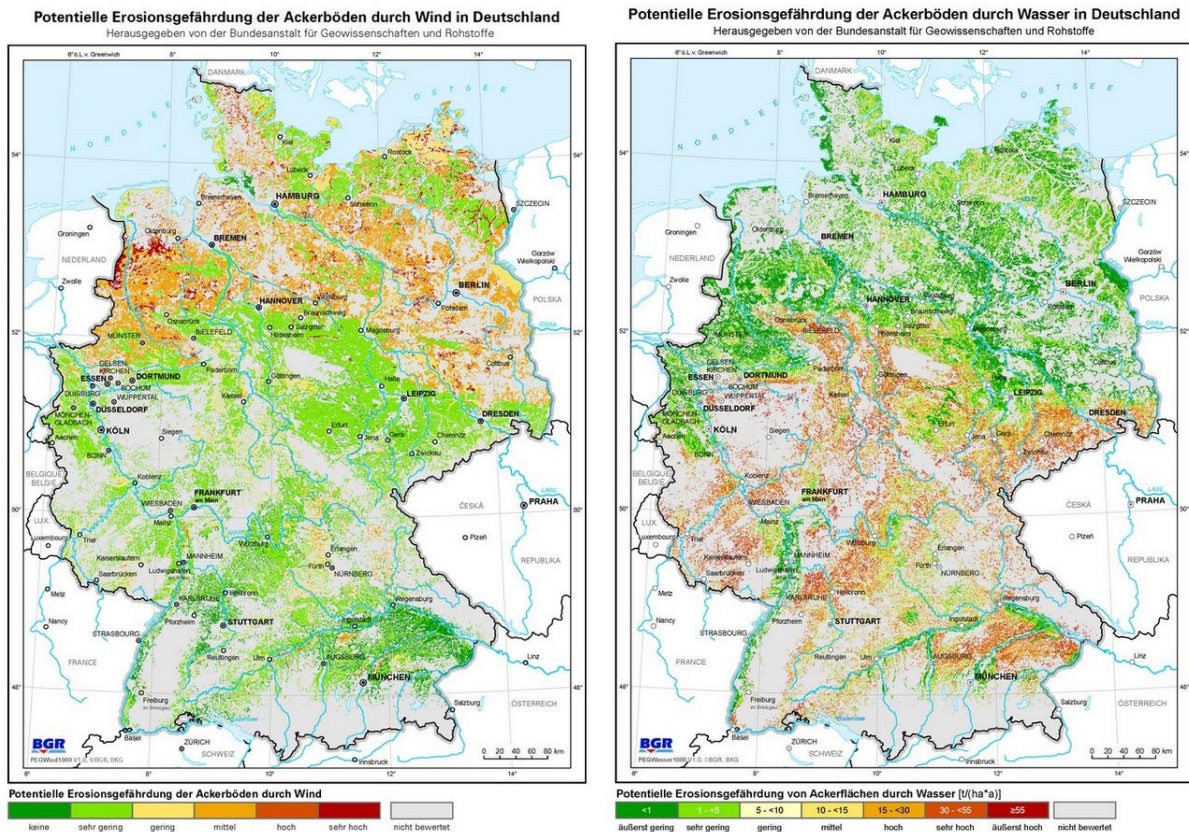


Abbildung 10: Potentielle Erosionsgefährdung der Ackerböden durch Wind (links) und Wasser (rechts) in Deutschland [28]

Über das Abwasser gibt es verschiedene Eintragspfade in die Umwelt. Überläufe der Kanalisation, unbehandeltes Wasser aus der Trennkanalisation, Restgehalte im behandelten Abwasser sowie die stoffliche Klärschlammverwertung sind mögliche Wege, wie das Mikroplastik in die Umwelt gelangt.

Durch Strömungen und Turbulenzen können Partikel in Abhängigkeit ihrer Dichte innerhalb der Wasserphase horizontal und vertikal verteilt werden. Eine Ermittlung von Transportpfaden mit Tracerpartikeln ist zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht erfolgt. Bei Untersuchungen in Fließgewässern wurden an allen Probenahmestellen Mikroplastikpartikel nachgewiesen. Daher ist eine Verbreitung über weite Strecken über diesen Pfad sehr wahrscheinlich. [29]

In den Boden findet ein Eintrag von Mikroplastik auf unterschiedlichen Wegen statt. Dieser kann direkt durch Bewirtschaftungsverfahren zum Beispiel durch die landwirtschaftliche Ausbringung von Sekundärrohstoffdüngern (wie Klärschlämmen, Gärresten und Komposten) oder den Einsatz von Kunststofffolien in der Landwirtschaft erfolgen. [27] Ebenso ein Eintrag über abgesetzte Partikel aus der Luft ist möglich. Der Transport innerhalb des Bodens ist von den Partikeleigenschaften und der Bodencharakteristik abhängig. Die Korngrößenverteilung und

Porengrößen beeinflussen die Fließwege. Je größer beispielsweise die Poren sind, desto größer ist die Verlagerung des Mikroplastiks von der Oberfläche in den Untergrund. [9]

In folgender Abbildung sind die Entsorgung und Verwertung von Klärschlämmen von 2017 dargestellt. Daraus lassen sich Verteilungswege in der Umwelt ableiten.

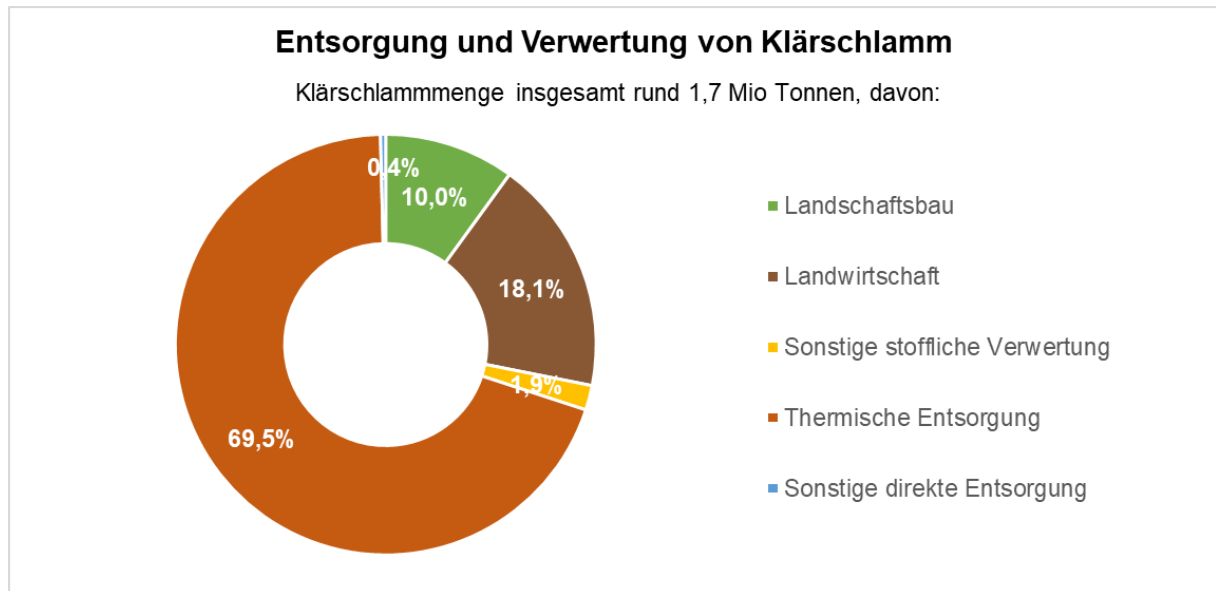


Abbildung 11: Entsorgung und Verwertung von Klärschlamm (angelehnt an [30])

In Abbildung 11 ist zu sehen, dass fast 70 % des Klärschlammes einer thermischen Entsorgung zugeführt werden. Vor der Verbrennung muss der Klärschlamm üblicherweise noch entwässert werden. In dem Sickerwasser, welches teilweise wieder in eine Kläranlage geleitet wird, bleiben Mikroplastikpartikel zurück. Somit wird der Kunststoff wieder zurück in den Reinigungsprozess geleitet und verkleinert sich unter Umständen durch den kontinuierlichen Kreislauf immer weiter. Rund 18 % des Klärschlammes werden als Düngemittel in der Landwirtschaft und 10 % im Landschaftsbau eingesetzt. Die Mikroplastikstoffe können durch Niederschlagsereignisse ausgewaschen, durch Wind verteilt oder z.B. durch die Bodenbearbeitung tiefer in den Boden gelangen. [4] Über eine Belastung des Grundwassers mit Mikroplastik liegen noch keine Untersuchungen vor. Im Umweltbundesamt Berlin in Kooperation mit der Technischen Universität Berlin werden zu diesem Themenfeld erste Untersuchungen durchgeführt. [27]

Die stoffliche Verwertung von Klärschlamm ist der direkte Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt. Im Koalitionsvertrag der Bundesregierung von 2013 wurde der Ausstieg aus der bodenbezogenen Klärschlammverwertung vereinbart. Die Absichtserklärung ist: „Wir werden die

Klärschlammausbringung zu Düngezwecken beenden und Phosphor und andere Nährstoffe zurückgewinnen.“ (S. 84 [31])

Generell ist der Transport von Mikroplastik in der Luft von der Partikelgröße abhängig. Je kleiner die Teilchen, desto leichter ist der Transport durch Wind. Partikel im Feinstaub-Bereich können über die Atemwege bis in die Lunge aufgenommen werden, wodurch Erkrankungen ausgelöst werden können. [9] Dies ist noch genauer in Kapitel 2.4.4 beschrieben.

Tabelle 3 zeigt die Eintragswege von Mikroplastik in aquatischen und terrestrischen Ökosystemen.

Tabelle 3: Einträge von Mikroplastik in aquatische und terrestrische Ökosysteme (angelehnt an [27], S. 25)

Eintrag in aquatische Ökosysteme	Eintrag in terrestrische Ökosysteme
Eintrag von Schiffen	Individuelle Eintragspfade
- Seehandelsverkehr - Militär- und Forschungsschiffe - Private Freizeitboote - Öffentlicher Schifffahrtsverkehr - Kreuzfahrtschiffe, Fähren	- Unsachgemäße Abfallentsorgung - Unsachgemäße Nutzung von Kunststoffprodukten - Littering
Fischerei	Anlagen, Baustellen, Landwirtschaft
- Fischereiboote - Verlassene, verlorene oder anderweitig ausrangierte Fischereiausrüstung - Aquakultur Aufbauten	- Produktionsverluste (z. B. Kunststoffpellets) - Baustellen oder Rückbaustandorte - Häfen - Schiffsrückbauwerften - Einsatz von Sekundärrohstoffdüngern (z.B. Klärschlämme, Komposte, Gärreste), Pflanzenschutzmittel, Langzeitdüngemittel - Einträge durch Nutzung von Landwirtschaftsfolien
Weitere Strukturen	Gemeinden/Kommunen
- Legale und illegale Abfallentsorgung auf See - Offshore Öl- und Gasbohrinseln - Offshore Windkraftanlagen	- Abfall in Küsten- und Festlandzonen aus unsachgemäßem - Abfallmanagement - Abfall von in Küstennähe gelegenen Deponien - Unbehandeltes oder nicht ausreichend behandeltes kommunales und gewerbliches Abwasser (vor allem Mischabwasserentlastung, Trennkanalisation von Niederschlagswasser)
Abtransport von Abfall	Abtransport von Abfall (Land- und Wasserstraßen)
- Naturereignisse (Tsunamis, Sturm und raue See)	- Flüsse und Hochwasser - Eintrag durch (Flut-)Wasserabflüsse - Weitere Einträge durch natürliche Sturmereignisse

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Untersuchungen über Verteilungswege des Mikroplastiks in die verschiedenen Umweltkompartimente noch am Anfang stehen. Viele Faktoren beeinflussen die Transportprozesse. Eine Studie befasst sich mit der Bestimmung von MPP im Abwasser einer kommunalen Kläranlage. Im Schnitt wurden $5.900 \frac{\text{MPP}}{\text{m}^3}$ (an Regentagen) und $3.000 \frac{\text{MPP}}{\text{m}^3}$ (an Trockentagen) gefunden. Die Größenordnung dieser Partikel liegt zwischen 30 und 100 μm . [32] Eine weitere Arbeit quantifiziert ungefähr zwischen $6.600 \frac{\text{MPP}}{\text{m}^3}$ Abwasser und $24.600 \frac{\text{MPP}}{\text{m}^3}$ Abwasser. Die Größenordnung liegt hier zwischen 50 und 745 μm . [33] Bundesländerübergreifende Untersuchungen in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz untersuchten Mikroplastik in Binnengewässern. Die Anzahl an gefundenen MPP liegt zwischen $2,9 \frac{\text{MPP}}{\text{m}^3}$ und $214,2 \frac{\text{MPP}}{\text{m}^3}$. [34]

Die Eintragspfade lassen sich in punktuelle und diffuse Einträge einteilen, welche in folgender Tabelle 4 zusammengefasst sind.

Tabelle 4: Punktuelle und diffuse Einträge von Mikroplastik in die Umwelt (Inhalt aus [4])

Punktuelle Einträge			
1	Gereinigte Abläufe der Kläranlage	4	Direkt einleitende Haushalte/Industrien
2	Regenwasserkanäle im Trennsystem	5	Niederschlagsentwässerung außerorts
3	Mischwasserüberläufe	6	Direkteinträge von Schiffen und wasserbaulichen Einrichtungen
Diffuse Einträge:			
7	Atmosphärischer Transport (Wind, Regen)	10	Transport durch Tiere
8	Abschwemmungen	11	Littering
9	Grundwasser		

Die ersten drei punktuellen Einträge können durch die Siedlungswasserwirtschaft beeinflusst werden. Die diffusen Einträge der Punkte 7 bis 10 können nicht kontrolliert werden. Lediglich unter dem Punkt 11 kann jeder einzelne Bürger seinen Beitrag leisten.

2.4 Auswirkungen von Mikroplastik

Trotz des ubiquitären Vorkommens von Mikroplastik in der Umwelt und die Verbreitung der Problematik in den Umweltmedien sind Auswirkungen auf Ökosysteme und Organismen schwierig zu beurteilen. Um das Schadpotenzial von Mikroplastik einzuschätzen sollten drei Aspekte berücksichtigt werden.

Den Primärkunststoffen werden bei der Herstellung und der Verarbeitung gefährliche Stoffe, z.B. Additive wie Antioxidantien, zugesetzt. Viele der Additive sind reaktiver als die Polymere, wodurch die akute Toxizität auch höher ist. [4] Weiterhin können sie beim Verbleib in der Umwelt auslaugen (Leaching). [9]

Ebenso können sich Schadstoffe, die in der Umwelt in den verschiedenen Kompartimenten vorkommen, bei Kontakt an die Oberflächen des (Mikro-)Plastiks anhaften und anreichern. Durch Fragmentierung findet eine Vergrößerung der Kunststoffoberfläche, sowie eine Ausbreitung des Kunststoffes und der Schadstoffe statt. Die Adsorption von persistenten organischen Schadstoffen und toxischen Molekülen wird dadurch erleichtert. [35]

Durch die physikalisch-morphologischen Eigenschaften der Partikel können sich schädigende Eigenschaften der Mikroplastik ergeben. [9] So kann die Fragmentierung zu kleineren Partikeln vermehrt zu negativen Effekten für immer mehr Organismen führen. Vor allem Meereslebewesen und Seevögel sind bei der Nahrungsaufnahme betroffen.

2.4.1 Additive im Kunststoff

Durchschnittlich enthalten Kunststoffe 4 % Additive. [9] Diese werden eingesetzt, um die Materialeigenschaften wie z.B. die Langlebigkeit zu verbessern. Häufig eingesetzt werden Weichmacher, wie z.B. Phthalate, die die elastischen Eigenschaften des Kunststoffes erhöhen. Ebenso Flammenschutzmittel, UV-Stabilisatoren, Antioxidantien oder Farbstoffe kommen viel zum Einsatz. Eine höhere Beständigkeit und damit auch generell eine höhere Lebensdauer wird durch den Zusatz von Blei- sowie organischen Zinn- und Cadmiumverbindungen erreicht.

Das Auslaugen von Schadstoffen aus Mikroplastik in die Umwelt ist bisher kaum erforscht. Der Auslaugeprozess ist abhängig von Variablen wie Temperatur, pH-Wert sowie das Größenverhältnis zwischen Poren im Polymer zur Molekülgröße des Schadstoffes. Aufgrund der Beschaffenheit der umgebenen Phase werden z.B. in Meerwasser oder auf einer Deponie unterschiedliche Schadstoffe gelöst.

Der Zusatz von Additiven in Kunststoffen ist weitestgehend gesetzlich geregelt. In der REACH-Verordnung wird der Zusatz gefährlicher Stoffe verboten oder beschränkt. Dazu zählen Cadmium und seine Verbindungen, Arsen, Organozinn-Verbindungen oder PAK (Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe). Seit 2015 zählen auch Phthalate dazu. Derzeit sind Farbstoffe und Pigmente nicht gelistet. Auch zulassungspflichtige Stoffe, sogenannte SVHC-Stoffe (substances of very high concern), werden im Anhang der Verordnung aufgelistet. Die Verzeichnisse werden laufend erweitert. [9]

2.4.2 Anhaftende Umweltschadstoffe im Kunststoff

Kunststoffe sind in der Lage, organische Stoffe und (Schwer-) Metalle zu adsorbieren. Der Grad der Adsorption wird dabei durch die jeweiligen Oberflächen- und Materialeigenschaften bestimmt.

In der Literatur zu Kunststoffen in aquatischen Ökosystemen wird beschrieben, dass persistente organische Schadstoffe zur Anhaftung an (Mikro-)Plastik neigen. Die Schadstoffanreicherung an Mikroplastik ist in diesen Systemen bis zum Faktor 10^6 erhöht. Allerdings schwanken die Mengenangaben der adsorbierten Stoffe in der Literatur stark. Beschrieben werden Konzentrationsprofile für PCB, PAK, PBDE, Bisphenol A, Octyl- und Nonylphenol im Bereich von 0,1 ng/g bis 10.000 ng/g. Offensichtlich adsorbiert PE deutlich mehr Schadstoffe als PP oder PVC. [9]

Neben organischen Schadstoffen werden auch Metalle, wie Aluminium, Blei, Chrom, Eisen, Kupfer, Zink und Zinn in der Umwelt nachgewiesen. Untersuchungen bestätigen die Adsorption von Metallen an Polyethylen-Pellets und finden heraus, dass gealterte Pellets deutlich mehr metallische Schadstoffe adsorbieren. Der Alterungsprozess ist für sekundäres Mikroplastik besonders relevant. In wässrigen Medien wird die Adsorption hauptsächlich durch pH-Wert, Temperatur und Salzgehalt beeinflusst. [9]

In Gewässern können Kunststoffe zudem von Mikroorganismen besiedelt werden. Dabei sind pathogene Organismen miteingeschlossen. [27] Der Wissensstand zu dieser Problematik ist jedoch sehr gering. Das Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde führt Untersuchungen im Verbundprojekt MikrOMIK [36] durch. Schwerpunkt der Forschung liegt bei mikrobiellen Populationen, die die Kunststoffpartikel besiedeln. Ebenfalls untersucht werden Vorkommen, Quellen und Senken von Mikroplastik in der Ostsee, Mikroplastisches Sedimentationsverhalten, Aufnahme durch höhere Organismen sowie mikrobielle plastische Biofilme (einschließlich potenzieller pathogener Organismen).

2.4.3 Auswirkungen auf die Biota

In der Literatur zu Kunststoffen in Organismen wird häufig angegeben, dass hauptsächlich Makro- und Mesokunststoffe in Mägen von Sturmschwalben, Möwen, Seehunden oder Fischen gefunden wurden. Diese Partikel sind meist größer als 5 mm. Beispiele für diese Kunststoffe sind z.B. Flaschendeckel oder Teile von Fischernetzen. Nicht in allen Untersuchungen

werden genaue Analysen über die gefundenen Partikel durchgeführt. Für eine Vergleichbarkeit verschiedener Ergebnisse müssen standardmäßig spektroskopische Untersuchungen durchgeführt werden. [27]

Potenzielle Wirkungen werden in direkte physikalische Wirkungen und indirekte chemisch/biologische Wirkungen eingeteilt. Diese sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 5: Einteilung potenzieller Wirkungen von Mikroplastik [27]

Direkte physikalische Wirkungen	Indirekte chemisch / biologische Wirkungen
Partikelgehalt	Vektorwirkung durch chemische Additive
Material (Dichte) der Polymere	Vektorwirkung durch chemische Adsorptive
Größe der Partikel	Vektorwirkung für (pathogene) Mikroorganismen
Form der Partikel	
Oberflächenbeschaffenheit der Partikel	

Im aquatischen Bereich wurden einige dieser Wirkungspfade bereits nachgewiesen. Die Größe und Form sind entscheidend für die Aufnahme und Ausscheidung der Partikel. Plastikteilchen im passenden Größen- und Formspektrum wird als Nahrung identifiziert und aufgenommen. Es gibt bisher einige Studien über Mikroplastik in Organismen, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Lusher et al. (2012) untersuchte 504 benthische und pelagische Fische aus dem Ärmelkanal. In 36,5 % der Proben wurden Kunststofffasern im Verdauungstrakt gefunden. Davon war laut einer FTIR-Analyse der Großteil PA. [37] Foekema et al. (2013) untersuchte 1203 Nordseefische und stellte fest, dass 2,6 % der Proben MP-Partikel aufgenommen haben. Die Ergebnisse wurden kaum spektroskopisch untersucht. Die Größenverteilung liegt zwischen 0,2 – 5 mm. [38] Murray & Cowie (2011) wiesen in 83 % der Proben MPP in Kaiserhummern (schottische Westküste) nach. Die Kunststoffe waren hauptsächlich PP-Netze. [27] Van Cauwenberghe & Janssen (2014) untersuchten kommerziell gezüchtete Miesmuscheln und Austern. In beiden Arten konnten Kunststoffpartikel nachgewiesen werden. [39]

Laut der Studie des Fraunhofer Instituts wurden bereits über 200 Arten in Labor- und Feldstudien untersucht. In den Feldstudien wurde die Aufnahme von Mikroplastik in einen Organismus und seine Organe erfasst. Nach postmortalen Untersuchungen sind Wirkungen auf den Organismus jedoch nicht zu beurteilen. Im Gegensatz dazu zeigen Laborstudien, dass Mikroplastik das Immunsystem, Fertilität und Mortalität beeinflusst. Diese Ergebnisse müssen differenziert

betrachtet werden. Die eingesetzten Partikelkonzentrationen sind in diesen Versuchen extrem hoch, weshalb die Ergebnisse nicht repräsentativ für natürliche Verhältnisse sind. [4]

Akkumulation von MP beginnend bei Zooplankton zeigt die Studie Setälä et al. (2014). Sie bewiesen das Bioakkumulationspotenzial von MP durch Sekundärkonsumenten. In den Versuchen wurden Partikelkonzentrationen von 10^3 bis 10^4 Stück pro ml verwendet, weshalb der Bezug zu realistischen Bedingungen nicht gegeben ist. [40]

Bisher gibt es keine zusammenfassenden Aussagen über die physikalischen oder chemischen Auswirkungen von Mikroplastik. Grund dafür sind fehlende genormte Versuche in diesem Bereich. Viele relevante Testparameter, wie Einheit der Konzentration, Expositionsdauer und Kunststoffsorte, unterscheiden sich in verschiedenen Experimenten, was deren Vergleich erschwert. Dennoch ist ein potenzieller Transfer zwischen verschiedenen Organismen und dem Menschen möglich.

2.4.4 Auswirkungen auf den Menschen

Über die Auswirkungen von Mikroplastik im menschlichen Organismus gibt es einige wenige Untersuchungen. Diese beschäftigen sich mit der Toxizität in Abhängigkeit von der Größe der Mikroplastikpartikel. Grundsätzlich verhält sich ein 1 mm großes Partikel weniger toxisch als ein $1\text{ }\mu\text{m}$ großes Mikropartikel. Große MPP ($> 5\text{ }\mu\text{m}$) sollen unverändert über den Magen-Darm-Trakt ausgeschieden werden.

Kleine MPP ($< 1\text{ }\mu\text{m}$) können über den Magen-Darm-Trakt oder die Haut absorbiert werden und werden voraussichtlich über die Milz wieder ausgeschieden. Weitere Interaktionen mit dem Stoffkreislauf wie Immunsystem oder Entzündungsreaktionen sind für den Menschen nicht beschrieben.

Kritischer ist die Aufnahme von MP $< 10\text{ }\mu\text{m}$ in die Atemwege. Wie beim Feinstaub können die Mikroplastikpartikel in das Bronchialsystem des Menschen eindringen. Allergische Reaktionen, Asthma, Krebs und Herzkrankheiten können die Folge sein, sind jedoch nur für Feinstaub nachgewiesen. [9]

2.5 Untersuchungsmethoden für Mikroplastik im Kompost

Im folgenden Kapitel wird eine Übersicht zur derzeitigen Praxis der Probennahme, Probenaufbereitung sowie von Methoden zur Größenbestimmung von Mikroplastikpartikeln gegeben. Für die quantitativen und qualitativen Analysen gibt es noch kein standardisiertes Untersuchungsverfahren. Durch die Unterschiede in der Analytik ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Studien nicht möglich. Dies erschwert die Abschätzung möglicher Belastungen, deren Bewertung, aber auch Ansätze zur Reduzierung von Eintragsquellen.

2.5.1 Methoden der Probenahme

In den Umweltmedien erfolgt die Abtrennung von Mikroplastik aus der Probe hauptsächlich durch Netze, Siebe und Filter mit variierenden Maschenweiten bzw. Porengrößen.

Wasser: Bei einer Beprobung von Wasser werden in der Regel Schlepp- oder Planktonnetze mit einer Maschenweite von 333 – 500 µm verwendet. [41] Kleinere Partikel werden jedoch der Probenahme entzogen. Werden kleinere Maschenweiten benutzt, kann es zur Verstopfung des Siebes (oder Filters) sowie zum Wasserrückstau kommen. Eine Lösung ist eine Probenahme mit Kanistern und anschließende Siebung unter kontrollierten Bedingungen im Labor. Alternativ können Proben aus dem Wasserreservoir gepumpt werden. Diese werden anschließend chargenweise über Siebe bzw. Filter mit kleineren Maschenweiten geleitet, die bei Verstopfungen schnell ausgetauscht werden können. [9] Die Probenvolumina variieren je nach erwarteter Mikroplastikmenge und -größe in den unterschiedlichen Gewässern. So sind in sehr feststoffreichen Gewässern kleinere und in feststoffarmen Gewässern große Probenvolumina zu wählen. [6]

Feststoffe und Luft: Auch zur Beprobung von Feststoffen und Luft werden Siebe und Filter verwendet. Bei Feststoffen werden zunächst die grobkörnigen Stoffe abgetrennt, sodass Partikel in der Größenordnung des Mikroplastiks übrigbleiben. Da in der Luft nur kleine Partikel zu erwarten sind, werden feinporige Filtermaterialien verwendet. Möglich ist es, Probenahmetechniken der Feinstaubmessung auch für Mikroplastik anzuwenden. [6] [9] [27]

Zum Umfang einer repräsentativen Stichprobe und Probenmenge für Mikroplastik in den Umweltmedien gibt es keine einheitliche Vorgabe. Die verschiedenen Probenmengen liegen z.B. bei Klärschlämmen und Sedimenten im Bereich von 0,1 und 10 kg [41], bei Kläranlagenzuläufen bei 0,1 bis 10 Liter und bei Kläranlagenabläufen im zwischen 1 und 1000 L. [9] Die Mengen

werden nicht nach der statistischen Aussage ausgewählt, sondern nach der Kapazität der gewählten Analysetechnik. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist somit nicht möglich.

2.5.2 Methoden der Probenaufbereitung

Zur Abtrennung der Mikroplastikpartikeln von anderen Teilchen wie organischer Substanz, Kleinlebewesen, Algen, Biofilme, Sedimente oder Metalle gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Hauptsächlich eingesetzt werden neben optischen Methoden Dichteunterschiede bzw. unterschiedliche chemische Löslichkeiten der Partikel. Durch optische Trennung und Dichtefraktionierung werden anorganische Teile wie Silikate oder Mineralien separiert und durch chemische bzw. enzymatische Verfahren die organische Substanz entfernt. [6]

Optische Trennung: Eine optische Trennung kann mit dem Auge oder dem Mikroskop erfolgen. Partikel können durch die Farbe, Form (Fragment, Pellet, Faser, Folie, Schaum, Granulat) oder mechanische Beschaffenheit von Kunststoff visuell sortiert werden. Der Nachteil dieser Methode ist die hohe Fehleranfälligkeit, da die Wahrnehmung subjektiv ist und Falschidentifizierungen sehr wahrscheinlich sind. Dies wird durch viele Studien bestätigt. In einer Studie wird berichtet, dass sich ca. 70 % der visuell als Plastik vorselektierten Partikel spektroskopisch nicht als Kunststoff bestätigt haben. [9] Daher sind optische Untersuchungen nur in Kombination mit weiteren chemischen bzw. chemisch-physikalischen Analysetechniken sinnvoll. [6]

Dichtefraktionierung: Bei dieser Methode der Abtrennung wird die Probe in einer Flüssigkeit bekannter Dichte durch Schütteln oder Rühren suspendiert. Die Kunststoffpartikel schwimmen je nach ihrer Dichte auf dem Medium auf und können abgetrennt werden. [6] [9] [41] Folgende Medien werden häufig eingesetzt:

- Trinkwasser: Plastikteilchen aus PP und PE schwimmen auf
- Kochsalzlösung oder Natriumiodid: zur Abtrennung etwas dichterere Kunststoffe
- Natriumpolywolframat oder Zinkchlorid: „schwere Lösungen“, z.B. PVC, PET und Nylon schwimmen auf

Die Dichtentrennung bei Partikeln kleiner als 100 µm ist in einem Medium schwierig. [27] Eine Trennung durch das Zentrifugieren ist eine sinnvolle Alternative.

Ein Nachteil der Dichtentrennung liegt in den Unterschieden zwischen dem Mikroplastik gegenüber dem Rohpolymer. Die Dichte der Kunststoffe kann sich durch den Verbleib in der Umwelt verändern, z.B. durch Mikroorganismen vergrößern oder durch Fragmentierung verkleinern. [9]

Chemischer und enzymatischer Abbau: Die Beständigkeit der Kunststoffe kann zur Abtrennung von Mikroplastik von der organischen Substanz ausgenutzt werden. Chemischer oder enzymatischer Abbau löst organische Stoffe selektiv.

Als chemisches Lösungsmittel kann Wasserstoffperoxid (H_2O_2) eingesetzt werden. Auch der Einsatz von Säuren wie Salzsäure (HCl), Salpetersäure (HNO_3) oder Schwefelsäure (H_2SO_4) und Laugen wie Natronlauge (NaOH) oder Kalilauge (KOH) ist möglich. Durch Säuren und Laugen besteht jedoch die Gefahr, dass die Kunststoffe angegriffen oder zersetzt werden.

Durch entsprechende Enzyme können z.B. Proteine, Fette, Cellulose, Lignin oder Insektenpanzer selektiv zersetzt werden. Jedes Enzym arbeitet in speziellen Bedingungen. Dadurch wird eine Kombination mehrerer Enzyme in einem Schritt verhindert, so dass mehrere Behandlungsschritte erforderlich sind. Der Vorteil der hohen Selektivität ist gleichzeitig ein Nachteil. Enzyme sind in der Anschaffung sehr kostenintensiv. Durch die hohe Vielfalt an Inhaltsstoffen in Umweltproben steigen die Kosten für eine hochwertige Auftrennung. [9] [27] [41]

2.5.3 Methoden der Mikroplastik-Analytik

Mikroplastik definiert sich über die Größe und die Kunststoffart. In der Mikroplastik-Analytik sind für die Identifizierung folglich zwei Schritte essenziell: die Größenbestimmung und der Nachweis des Kunststoffes.

2.5.3.1 Größenbestimmung

Die Größe der Mikroplastikpartikel lässt sich am einfachsten durch ein mehrstufiges Sieben oder Filtrieren mit definierten Maschen- bzw. Porenweiten bestimmen. Aus den getrennten Fraktionen können die entsprechenden Partikelmassen gravimetrisch ermittelt werden. Als Trennmethode können ein Rüttelsiebturm, ein Luftstrahlsieb oder der Kaskaden-Impaktor aus der Emissions-/Immissionsmesstechnik angewendet werden.

Weiterhin kann durch ein mikroskopisches Vermessen eine Größenbestimmung des Mikroplastiks erfolgen. Diese Methode ist arbeitsintensiv und für die Identifizierung von sehr vielen sowie sehr kleinen Partikeln wenig effizient. Eine Teilautomatisierung durch eine Bildauswertesoftware, welche die Partikel auf einem Mikroskop-Bild zählt und vermisst, kann Arbeit sparen. [9]

In der Studie der Universität Bayreuth (siehe Kapitel 2.6.2) wurden die Proben zur MPP-Iso-lierung nass durch drei Edelstahlsiebe mit Maschenweiten von 5 mm, 2 mm, 1 mm und bei-spielhaft von 500 μm gesiebt. [2] Gegenstände größer als 5 mm wurden mit filtriertem Wasser und filtriertem Ethanol gründlich über die Siebe gespült, um eventuell anhaftende MPP zu ent-fernen. Das auf den Sieben verbleibende Material wurde unter einem Stereomikroskop visuell vorsortiert. Potentielle Kunststoffteilchen wurden fotografiert, mit einem Mikroskop mit einer 40-fachen Vergrößerung bemessen und zur weiteren Analyse aufbewahrt. Zur Standardisie-rung innerhalb der Studie wurde das Trockengewicht jeder Probe durch Wiegen vor und nach dem Trocknen bei 60 ° C auf ein konstantes Gewicht bestimmt. [2]

Neueste Methoden der Partikelanalyse nutzen optische Eigenschaften wie z. B. Streulicht, Laserbeugung, Extinktion oder elektrische Eigenschaften der Partikel. [42] Gekoppelt mit einer automatisierten Bildanalyse sind Identifikationen bis zum Mikrometer-Bereich möglich und es kann die Größenverteilung der gesamten Partikel geliefert werden. Dazu ist noch weitere For-schung notwendig, denn die unterschiedlichen optischen und elektrischen Eigenschaften der Kunststoffe könnten für eine geeignete Methode für die Untersuchung der unterschiedlichen Mikroplastik-Gemische der Umwelt hinderlich sein. [9]

2.5.3.2 *Nachweis von Kunststoffen*

Über spektroskopische Methoden können die Merkmale der spezifischen chemischen Struktur der Polymere erfasst und mittels Referenzspektren den verschiedenen Kunststoff-Typen zu-geordnet werden. [6] Am häufigsten wird in der Literatur die Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR-Spektroskopie) oder die Raman-Spektroskopie (RM-Spektroskopie) ge-nannt sowie die jeweilige Kombination mit einem Mikroskop. [27] [41] Der Nachweis von Mik-roplastikpartikeln ist bis zu einer unteren Größengrenze von ca. 500 nm mittels RM-Spektro-skopie und von ca. 20 μm mittels FTIR-Spektroskopie möglich. [9]

Auch die Forscher der Studie der Universität Bayreuth verwendeten ein FTIR-Spektrometer zur Spektralanalyse der mutmaßlichen MPP. Nach 16 Hintergrundscans wurden 16 Pro-benscans mit einer spektralen Auflösung von 8 cm^{-1} innerhalb eines Bereichs von 3940 bis 800 cm^{-1} durchgeführt. Die gemessenen Spektren wurden durch Vergleich mit Referenzspek-tren aus einer spektralen Polymerbank identifiziert. Die Bibliothek umfasst 131 Datensätze und enthält nicht nur die gebräuchlichsten Kunststoffpolymere, sondern auch natürliche Materialien wie Silikat, Chitin, Baumwolle oder Keratin. [2]

In folgender Abbildung sind beispielhaft Referenzspektren (Infrarot-Spektren) der Kunststoffe PP, PE und PA dargestellt.

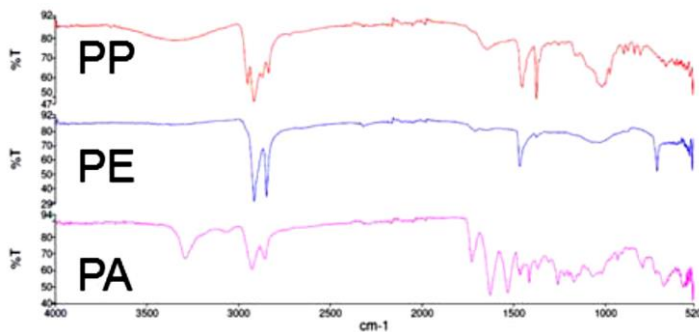


Abbildung 12: Infrarot-Spektren der Kunststoffe PP, PE und PA [9]

In unterschiedlichen Studien wurden vereinzelt Mikroplastik-Untersuchungen mit dem Elektronenmikroskop (SEM), der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDS), der Pyrolyse-GC/MS oder der Nahinfrarot-Spektroskopie durchgeführt. [9]

Spektroskopische Methoden können die Partikelgrößen nicht ausreichend genug erfassen und sind unabhängig von der Probenahme und der Probenaufbereitung nicht zu quantitativen Aussagen in Bezug auf Mikroplastik geeignet, sondern nur zur qualitativen Bestimmung. [27]

2.6 Bisherige Studien über Mikroplastik in Kompost

2.6.1 Überblick

Die Mehrzahl der Quellen geben einen Überblick über Herkunft, Charakterisierung und physikalisch- chemisch- sowie biologische Wirkungen von Mikroplastik. Auf diese Veröffentlichungen wird nicht im Detail eingegangen.

- Mikroplastik in der Umwelt – Vorkommen, Nachweis und Handlungsbedarf (Publikation des UBA) [9]
- Mikroplastik: Entwicklung eines Umweltbewertungskonzeptes - Erste Überlegungen zur Relevanz von synthetischen Polymeren in der Umwelt (Masterarbeit im Auftrag des UBA) [27]
- Quellen für Mikroplastik mit Relevanz für den Meeresschutz (Studie des UBA) [43]
- Mikroplastik und synthetische Polymere in Kosmetikprodukten sowie Wasch-, Putz- und Reinigungsmitteln (Bericht des Fraunhofer Instituts UMSICHT) [18]

- Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Lösungsansätze, Empfehlungen. (Konsortialstudie des Fraunhofer Instituts UMSICHT) [4]
- Fraunhofer UMSICHT nimmt Stellung zum Thema Mikroplastik (Positionspapier des Fraunhofer Instituts UMSICHT) [8]
- Kunststoffe in Kompost und Gärprodukten: Herkunft, Bedeutung, Vermeidung (Themenpaper der BGK) [14]
- Mikrokunststoffe durch Lebensmittelabfälle (aus Humuswirtschaft & Kompost der BGK) [23]
- Sortenreinheit von Bioabfällen verbessern (aus Humuswirtschaft & Kompost der BGK) [26]
- Sortenreinheit von Bioabfällen gewährleisten (Positionspapier der BGK) [19]
- Methodenentwicklung zur Bestimmung der Sortenreinheit von Bioabfällen (Projekt der BGK) [44]

Die folgenden fünf Veröffentlichungen werden wegen ihrer Relevanz im Detail beschrieben. Eine weiterführende Studie beschäftigt sich mit dem Vorkommen von Makro- und Mikroplastik im Ackerland.

- „Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland“ [3]

Die „Bundesgütegemeinschaft Kompost“ (BGK) hat kürzlich standardisierte Methoden zur Untersuchung von Biogut auf Fremdstoffe entwickelt. Basierend auf diesen Methoden führte das Land Baden-Württemberg eine Datenerhebung in zwei Landkreisen durch.

- „Chargenanalyse – Bestimmung der Sortenreinheit einer Fahrzeugladung von Biogut“ [45]
- „Gebietsanalyse – Bestimmung der Sortenreinheit von Biogut eines Entsorgungsgebietes“ [46]
- „Sortenreinheit von Bioabfällen - Datenerhebung am Beispiel zweier öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger in Baden-Württemberg“ [47]

Nur eine Studie befasst sich konkret mit der Thematik Mikroplastikeintrag in die Umwelt durch Kompost:

- „Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment“ [2]

2.6.2 Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment

2.6.2.1 Einführung

Die aktuelle Forschung konzentriert sich vorwiegend auf aquatische Systeme. Über Quellen, Wege und mögliche Anreicherung von Kunststoffpartikeln in terrestrischen Ökosystemen ist vergleichsweise wenig bekannt. Die Studie der Universität Bayreuth untersucht das Potenzial organischer Düngemittel aus der Vergärung und Kompostierung von Bioabfällen als Zugangsweg für Mikroplastikpartikel in die Umwelt.

Derzeit fehlen jedoch detaillierte Studien zur Mikroplastik-Produktion und zum ersten Eintritt in terrestrische Ökosysteme. Im Rahmen der Studie wurden organische Dünger aus recyceltem Bioabfall als möglicher Eintragspfad von Mikroplastikpartikeln größer als 1 mm in die Umwelt betrachtet. Nach dem derzeitigen Stand der Technik werden organische Abfälle nach der getrennten Sammlung entweder direkt kompostiert oder teilweise zur Biogas-/ Energieerzeugung in einer Vergärungsanlage, typischerweise gefolgt von einer aeroben Nachbehandlung der verbleibenden Gärreste, verwertet. Die anschließende Aufbringung auf landwirtschaftlichen Flächen ist eine umweltverträgliche Praxis, um Nährstoffe, Spurenelemente und Humus in den Boden zurückzuführen.

Die meisten Haushalts- und Kommunalabfälle sind jedoch durch Kunststoff verunreinigt. Durch Sieben können diese Verunreinigungen deutlich reduziert, aber niemals vollständig entfernt werden. Demzufolge sind organische Düngemittel eine Quelle für Mikroplastik in der Umwelt, die nicht übersehen werden sollte. [2]

2.6.2.2 Probenahme

Alle Proben wurden in Gläsern gelagert, um eine Kontamination durch Kunststoffe zu vermeiden.

Anlage A ist eine Bioabfall-Kompostierungsanlage (aerobe Behandlung). Kompostiert wird Bioabfall aus Haushalten mit einer nahezu gleichen Menge Grünschnitt aus der Umgebung. Die Anlage entfernt potenziell nicht biologisch abbaubares Material, einschließlich Kunststoffe, so gründlich wie möglich durch eine Reihe von Sieben, Metalltrennung und manuelle Sortierschritte. Das restliche Material wird anschließend zum Verrotten in einen Kastenkomposter überführt.

Es entstehen zwei Arten von kommerziellem, qualitätsgeprüftem, zertifiziertem Kompost. Beide Komposte wurden auf Mikroplastikpartikel geprüft. Es wurden für die Studie zwei 40-Liter-Kompost-Chargen gekauft und auf Teilproben von 3 Litern reduziert. Eine Charge wurde mit einer Maschengröße von 8 mm und die andere mit einer 15 mm Maschenweite gesiebt.

Anlage B ist eine Biogasanlage (anaerobe Behandlung), welche im Batch-Betrieb läuft. Verarbeitet werden hauptsächlich Bioabfälle aus Haushalten unter Hinzufügung von Grünschnitt und gelegentlich Energiepflanzen. Die Mischung wird ohne Vorbehandlung direkt in den Gärreaktor eingebracht. Fremdstoffe werden aus dem endgültigen Kompost durch ein oder zwei Siebschritte entfernt.

Analysiert werden zwei reife Komposte ("Digest A" und "Digest B"), ein nicht ausgereifter Dünger ("Digest C") und das Perkolat aus allen Faulbehältern ("Digest D"). Vier 0,75-Liter-Proben wurden aus der Vergärungsanlage (Anlage B) entnommen. Die erste Probe (Digest A) wurde aus einem Kompost, der 11 Monate reifte, entnommen und Probe 2 (Digest B) aus einem 13 Monate gereiften Kompost. Beide wurden mit einer Maschenweite von 10 mm gesiebt. Probe 3 (Digest C) stammt aus nicht gereiftem Kompost und wurde mit einer Maschenweite von 20 mm gesiebt. Zusätzlich zum Kompost wurden 5,5 Liter Proben aus dem Perkolat am Auslass der Rohrleitung entnommen, wo das Perkolat aus allen Fermentern zusammen abgeleitet wird (Digest D).

Anlage C ist ebenfalls eine Vergärungsanlage und dient als Referenz. Verarbeitet wurde kein Bioabfall, sondern ausschließlich Energiepflanzen wie Mais- / Grassilage und in geringerem Maße gemahlener Weizen. Plastikummüllungen werden entfernt, bevor das Substrat durch den Schredder geführt wird. Anschließend wird das Material in den Fermenter geleitet. Die Probe zur Untersuchung auf Mikroplastik wird am Ende des Prozesses genommen. Es wurde eine 2-Liter-Probe aus dem Auslassrohr des Faulbehälters entnommen, nachdem eine bestimmte Menge an Gärrest ausgetragen wurde, um geronnene Rückstände zu vermeiden.

Anlage D ist ein zweiter Bioabfall-Fermenter, der ausschließlich Abfälle aus dem Handel verarbeitet. In dieser Anlage wurden Proben in kommerziell erhältlichen 5-Liter-Behältern gezogen.

Anlagen E bis N sind landwirtschaftliche Biogasanlagen und verarbeiten Futtermittel wie Dung/Mist, Sonnenblumen oder Abfälle aus der Obstverarbeitung zusammen mit den regulären Energiepflanzen. Die Beprobung wurde auf dieselbe Weise wie bei Anlage C durchgeführt.

2.6.2.3 Probenaufbereitung

Zur MPP-Isolierung wurden die Proben nass durch drei gestapelte Edelstahlsiebe mit Maschenweiten von 5, 2 und 1 mm gesiebt. Gegenstände größer als 5 mm wurden mit filtriertem Wasser und filtriertem Ethanol (30%) gründlich über die Siebe gespült, um eventuell anhaftende MPP zu entfernen. Das auf den Sieben verbleibende Material wurde unter einem Lichtmikroskop visuell vorsortiert. Potentielle Kunststoffteilchen wurden fotografiert, mit einer Digitalkamera für die Mikroskopie mit einer 40-fachen Vergrößerung bemessen und zur chemischen Analyse unter Verwendung der ATR-FTIR-Spektroskopie aufbewahrt. Zusätzliche Proben aus 10 landwirtschaftlichen Biogasanlagen (Anlagen E bis N) und einem Flüssigdünger wurden mit Ausnahme des Siebens mit Maschenweiten von 1 mm und 500 µm gleichbehandelt. [2]

2.6.2.4 Probenanalyse

Ein FTIR-Spektrometer, das für Messungen im ATR-Modus eingestellt war, wurde zur Spektralanalyse der mutmaßlichen MPP verwendet. Nach 16 Hintergrundscans wurden 16 Probenscans mit einer spektralen Auflösung von 8 cm⁻¹ innerhalb eines Bereichs von 3940 bis 800 cm⁻¹ durchgeführt. Die gemessenen Spektren wurden durch Vergleich mit Referenzspektren aus einer spektralen Polymerbank identifiziert. Die Bibliothek umfasst 131 Datensätze und enthält nicht nur die gebräuchlichsten Kunststoffpolymere, sondern auch natürliche Materialien wie Silikat, Chitin, Baumwolle oder Keratin. [2]

Zur Standardisierung wurde das Trockengewicht jeder Probe durch Wiegen vor und nach dem Trocknen bei 60 ° C bestimmt.

2.6.2.5 Ergebnisse

In folgender Tabelle 6 sind die MPP-Mengen in den einzelnen Proben der Anlagen A bis N dargestellt.

Tabelle 6: Überblick über Anlagen und verwertete Abfälle sowie gefundenen Mikroplastikpartikel größer als 1 mm (angelehnt an [2])

	Anlage A		Anlage B				Anlage C	Anlage D	Anlagen E bis N
Anlagentyp	Bioabfallkompostierung		Bioabfallvergärung				Energiepflanzenvergärung	Bioabfallvergärung	Landwirtschaftliche Vergärung
			A	B	C	D			
Partikel pro kg	20	24	70	122	146	14	0	895	0 bis 11

Größe, Typ und Morphologie des Polymers

Vor der weiteren Analyse wurden die Proben mit Sieben mit Maschenweiten von 5 mm, 2 mm und 1 mm fraktioniert. Die Analyse der MPP-Größe zeigte, dass die meisten der aus den verschiedenen Proben gesammelten Partikel zwischen 2 und 5 mm lagen. In einigen Beispielen wurden MPP mit einer Größe von 250 µm gefunden. Alle MPP wurden nach ihrer Form in drei Untergruppen eingeteilt: Fragmente, Fasern und Kugeln. 75 % bis 100% waren Fragmente, gefolgt von 0 bis 8% Fasern und 0 bis 8% Kugeln. [2]

Die Analyse durch die ATR-FTIR-Spektroskopie identifizierte 11 Polymertypen in den Proben: Polymere auf Styrolbasis, Polyester (PES), PE, PP, PET, PVC, PUR, PVC, PA und Polymere auf Latex- und Cellulosebasis. [2]

2.6.3 Identifizierung und Quantifizierung von Mikroplastik auf landwirtschaftlichem Ackerland

2.6.3.1 Einführung

In dieser Studie wurde erstmals die makro- und mikroplastische Kontamination auf einem landwirtschaftlichen Ackerland in Südostdeutschland quantifiziert.

Als Untersuchungsgebiet diente eine landwirtschaftliche Nutzfläche in Mittelfranken, Südostdeutschland mit einer Gesamtfläche von 0,5 ha. Die Böden in diesem Gebiet weisen einen hohen Tongehalt auf. Die Fläche wird an drei Seiten von Feldwegen begrenzt und ist von Feldern umgeben. Das nächstgelegene Wohngebiet befindet sich in 1,5 km Entfernung und die nächstgrößere Stadt liegt in ca. 50 km Entfernung. In den letzten fünf Jahren wurde das untersuchte Feld mit Schweine- und Kuhmist sowie Ammoniumsulfatnitratdünger gedüngt. Für den Anbau auf dem Feld wurde kein landwirtschaftlicher Kunststoff (wie Folien) verwendet. Um einen Einfluss der Umgebung auszuschließen, wurde bei der Probenahme an den Seiten neben einer Feldstraße ein Rand von 4,5 m freigelassen, so dass eine Gesamtfläche von 0,4 ha analysiert wurde.

Auf Ackerböden, auf denen landwirtschaftliche Kunststoffanwendungen wie Gewächshäuser, Mulch oder Silagefolien oder kunststoffhaltige Düngemittel (Klärschlamm, Bioabfallkompost) angewendet werden, sind die Verunreinigungen wahrscheinlich höher. Daher müssen weitere Untersuchungen zum Ausmaß von Kunststoffkontaminationen unter besonderer Berücksichtigung der verschiedenen Anbaupraktiken durchgeführt werden. [3]

2.6.3.2 Probenahme

Die Probenahme wurde gemäß dem von der Technical Subgroup on Marine Litter (TSG ML) entwickelten Protokoll mit einigen Anpassungen durchgeführt. Im mittleren Bereich des Ackerlandes wurden 14 gleichmäßig verteilte Proben aus zwei Abschnitten genommen. Jede Probe wurde aus einem 32 × 32 cm großen Quadrat entnommen und die oberen 5 cm des Bodens extrahiert. So wurden bei jeder Probennahme mit einem Metallspatel etwa fünf Liter Boden in Fässer überführt. Um die Proben vergleichen zu können, wurde von jeder Probe das Trockengewicht bestimmt. Dazu wurde zunächst das Nassgewicht bestimmt und nach dem Trocknen bei 60 °C das Trockengewicht. Anschließend erfolgte die Analyse der Proben auf Mikroplastik. [3]

2.6.3.3 Probenaufbereitung

Die Untersuchung von Partikelgrößen kleiner als 1 mm ist sehr aufwendig, weshalb in einem ersten Schritt das Volumen reduziert wurde. Die Studie konzentriert sich auf MPP von 1 mm bis 5 mm Größe, alle kleineren Partikel wurden verworfen. Durch einfaches Nasssieben und Einwirken in Wasser konnte die organische Substanz nicht zerstört werden. Daher wurden die Proben mit destilliertem Wasser bedeckt und Wasserstoffperoxid hinzugegeben. Dadurch wurde die organische Substanz oxidiert. Anschließend wurde mit Sieben eine Fraktionierung in 5 mm bzw. 1 mm große Partikel vorgenommen. [3] Diese Schritte wurden wiederholt, bis alle Bodenaggregate aufgelöst wurden. Die verbleibenden Partikel wurden optisch vorsortiert und unter dem Lichtmikroskop weiter untersucht. Die Analyse wurde im Anschluss mit einem FTIR-Spektrometer durchgeführt.

2.6.3.4 Analyse

Zur Identifizierung und Quantifizierung wurden alle potenziellen Kunststoffpartikel mit einem FTIR-Spektrometer analysiert. Für die Messung jedes Partikels wurden 16 Hintergrundscans durchgeführt, gefolgt von 16 Probenscans mit einer spektralen Auflösung von 8 cm⁻¹ in einem Wellenzahlbereich von 4000 cm⁻¹ bis 400 cm⁻¹. [3] Die erhaltenen Spektren wurden mit einer Software durch einen Vergleich mit Polymerreferenzspektren aus einer Datenbank analysiert, welche die gebräuchlichsten Polymere sowie natürliche Materialien enthält. Neben dem Polymertyp wurden Farbe und Form jedes Partikels aufgezeichnet. Messungen der Flächen und Längen für Mikro- und Makroplastik wurden mit einem Bildverarbeitungsprogramm durchgeführt.

2.6.3.5 Ergebnisse

Insgesamt wurden 16 MPP (5 bis 1 mm) mittels ATR-FTIR-Spektroskopie in ungefähr 50 kg Trockengewicht der Bodenprobe identifiziert. Die Partikelhäufigkeit in den Proben lag zwischen 0 und 1,25 MPP pro Kilogramm. Unter Verwendung verschiedener Faktoren kann die Partikelzahl auf einen Hektar hochgerechnet werden. Somit enthält der Boden schätzungsweise zwischen 158.100 und 292.400 MPP pro Hektar. Dies kann nur als grobe Extrapolation angesehen werden.

PE war der am häufigsten gefundene Polymertyp (62,50%), gefolgt von PP (25,00%) und PS (12,50%). Fragmente und Folien waren mit jeweils 43,75% die häufigsten Formen von MPP. Innerhalb der Proben wurden nur wenig Polymerfasern (12,50%) identifiziert. Die Mehrheit der MPP war weiß. Es wurden nur wenige MPP mit einer transparenten, blauen oder grünen Farbe gefunden. Laut Größenmessungen wurden keine Partikel unter 2 mm Länge in den Proben gefunden. [3]

Zur Verdeutlichung sind die Ergebnisse in den folgenden Abbildungen nochmals graphisch dargestellt.

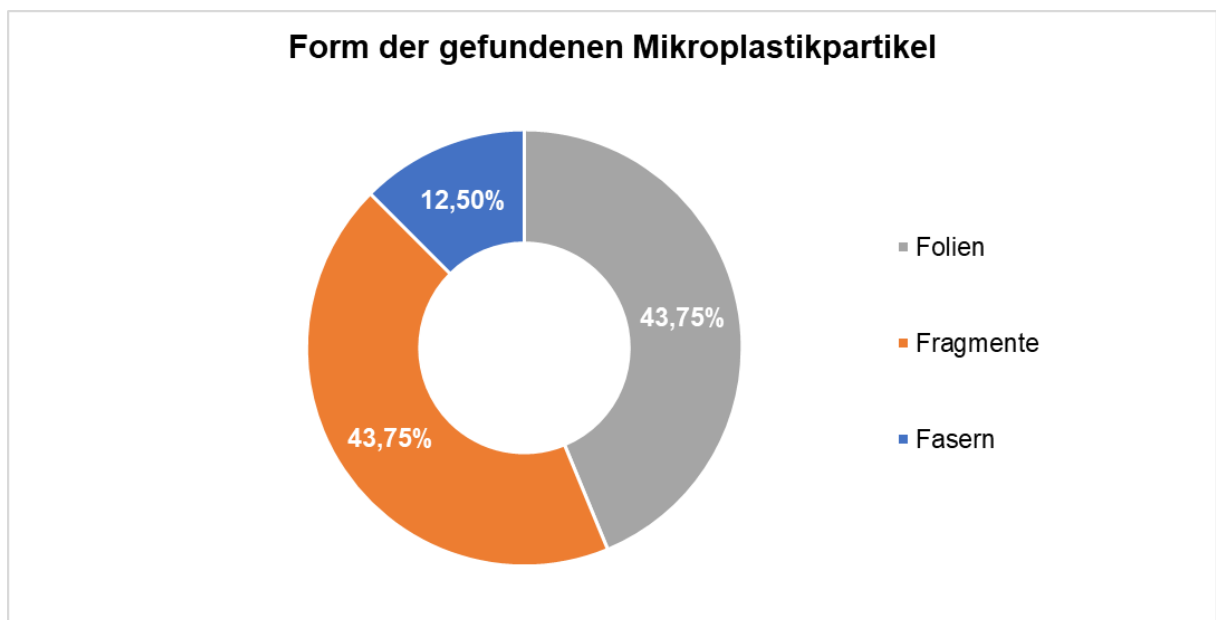


Abbildung 13: Form der gefundenen MPP (angelehnt an [3])

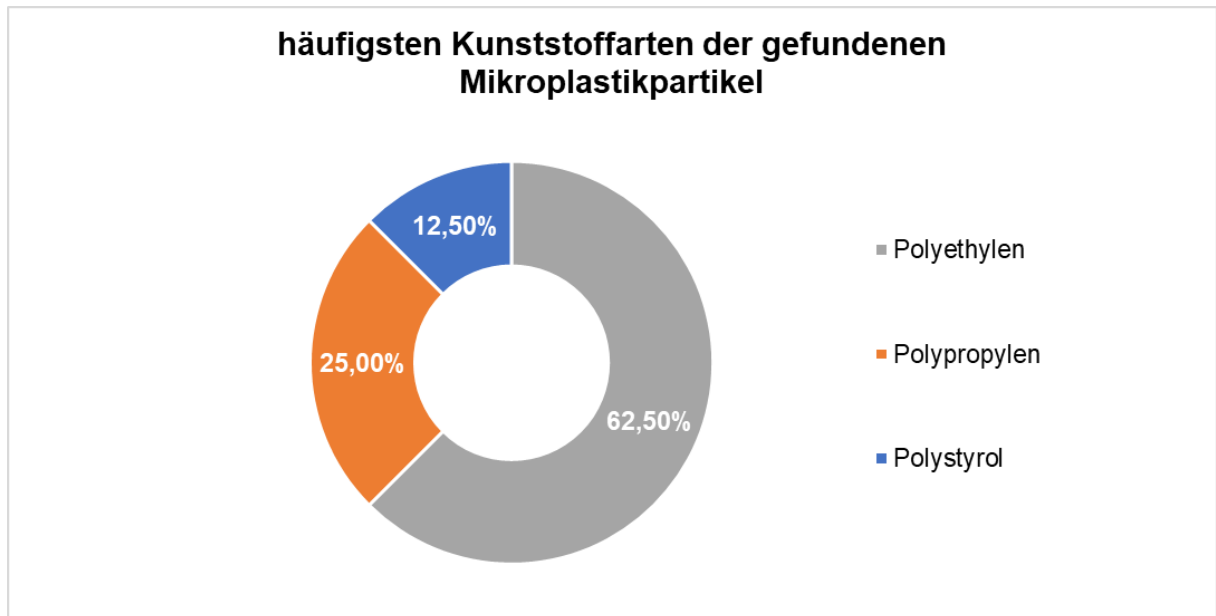


Abbildung 14: häufigsten Kunststoffarten der gefundenen MPP (angelehnt an [3])

2.6.4 Bundesgütegemeinschaft Kompost – standardisierte Methoden zur Bestimmung des Fremdstoffgehaltes in Biogut

2.6.4.1 Einführung

Die Ausgangsstoffe des Bioabfalls müssen möglichst frei von Fremdstoffen sein, um daraus hochwertiges Düngemittel herstellen zu können. Die Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) hat aufgrund dieser Annahme einheitliche Untersuchungsmethoden entwickelt, die die Sortenreinheit von Bioabfällen zu bestimmen. Das Biogut wird unter anderem nach Fremdstoffen wie Kunststoff, Metall und Glas analysiert.

Es wurden zwei Methoden entwickelt, die auf die Ermittlung des Fremdstoffgehaltes einer Fahrzeugladung (Chargenanalyse) und auf ein Entsorgungsgebiet (Gebietsanalyse) hinarbeiten. Ziele der Methoden sind die Vorbereitung und Durchführung der Untersuchung des Fremdstoffgehaltes zu standardisieren, die Vergleichbarkeit der Untersuchungen zu gewährleisten sowie betroffene Akteure zur Durchführung von Analysen anzuregen.

2.6.4.2 Chargenanalyse

Einführung

Bei der Chargenanalyse erfolgt die Bestimmung der Sortenreinheit einer Fahrzeugladung von getrennt erfasstem Biogut aus der Biotonne von Haushalten. [48] Als fachliche Grundlage der Methode wird die Sächsische Sortierrichtlinie [49] verwendet, welche auch bundesweit für Sortieranalysen von Restabfällen eingesetzt wird. Für die Sortierung von Bioabfällen mussten Anpassungen vorgenommen werden. [44]

Zweck der Analyse ist es, Daten über Art und Menge von in Biogut enthaltenen Fremdstoffen sowie die daraus abzuleitende Sortenreinheit des Biogutes zu bestimmen. [50] Die Standardisierung mit dieser Methode ermöglicht den Vergleich mehrerer Chargen und die Einordnung der Sortenreinheit des Biogutes. Eine „Charge“ bezeichnet eine Fahrzeugladung Biogut. Falls genaue Daten über die Herkunft vorliegen, können auch Rückschlüsse auf die Sortenreinheit in den Sammelgebieten vorgenommen werden. Die „Sortenreinheit“ ist definiert als der Anteil des Biogutes in der Biotonne, der nicht der Stoffgruppe der Fremdstoffe zuzuordnen ist.

Probenahme

Stichproben zur Untersuchung auf Fremdstoffe werden durch zwei verschiedene Verfahren genommen.

Die erste Probenahme erfolgt mittels Aufkegelung und Verjüngung der Charge. Dabei wird die Charge zunächst gemischt und zu einem Haufen aufgekegelt. Dieser wird in 2 Haufen aufgeteilt. Der erste Haufen wird halbiert (verjüngt). Die eine Hälfte wird verworfen und die andere wiederum aufgekegelt und halbiert. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis eine Stichprobenmenge von mindestens 1 m³ oder 250 kg verbleibt. [45] Mit dem zweiten Haufen wird genauso verfahren.

Bei der zweiten Technik erfolgt die Probenahme durch Ausbreitung der Charge und Entnahme von Einzelstichproben aus bestimmten Segmenten. Die Charge wird ebenfalls gemischt und in zwei Haufen geteilt. Der erste Haufen wird flach ausgebreitet und in acht gleichgroße Segmente aufgeteilt (siehe Abbildung 15). Die Segmente 1, 3, 6 und 8 (grau) werden entnommen und zu einer Sammelstichprobe aufgekegelt.

S1	S2	S3	S4
S5	S6	S7	S8

Abbildung 15: Aufteilung der Charge nach Segmenten

Die übrigen 4 Segmente werden verworfen. Die gewonnene Sammelstichprobe wird solange verjüngt, bis eine Stichprobenmenge von mindestens 1 m³ oder 250 kg verbleibt. Der zweite Haufen wird auf dieselbe Weise beprobt. Jede Stichprobe wird gewogen und die Masse im Ergebnisbericht dokumentiert.

Sortierung

Die gewonnenen Stichproben werden in einer Schichthöhe von 20 cm ausgebreitet, bonitiert und fotografisch dokumentiert. Anschließend wird das Material in Portionen auf einem Sortiertisch händisch sortiert.

Folienartige Kunststoffbeutel, die sowohl befüllt als auch unbefüllt sowie offen oder verschlossen sind, werden separat ausgelesen und nach Kategorien gezählt. Teilstücke von Beuteln gehen in die Zählung anteilig ein. Die Masse der Beutel wird berechnet und der Fraktion der Fremdstoffe zugeordnet. Restanhaftungen von Biogut werden als Differenz der gewogenen Masse und der berechneten Masse der Kunststoffbeutel ermittelt und dem Biogut zugerechnet.

Bei der Chargenanalyse werden nur Fremdstoffe, die größer sind als 20 mm berücksichtigt. [45] Die Fremdstoffe werden händisch ausgelesen und gewogen. Im Idealfall erfolgt eine Fraktionierung der Fremdstoffe in unterschiedliche Arten (Kunststoffe, Metall, Glas, etc.).

Berechnung und Dokumentation

Die Bestimmung des Fremdstoffgehaltes erfolgt zunächst für jede Stichprobe separat über folgende Formel.

$$\text{Fremdstoffgehalt} = \frac{\text{Masse Fremdstoffe gesamt}}{\text{Masse Stichprobe}} \cdot 100 \% \quad [45]$$

Der Fremdstoffgehalt der gesamten Charge ergibt sich aus dem Mittelwert der Fremdstoffgehalte der einzelnen Stichproben.

2.6.4.3 Gebietsanalyse

Einführung

Die Gebietsanalyse untersucht den Gehalt an Fremdstoffen in getrennt erfassten Bioabfällen in Haushalten eines bestimmten Entsorgungsgebietes. [48] Als fachliche Grundlage der Methode wird wie auch bei der Chargenanalyse die Sächsische Sortierrichtlinie [49] verwendet.

Ebenso werden die in Biogut enthaltenen Fremdstoffen sowie die daraus abzuleitende Sortenreinheit des Biogutes bestimmt. Um die Ergebnisse auf ein Jahr hochzurechnen, müssen zwei Versuchsreihen durchgeführt werden; eine in der vegetationsarmen Zeit (Dezember bis Februar) und eine in der vegetationsreichen Zeit (Mai bis Oktober). Die Standardisierung mit dieser Methode ermöglicht den Vergleich der Ergebnisse mehrerer Regionen.

Probenahme

Je Versuchsreihe werden mindestens 6 Stichproben mit einem Biogut-Volumen von mindestens 1 m³ oder 250 kg genommen. [46] Es werden unterschiedlich viele Einzelstichproben (einzelne Biotonnen) je nach Volumen und Füllgrad der Biotonnen benötigt, um die Stichproben zu gewinnen. Die Stichproben können auf zwei Arten gewonnen werden.

Beim Umleerverfahren 1 werden ausgewählte Biotonnen in andere Behälter umgefüllt. Es werden so viele Biotonnen geleert, bis das Mindestvolumen erreicht ist. Zur besseren Handhabung können die Einzelstichproben auf mehrere kleine Gefäße mit einem Gesamtvolumen von 1 m³ aufgeteilt werden. Alternativ kann die Mindestmasse von 250 kg erreicht werden. [46]

Beim Umleerverfahren 2 werden ausgewählte Biotonnen zunächst in ein Sammelfahrzeug geleert. Die Stichproben werden erst nach dem Entladen des Fahrzeuges aus dem gesammelten Biogut gewonnen. Dazu wird die gesammelte Biogutmenge aus dem Fahrzeug entladen und ohne weitere Vermischung in sechs volumetrisch ungefähr gleich große Segmente geteilt. Die Segmente bilden die sechs Stichproben. [46]

Sortierung

Jede Stichprobe wird separat sortiert und dazu für die fotografische Dokumentation sowie die Sortierung flächig ausgebreitet.

Ebenso wie bei der Chargenanalyse werden folienartige Kunststoffbeutel separat ausgelesen und gezählt. Die Masse der Beutel wird berechnet und der Fraktion der Fremdstoffe zugeordnet. Restanhaftungen von Biogut werden als Differenz der gewogenen Masse und der berechneten Masse der Kunststoffbeutel ermittelt und dem Biogut zugerechnet.

Nach der Vorsortierung erfolgt eine Siebung des Bioguts mit einer Siebmaschenweite von 40 mm. Es werden Siebe mit Rundloch verwendet. Die Fraktion größer 40 mm wird vollständig sortiert, wobei von der Fraktion 0-40 mm eine repräsentative Teilmenge von mindestens 5 Liter sortiert wird. [46]

Die Sortierung erfolgt portionsweise auf einem Sortiertisch. Dabei werden die Fremdstoffe händisch selektiert. Anhaftendes Biogut wird von den Fremdstoffen entfernt. Alle Stoffgruppen werden getrennt erfasst und verwogen. Fremdstoffe mit einer Größe von weniger als 20 mm bleiben bei der Gebietsanalyse unberücksichtigt. [46]

Berechnung und Dokumentation

Der Anteil an Fremdstoffen im Biogut ergibt sich aus der Masse der Fremdstoffe sowie der Masse der Stichprobe und wird mit folgender Formel berechnet.

$$\text{Fremdstoffanteil} = \frac{\text{Masse Fremdstoffe gesamt}}{\text{Masse Stichprobe}} \cdot 100 \% \quad [46]$$

Mit dem Fremdstoffanteil kann die Sortenreinheit des Biogutes bestimmt werden. Die Sortenreinheit berechnet sich aus der Differenz von 100 % und dem Fremdstoffanteil.

$$\text{Sortenreinheit} = 100 \% - \text{Fremdstoffanteil} \quad [46]$$

Im Endbericht wird neben allen Dokumentationen und Auswertungen der Versuchsreihe die Hochrechnung der Ergebnisse auf das Jahr dargestellt. Die ermittelten Daten aus Versuchsreihen in vegetationsarmen Zeiten gehen zu 33 % ein und die aus vegetationsreichen Zeiten zu 67 %. [44]

2.6.5 Sortenreinheit von Bioabfällen – Datenerhebung am Beispiel zweier öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger in Baden-Württemberg

2.6.5.1 Einführung

Um qualitativ hochwertige Komposte und Gärprodukte erzeugen zu können, ist ein hochwertiges Verfahren zur Verwertung häuslicher Bioabfälle erforderlich. Dabei ist ein möglichst geringer Fremdstoffgehalt im Biogut von großer Bedeutung. Daher steht das Thema „Fremdstoffe in der Biotonne“ im Fokus des Kompetenzzentrums Bioabfall der LUBW sowie in vielen weiteren Veröffentlichungen und Diskussionen.

Im Rahmen des Projektes „Sortenreinheit von Bioabfällen – Erhebung von Daten zur Sortenreinheit von Bioabfällen am Beispiel zweier öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger in Baden-Württemberg“ wurde konkrete Daten zu diesem Thema ermittelt. Mittels der ‚Methodenvorschrift Gebietsanalyse‘ der Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) wurden die Ergebnisse erhoben. [47]

2.6.5.2 Probenahme

Die Durchführung der Probenahmen und der Analysen basieren auf der „Methode zur Bestimmung der Sortenreinheit von Biogut – Gebietsanalyse“ der BGK vom 21.04.2017 (siehe Kapitel 2.6.4.3). [46]

Eine Stichprobe umfasst wie auch in der Gebietsanalyse mindestens 1 m³ oder eine Mindestmasse von 250 kg. Die Sammlung der Stichproben erfolgte durch Mitarbeiter des Witzenhausen-Instituts im jeweiligen Untersuchungsgebiet.

2.6.5.3 Probenaufbereitung und Analyse

Bei der Vorsortierung wurden zunächst Plastikbeutel, die Küchenabfälle enthalten, entfernt, gezählt und gewogen. Anschließend wurden gut erkennbare Fremdstoffe händisch aussortiert. Das verbleibende Material wurde in 40 mm-Trommelsieben gesiebt. Die Fraktion größer als 40 mm wurde vollständig untersucht. Bei der Fraktion kleiner-gleich 40 mm wurde lediglich eine Stichprobe von 5 Litern sortiert. Enthaltene Fremdstoffe wurden händisch ausgelesen. Anhaftendes Biogut an den Partikeln wurde durch Schütteln oder Abstreifen entfernt.

In folgender Abbildung ist die Abfallanalyse schematisch dargestellt.

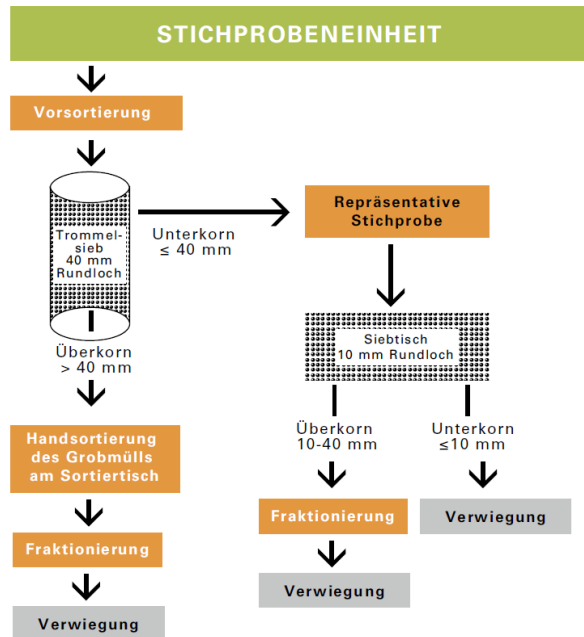


Abbildung 16: Schema der Abfallanalyse mittels Trommelsiebmaschine [47]

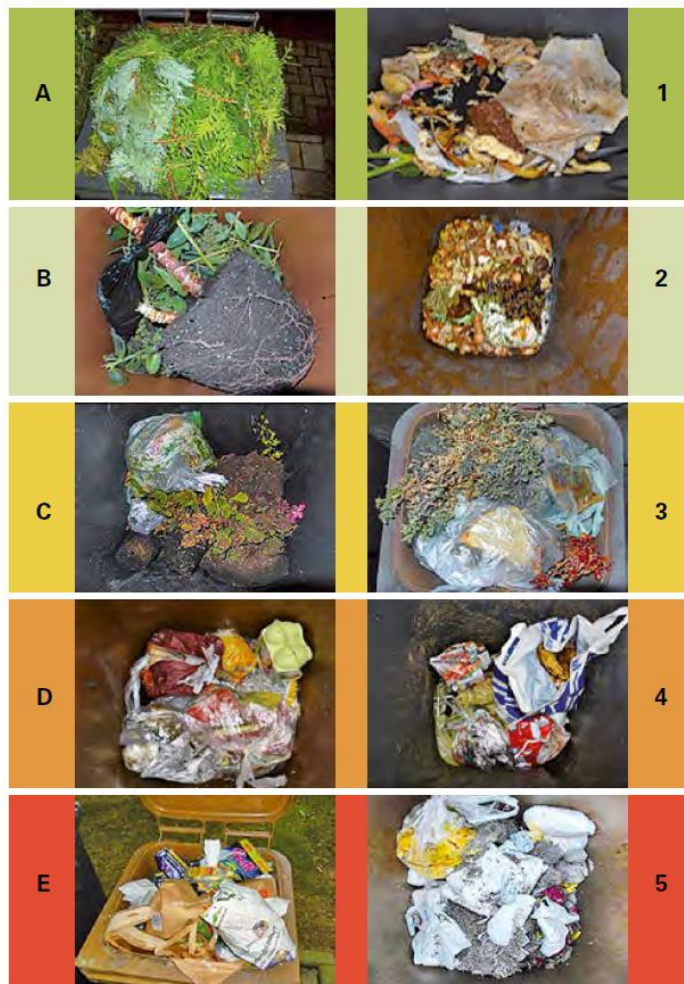
Die aussortierten Fremdstoffe wurden nach Anlage 2 der Methodenvorschrift zur Gebietsanalyse nach Kategorien getrennt erfasst. Diese Anlage ist im Anhang dargestellt. (siehe Kapitel 7.1)

2.6.5.4 Ergebnisse

Bei der Probenahme wurde eine optische Beurteilung der Biotonnen vorgenommen. Dabei wurde ein Bewertungssystem von A bis E angewendet. In folgender Tabelle sind die Kriterien dargestellt und in der darauffolgenden Abbildung fotografisch nochmals verdeutlicht.

Tabelle 7: Kriterien zur Beurteilung der Sortenreinheit der Biotonnen [47]

Klasse	Kriterien
A	Keine Fremdstoffe (oder Störstoffe) in der Biotonne sichtbar
B	Nur ein einzelner Fremdstoff / Fehlwurf sichtbar
C	Maximal zwei bis drei „unkritische“ Fremdstoffe / Fehlwürfe (Blumentöpfe, verpackte Lebensmittel) sichtbar; Biogut wird optisch durch die Gutfraktion dominiert
D	Viele Fremdstoffe, Fehlwürfe (jedoch keine „kritischen“ Fremdstoffe). Optisch haben die Fremdstoffe maximal den gleichen Anteil die die Gutfraktion
E	Biogut wird optisch klar durch die Fremdstoffe dominiert oder „kritische“ Fremdstoffe (Glas, schadstoffhaltige Abfälle und Elektroschrott) sichtbar



In den untersuchten Gebieten wurden im Schnitt 71 % der begutachteten Biotonnen der Kategorie A zugeordnet. Dies ist mit Abstand der größte Anteil

In 11 % der Biotonnen wurde nur ein Fremdstoff sichtbar identifiziert.

Ähnlich wie in Kategorie B wurden in dieser Stufe in 9 – 10 % der Biotonnen bis maximal drei Fremdstoffe ausgelesen.

6 – 7 % der untersuchten Biotonnen in den Gebieten wurden mit vielen Fremdstoffen mit der Note 4 (Kategorie D) bewertet.

Nur 2 – 3 % der Biotonne wird optisch klar durch die Fremdstoffe dominiert.

Abbildung 17: Beispiele für zur Abfuhr bereitstehende Biotonnen und ihre Bewertung (A bis E) [47]

In folgender Tabelle sind einige gefundene Fremdstoffe nach den Größenfraktionen zusammengefasst.

Tabelle 8: Beispiele gefundener Fremdstoffe im Biogut sortiert nach Fraktionen (angelehnt an [47])

Sortierfraktion	Gefundene Fremdstoffe
> 40 mm	– verpackte Lebensmittel – Plastiktüten (inkl. biologisch abbaubaren Biomüllbeutel) – Flaschen, Gläser – Dosen, Küchenmesser – Flaschen, Becher – Batterien, Medikamente – Hygieneprodukte

Sortierfraktion	Gefundene Fremdstoffe
$\leq 40 \text{ mm}$	– Folienstücke, Kleinverpackungen – Scherben – Verschlüsse – Batterien – sonstige Fremdstoffe (z.B. Zigarettenkippen)

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass sämtliche Fremdstoffe durch Fehlwürfe der Bürger verursacht werden. Insgesamt waren die meisten begutachteten Biotonnen und analysierten Bioabfälle gut sortiert. Da die Grenzwerte jedoch voraussichtlich in Zukunft weiter verschärft werden, ist eine Steigerung des Trennverhaltens notwendig. [47] Dazu sind unter anderem die in Kapitel 2.2.2.2 beschriebenen Maßnahmen ein Ansatzpunkt, der dringend verfolgt werden sollte.

2.7 Rechtliche Grundlagen

Die wesentlichen Rechtsvorschriften zum Umgang mit Bioabfällen sind das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-AbfG) und die Bioabfallverordnung (BioAbfV). [11]

Laut der Bioabfallverordnung §4 Absatz 4 ist der Anteil an Fremdstoffen (Glas, Kunststoff, Metall) mit einem Siebdurchgang von mehr als 2 mm auf 0,5 % bezogen auf die Trockenmasse begrenzt. [51]

Auch können Hersteller von Kompost ihre Produkte der freiwilligen RAL-Gütesicherung unterstellen. Diese gewährleistet einen hohen Qualitätsstandard. Dadurch ergeben sich auch Vorteile bei Rechtsbestimmungen, z.B. Befreiungsmöglichkeiten von bestimmten behördlichen Untersuchungs- und Nachweispflichten der Bioabfallverordnung (BioAbfV) wie etwa Bodenuntersuchungen und das abfallrechtliche Lieferscheinverfahren. Den Anteil an Fremdstoffen im Kompost ist auf $15 \frac{\text{cm}^2}{\text{t Frischsubstanz}}$ begrenzt. [52]

3 METHODENENTWICKLUNG ZUR BESTIMMUNG VON FREMDSTOFFEN UND MIKROPLASTIK IN KOMPOST

In diesem Kapitel wird eine Methodik zur Trennung von Fremdstoffen und Mikroplastik aus Kompostproben vorgestellt. Grundlage sind Literaturergebnisse die ausführlich in Kapitel 2 zusammengefasst sind.

3.1 Erste Versuche

Erste Versuche zur Untersuchung von Kompost (K) auf Mikroplastik wurden mit handelsüblicher Komposterde aus einem Baumarkt durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurde die Trockensubstanz (TS) der Komposterde bestimmt. Dazu wurden 500 g in einer Kristallisationsschale (KS) auf einer Analysenwaage ($d = 0,01$ g) abgewogen und über Nacht bei $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ in den Trockenschrank gestellt. Das Gewicht (m) wurde bestimmt und die Erde anschließend für weitere zwei Stunden getrocknet. Bei Gewichtskonstanz wird durch den Gewichtsverlust die Trockensubstanz berechnet.

Aus der gesamten getrockneten Erde werden 500 g-Proben abgewogen. Diese werden durch das Verfahren der Nasssiebung in Fraktionen getrennt. Die Fraktionen können einzeln nach Mikroplastikpartikeln untersucht werden. Durch die Berechnung der TS und das anschließende Abwiegen der Proben kann ein einheitliches Gewicht bestimmt werden. Somit sind sämtliche Ergebnisse der einzelnen Proben vergleichbar.

Bei den ersten Versuchen stehen zwei Edelstahlsiebe mit einem Durchmesser von 20 cm und Maschenweiten von 4 mm sowie 1,25 mm zur Verfügung. Zum Auffangen des Spülwassers werden anfangs 10 l-Plastikeimer verwendet.

Für den ersten Spülvorgang wurde das 4 mm-Sieb mit einem Stativ befestigt und über dem Eimer im Waschbecken ausgerichtet. Die 500 g-Probe wurde auf das Sieb gegeben und mit einem Schlauch, der am Waschbecken angeschlossen ist, gründlich gespült. Die Erde wurde mit der Hand über die Fläche des Siebes verteilt und Verklumpungen mit den Fingern zerdrückt, sodass möglicherweise eingeschlossene MPP freigesetzt wurden. War der Eimer voll, so wurde dieser durch einen leeren Eimer ersetzt. Auch das Sieb wurde ausgetauscht und der volle Eimer über das 1,25 mm-Sieb geschüttet. Das Wasser wurde anschließend verworfen, da die Partikel kleiner als 1 mm im Rahmen dieser Masterarbeit nicht weiter untersucht werden. Die Probe auf dem 4 mm-Sieb wird so lange nach dem beschriebenen Verfahren gesiebt,

bis möglichst keine Partikel kleiner als 4 mm auf dem Sieb zurückbleiben. Zu diesem Zeitpunkt wird das Sieb zur Seite gelegt und durch das 1,25 mm-Sieb ausgetauscht. Das Vorgehen wird mit diesem Sieb wiederholt.

Der Aufbau ist in folgender Abbildung dargestellt.



Abbildung 18: Aufbau für die ersten Versuche mit der Komposterde

Nach der Nasssiebung wurden die Siebe über Nacht in den Trockenschrank gestellt. Solange die Erde noch nass ist, ist es sehr schwierig, diese vom Sieb zu entfernen und zu untersuchen. Die getrocknete Erde lässt sich einfach vom Sieb auf eine Fläche kippen, auf der die Untersuchung der Probe auf Mikroplastik vorgenommen werden kann.



Abbildung 19: Siebe im Trockenschrank

3.2 Optimierung der Methode

Im Hinblick auf die Untersuchung von zwei ausgewählten Kompostproben einer Kompostierungs- und einer Vergärungsanlage wurde für weitere Versuche ein Edelstahlleimer mit 17 L Füllmenge verwendet. Darauf abgestimmt wurden Siebe mit einem Durchmesser von 31,5 cm verwendet, damit die Siebe im oberen Bereich des konischen Eimers sitzen.

Damit konnte das Stativ als Halterung wegfallen, sodass in einem ersten Optimierungsschritt die Siebe in einer Kaskade gestapelt werden konnten. Drei Siebe mit Maschenweiten von 1, 2 und 5 mm wurden dafür verwendet. Das Sieb mit der kleinsten Maschenweite wird unten und das mit der größten Maschenweite wird oben platziert. Dadurch wird der Schritt gespart, in dem der Eimer erneut über die Siebe gekippt werden muss. Der Eimer muss ab jetzt nur noch ausgeleert werden.

In einem weiteren Optimierungsschritt wird vor der Nasssiebung eine kurze Trockensiebung durchgeführt. Die trockene Komposterde wird einmal über die Siebkaskade gesiebt. Dadurch wird eine deutliche Volumenminderung erreicht, da ein Großteil der Fraktion kleiner 1 mm (in Form von Sand, Steinen und Erde) im Vorhinein abgetrennt werden kann. Dadurch wird sowohl die Zeit des Siebvorgangs als auch der Wasserverbrauch reduziert.

Der neue Aufbau ist in folgender Abbildung photographisch dokumentiert.



Abbildung 20: Versuchsaufbau mit der Siebkaskade auf dem Edelstahlleimer

3.3 Durchführung der Versuche

Bevor die Wiederfindungsrate ermittelt wurde, wurden einige Blindproben bestimmt. Beide Versuche wurden sowohl mit Komposterde aus dem Baumarkt als auch mit Komposterde aus einem Garten durchgeführt. Zum Vergleich wurden jeweils mehrere Proben untersucht.

Im Folgenden ist die Durchführung beider Experimente detailliert beschrieben.

3.3.1 Blindproben

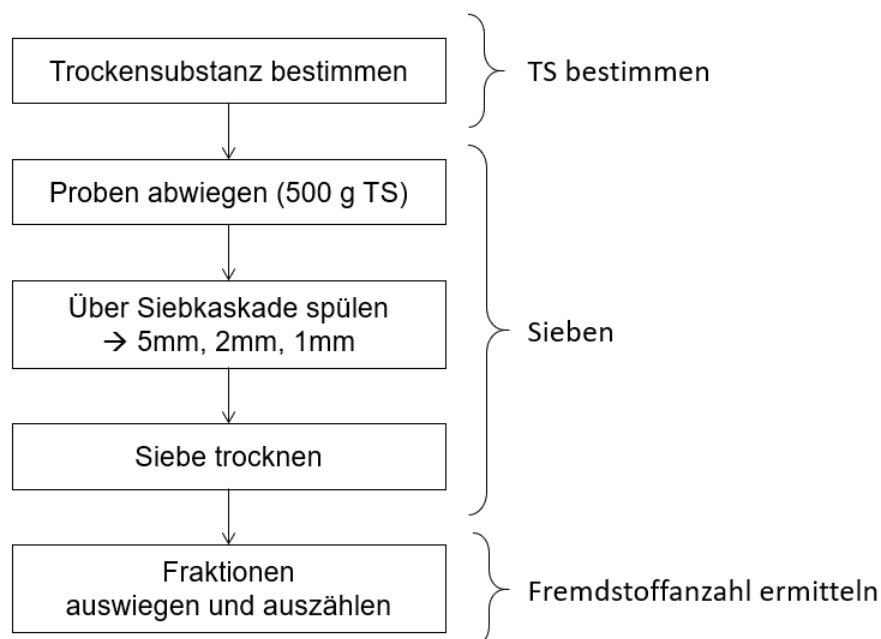


Abbildung 21: Vorgehen zum Untersuchen der Proben auf Fremdstoffe

Das Schema in Abbildung 21 beschreibt die Durchführung der Versuche zum Untersuchen der Proben auf Fremdstoffe und Mikroplastik. Das Vorgehen und die Ergebnisse werden schriftlich und fotografisch dokumentiert. Zum Vergleich werden acht Blindproben untersucht.

Als Verfahren wird eine Nasssiebung durchgeführt. Falls MPP an organischer Substanz hängen oder von dieser umschlossen sind, können die Partikel durch das Wasser dennoch gelöst werden.

3.3.1.1 Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes

Um die Ergebnisse vergleichbar zu machen, wird die Trockensubstanz der Komposterde vor jedem Versuch bestimmt. Dazu wird in zwei Kristallisationsschalen eine bestimmte Menge Komposterde abgewogen (500 g bzw. 700 g). Zur Bestimmung des TS-Gehaltes werden die Schalen vor und nach dem Füllen gewogen.

Diese werden bei 105 °C über Nacht in den Trockenschrank gestellt. Das Gewicht wird bestimmt und nach zwei weiteren Stunden erneut ermittelt. Bei Gewichtskonstanz wird die Trockensubstanz mit folgender Formel berechnet:

$$TS = \frac{m_{nass} - m_{verlust}}{m_{nass}} \cdot 100 \%$$

3.3.1.2 Sieben

Von der getrockneten Komposterde werden 500 g in einer Kristallisationsschale abgewogen. Für den Siebvorgang werden drei Siebe mit den Maschenweiten 1 mm, 2 mm und 5 mm mit von oben nach unten abnehmender Maschenweite gestapelt auf einen Edlestahleimer gesetzt. Die Probe wird auf das oberste Sieb gegeben und zunächst trocken gesiebt. Die Fraktion kleiner als 1 mm wird verworfen. Anschließend wird der Behälter mit Wasser ausgespült, sodass die gesamte Probe überführt wird. Für die Nasssiebung wird ein Schlauch an den Wasseranschluss am Waschbecken angeschlossen. Die Kompostmasse wird gründlich gespült, bis alle Partikel kleiner als 5 mm durch das oberste Sieb gefallen sind. Dieses Sieb wird entfernt und der Vorgang mit den 2 und 1 mm Sieben wiederholt, bis das Wasser im Eimer weitestgehend klar ist. Der ungefähre Wasserverbrauch und die Siebdauer werden notiert.

Nach dem Siebvorgang werden die Siebe bei 95 °C über Nacht in den Trockenschrank gelegt, sodass die Komposterde für das Auszählen von dem Sieb entnommen werden kann.

3.3.1.3 Fremdstoffanzahl ermitteln

Vor dem Auszählen werden die einzelnen Siebfraktionen ausgewogen. Dazu wird das Gewicht der Siebe vor und nach dem Sieben bestimmt. Durch die Differenz ergeben sich die Massenanteile der einzelnen Fraktionen.

Für das Untersuchen nach Fremdstoffen wird jede Fraktion einzeln auf der Arbeitsfläche verteilt. Es werden acht Rechtecke, die 10 x 15 cm groß sind, gebildet. Jedes Segment wird weiter ausgebreitet und manuell auf Fremdpartikel untersucht. Die Fremdstoffe werden zur Seite gelegt und am Ende gezählt.

In folgender Abbildung 22 ist das Vorgehen bildlich dargestellt.

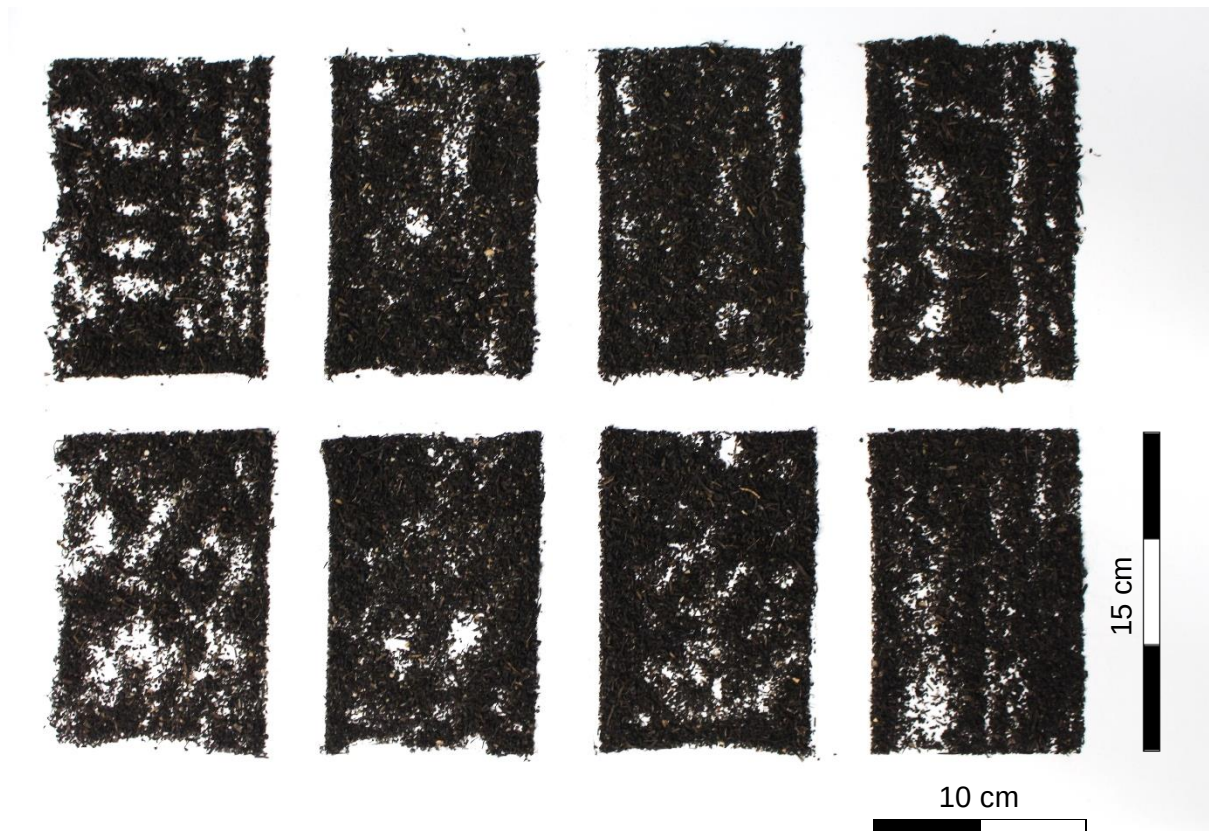


Abbildung 22: Ausgebreitete Komposterde in Segmente unterteilt

3.3.2 Tests zur Ermittlung der Wiederfindungsrate

Die Durchführung zur Bestimmung der Wiederfindungsrate ist ähnlich wie bei der Untersuchung der Blindproben. Die Bestimmung des TS-Gehaltes, der Siebvorgang sowie die Ermittlung der Fremdstoffanzahl waren gleich. Zusätzlich wurden die grün umrandeten Felder in folgender Abbildung 23 in die Versuche eingebaut.

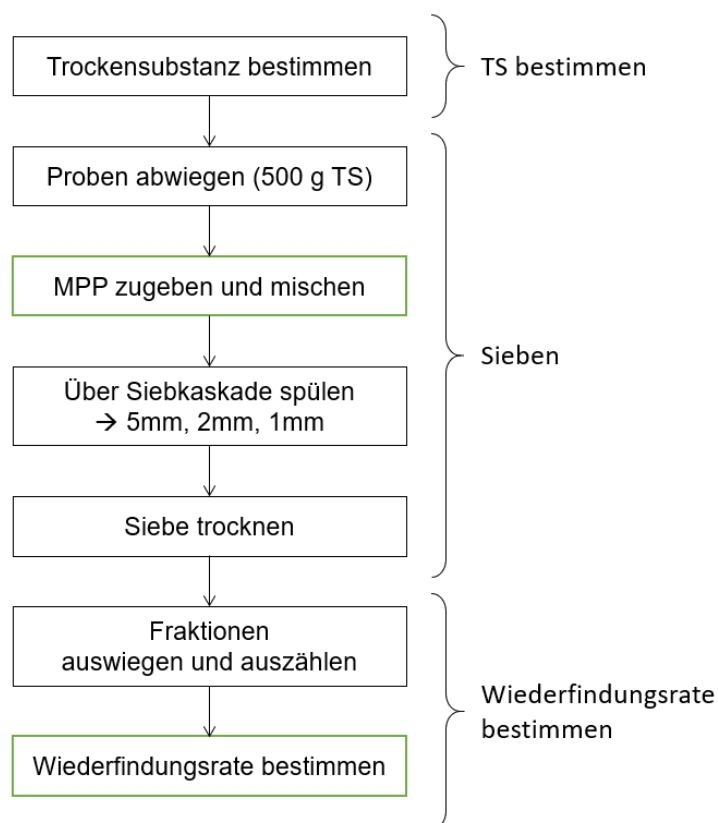


Abbildung 23: Vorgehen zum Untersuchen der Proben auf Fremdstoffe und Bestimmung der Wiederfindungsrate

Für erste Experimente wurden industriell gefertigte Mikroplastikpellets (primäres Mikroplastik Typ A) verwendet. Im Verlauf der Untersuchungen wurden diese schrittweise durch MPP ersetzt die zusätzlich in den Proben separiert wurden. Welche Partikel genau verwendet wurden ist in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 9: Proben für die Wiederfindungsrate, eingewogene Erde und zugesetzte MPP

Probe		Zugesetzte MPP	
Komposterde aus dem Baumarkt	1	50	Pellets
	2	50	Pellets
	3	50	Pellets
	4	25	Pellets / gefundene MPP
	5	25	gefundene MPP
	6	25	gefundene MPP
Gartenkompost	7	25	Pellets / gefundene MPP
	8	25	gefundene MPP
	9	25	gefundene MPP
	10	25	gefundene MPP

Durch den Vergleich von zugegebenen und gefundenen Partikeln kann die Wiederfindungsrate folgendermaßen berechnet werden:

$$\text{Wiederfindungsrate} = \frac{\text{gefundene MPP}}{\text{zugegebene MPP}} \cdot 100 \%$$

3.3.3 Untersuchung mit dem Lichtmikroskop

Beispielhaft wurde die Fraktion 1-2 mm und kleiner als 1 mm mit dem Lichtmikroskop betrachtet. Für die kleinere Fraktion wurde vor der Nasssiebung eine Stichprobe aus der Fraktion entnommen. Für die Fraktion 1-2 mm wurden aussortierte Partikel verwendet.

Für die Betrachtung unter dem Lichtmikroskop wurde mit einem Spatel eine geringe Menge bzw. einzelne Partikel auf einen Objektträger überführt und in das Lichtmikroskop eingespannt. Die Ergebnisse wurden fotografisch dokumentiert.

3.3.4 Untersuchung mit dem Raman-Spektrometer

Zusätzlich wurden Partikel aus der Fraktion kleiner als 1 mm exemplarisch mit dem Raman-Spektrometer untersucht. Mit einem Spatel wurden wenige Partikel auf einen Silithiumfilter gegeben. Die Ergebnisse wurden fotografisch dokumentiert.

3.4 Ergebnisse der Versuche

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Blindproben sowie die Ergebnisse der Tests zur Wiederfindungsrate zusammengefasst.

3.4.1 Blindproben

Gesiebt werden 500 g-Proben Trockensubstanz der Komposterde aus dem Baumarkt. Aus vorherigen Versuchen wird eine Trockensubstanz von etwa 60 % angenommen (siehe Tabelle 14). Dementsprechend werden 700 g Frischsubstanz der Komposterde in Kristallisationsschalen eingewogen und untersucht.

Tabelle 10: Einwaagen von Komposterde (nass) aus dem Baumarkt

Blindprobe	1	2	3	4
m_K [g]	700,02	700,12	700,31	700,08

Als Vergleich zur Komposterde aus dem Baumarkt wird zusätzlich Kompost aus dem Garten untersucht. Die Trockensubstanz dieses Gartenkomposts beträgt zwischen 83 % und 88 %. Da der Gartenkompost nicht in ausreichender Menge verfügbar war, wurden hier 250 g-Proben untersucht. Die Einwaagen wurden mit getrockneter Erde durchgeführt und sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 11: Einwaagen von Komposterde (trocken) aus einem Garten

Blindprobe	5	6	7	8
m_K [g]	250,06	250,08	250,05	250,07

Die Proben wurden über die Siebkaskade gründlich gespült und die Siebe über Nacht bei 95 °C in den Trockenschrank gestellt. Anschließend wurden die einzelnen Fraktionen ausgewogen und nach Fremdstoffen und Mikroplastik untersucht.

Bei dem Gartenkompost ist die Trockensubstanz so hoch, dass eine Trockensiebung ausreicht. Die Körnung ist so klein, dass es keine Erde in der Fraktion größer als 5 mm gibt. Aufgrund der kleineren Probengröße sind die Rückstände auf den Sieben so gering, dass keine Wiegung durchgeführt wurde.

Die Ergebnisse der ersten vier Blindproben mit der Komposterde aus dem Baumarkt sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 12: Gewogene Fraktionen auf den Sieben

Fraktionen [mm]	Blindproben [g]			
	1	2	3	4
1 – 2	9,73	12,03	17,71	24,15
2 – 5	21,02	21,12	27,92	29,98
> 5	28,71	23,23	19,89	31,60

Die Blindproben 1 und 2 wurden über Nacht in den Trockenschrank gestellt. Die ausgewogenen Fraktionen der einzelnen Siebe sind ähnlich. Im Gegensatz dazu waren die Blindproben 3 und 4 nur für wenige Stunden im Trockenschrank und sind über das Wochenende an der Luft getrocknet. Daher sind die Massen an gewogener Komposterde höher, da die Erde vermutlich nicht komplett getrocknet war.

Für das Auszählen der Fremdstoffe ist es nicht von Bedeutung, dass die Erde zu 100 % trocken ist. Wichtig ist, dass die Erde trocken genug ist, um sie von den Sieben entfernen zu können. Die Komposterde wird auf der Arbeitsfläche ausgebreitet und in 8 Segmente (10 x 15 cm) geteilt. Jedes Segment wird einzeln nach Mikroplastik untersucht und anschließend zusammengeschoben. In folgender Tabelle 13 sind die gefundenen Fremdstoffe in den einzelnen Fraktionen aller Blindproben zusammengefasst.

Tabelle 13: Gefundene Fremdstoffe in den Blindproben

Fraktionen [mm]	Anzahl Fremdstoffe in den Blindproben							
	Baummarktkompost				Gartenkompost			
	1	2	3	4	5	6	7	8
1 – 2	2	4	3	5	1	0	0	0
2 – 5	1	4	3	5	0	0	0	0
> 5	2	1	0	1	0	0	0	0

Zu sehen ist ein deutlicher Unterschied in der Anzahl der gefundenen Partikel. Die Komposterde aus dem Baumarkt enthält zwischen 5 und 11 Fremdstoffpartikel in 500 g Probenmaterial. Im Vergleich dazu enthält die Komposterde aus dem Garten nur 1 Partikel in 500 g getrockneter Komposterde (Proben 5 und 6 zusammengefasst, da nur je 250 g gesiebt wurden).

In folgender Abbildung 24 sind die Fremdstoffe, welche in allen Blindproben gefunden wurden, in einem Foto nach den Fraktionen geordnet zusammengefasst.



Abbildung 24: Visualisierung der Fremdstoffe und MPP im Baumarkt- und Gartenkompost

3.4.2 Tests zur Ermittlung der Wiederfindungsrate

Um die Ergebnisse vergleichbar zu machen, wird vor jeder Untersuchung die Trockensubstanz bestimmt. Anschließend wird mit 500 g trockener Komposterde ein Test zur Wiederfindungsrate durchgeführt. Es werden sechs Proben mit Baumarktkompost und vier Proben mit Gartenkompost untersucht.

Die Ergebnisse der Trockensubstanzbestimmung sind in folgender Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Trockensubstanz der Proben

Proben			TS [%]
Komposterde	1	1.1	61,84
		1.2	63,17
	2	2.1	58,58
		2.2	57,99
	3	3.1	63,04
		3.2	63,02
	4	4.1	51,75
		4.2	52,17
	5	5.1	60,33
		5.2	60,39
Gartenkompost	7	6.1	59,92
		6.2	59,82
	8	7.1	83,70
		7.2	84,17
	9	8.1	83,86
		8.2	83,88
	10	9.1	88,10
		9.2	88,16
	10	10.1	87,82
		10.2	88,02

Aus der Trockensubstanz werden für jeden Test zur Wiederfindungsrate 500 g abgewogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Eingewogene Massen an Baummarktkompost und Gartenkompost (trocken)

Proben	1	2	3	4	5	6
Eingewogene Masse Baummarktkompost [g]	500,68	500,74	500,34	500,15	500,11	500,18

Proben	7	8	9	10
Eingewogene Masse Gartenkompost [g]	500,11	500,18	500,08	500,11

In die 500 g-Proben werden entsprechend Tabelle 9 die MPP zugemischt. Die zugesetzten Pellets sind in der folgenden Abbildung fotografisch dargestellt.



Abbildung 25: Gefundene zugesetzte MPP in Probe 3

Die Proben wurden einzeln gesiebt, getrocknet und ausgezählt. Nach der Trocknung über Nacht im Trockenschrank bei 95 °C werden die Fraktionen auf den Sieben ausgewogen und jeweils nach Fremdstoffen untersucht. Die gewogenen Fraktionen sind in folgender Tabelle 16 zusammengefasst. Bei dem Gartenkompost ist die Körnung so klein, dass es keine Erde in der Fraktion größer als 5 mm gibt. Die Rückstände auf den anderen beiden Sieben sind so gering, dass keine Wiegung durchgeführt wurde.

Tabelle 16: Gewogene Fraktionen auf den Sieben der Proben für die Wiederfindungsrate

Fraktionen [mm]	Proben [g]					
	1	2	3	4	5	6
1 – 2	56,00	37,34	35,56	31,72	36,71	34,53
2 – 5	68,51	52,37	49,72	40,49	56,14	37,30
> 5	45,34	42,16	40,80	45,84	37,41	50,81

Wird die Menge an Fremdstoffpartikeln, die nach dem Siebvorgang gefunden wird, mit der zugegebenen Menge verglichen, kann die Wiederfindungsrate bestimmt werden. Liegt diese bei über 100 %, so war die Komposterde mit Fremdstoffen kontaminiert. In diesem Fall wird der Anteil an nicht eigens zugegebenen Partikeln von der Wiederfindungsrate abgezogen, so dass eine korrigierte Rate berechnet wird.

Die Berechnung wird folgendermaßen durchgeführt:

$$\text{Wiederfindungsrate}_{\text{korrr.}} = \left(\frac{\text{gefundene Partikel} - \text{nicht zugesetzte Partikel}}{\text{zugesetzte Partikel}} \right) \cdot 100 \%$$

Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle 17 zusammengefasst und in Abbildung 26 graphisch dargestellt:

Tabelle 17: Berechnung der Wiederfindungsrate durch zugesetzte und gefundene Partikel

Proben		Zugesetzte Partikel	Gefundene Partikel	nicht eigens zugesetzte Partikel	Wiederfindungsrate	Wiederfindungsrate korrigiert
Komposterde aus dem Baumarkt	1	50	55	5	110 %	100 %
	2		56	6	112 %	100 %
	3		62	12	124 %	100 %
	4	25	44	19	176 %	100 %
	5		48	24	192 %	96 %
	6		38	13	152 %	100 %
Gartenkompost	7	25	24	0	96 %	96 %
	8		26	1	104 %	100 %
	9		25	0	100 %	100 %
	10		24	0	96 %	96 %

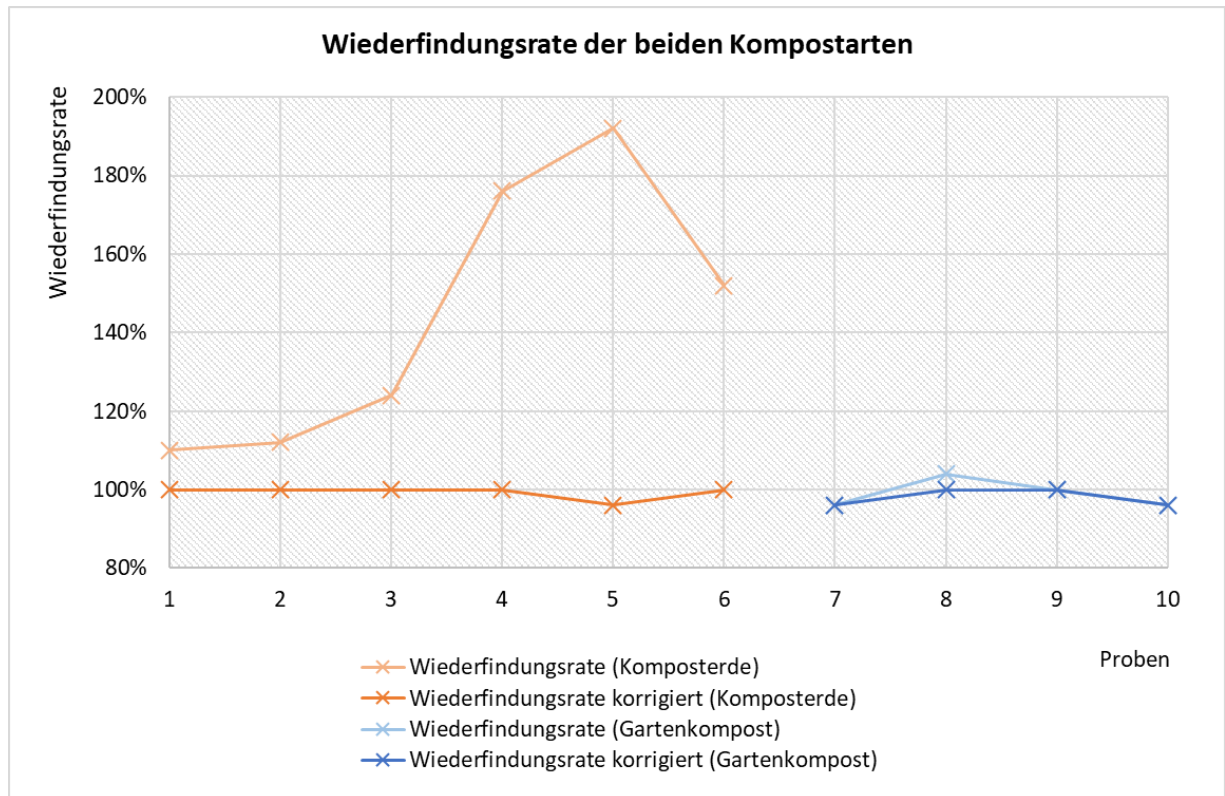


Abbildung 26: Wiederfindungsrate und korrigierte Wiederfindungsrate der Komposterde aus dem Baumarkt (Proben 1 - 6) und des Gartenkomposts (Proben 7 - 10)

Aus Tabelle 17 und Abbildung 26 ist ersichtlich, dass die Wiederfindungsrate in allen Proben außer in den Proben 5, 7 und 10 bei 100 % liegt. In Abbildung 25 sind die zugesetzten Partikel (Pellets) zu sehen. Diese sind in den einzelnen Fraktionen sehr gut von der restlichen organischen Substanz zu unterscheiden und einfach auszusortieren. Aufgrund dessen wurden ab Probe 4 nicht nur die Pellets verwendet, sondern auch die Plastikpartikel, die zusätzlich in den Proben gefunden wurden (siehe Tabelle 9). Da das Aussehen und die Form dieser Partikel dennoch bekannt waren, ist auch bei diesen Proben die Wiederfindungsrate sehr hoch. Lediglich in den Proben 5, 7 und 10 wurde jeweils ein Plastikteilchen in der Fraktion 1 - 2 mm nicht gefunden, weshalb hier die Wiederfindungsrate bei 96 % liegt.

Außerdem ist in Abbildung 26 ein sehr deutlicher Unterschied zwischen den beiden Kompostarten zu erkennen. Die beiden orangenen Kurven zeigen die Wiederfindungsraten der Komposterde aus dem Baumarkt. Im Vergleich zum Gartenkompost sind in diesen Proben sehr viele zusätzliche Fremdstoffe enthalten. Dazu zählen vor allem Folienfragmente, Hartplastikteilchen, Glas und vereinzelt Aluminiumfolienfragmente oder Schaumstoff. Im Gartenkompost hingegen wurde in allen Proben nur ein Teilchen in der Fraktion 1 - 2 mm gefunden. Das war eine Büroklammer.

Beispielhaft sind für die Wiederfindungsrate in folgender Abbildung die zugesetzten und die gefundenen Partikel gegenübergestellt.

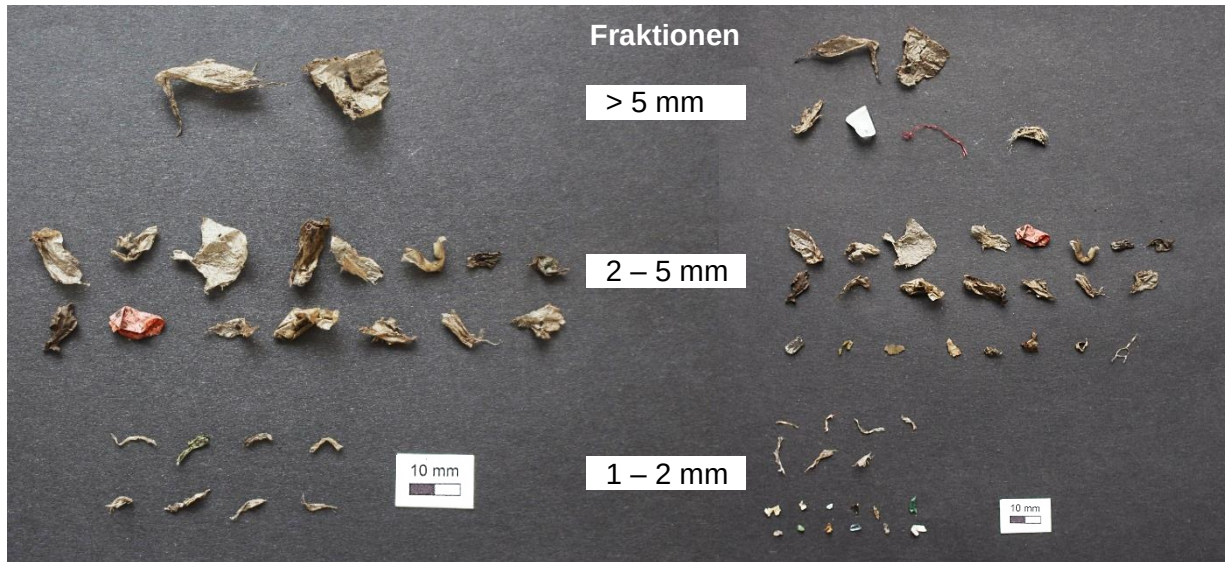


Abbildung 27: Vergleich der zugesetzten Partikel (links) und der gefundenen Partikel (rechts)

In Abbildung 27 ist zu sehen, dass in den Fraktionen > 5 mm und 2 - 5 mm alle zugesetzten Partikel auch wiedergefunden wurden. Lediglich in der Fraktion 1 - 2 mm wurde ein Partikel nicht mehr gefunden. In allen Fraktionen wurden auch zusätzlich noch Fremdstoffe aussortiert.

3.4.3 Untersuchung mit dem Lichtmikroskop

Exemplarisch wurden einige Partikel der Fraktion 1-2 mm unter dem Lichtmikroskop betrachtet. Diese Partikel sind jedoch so groß, dass lediglich die Struktur erkennbar war und nicht die Größe oder Form. In den folgenden Abbildungen sind Ausschnitte dargestellt.

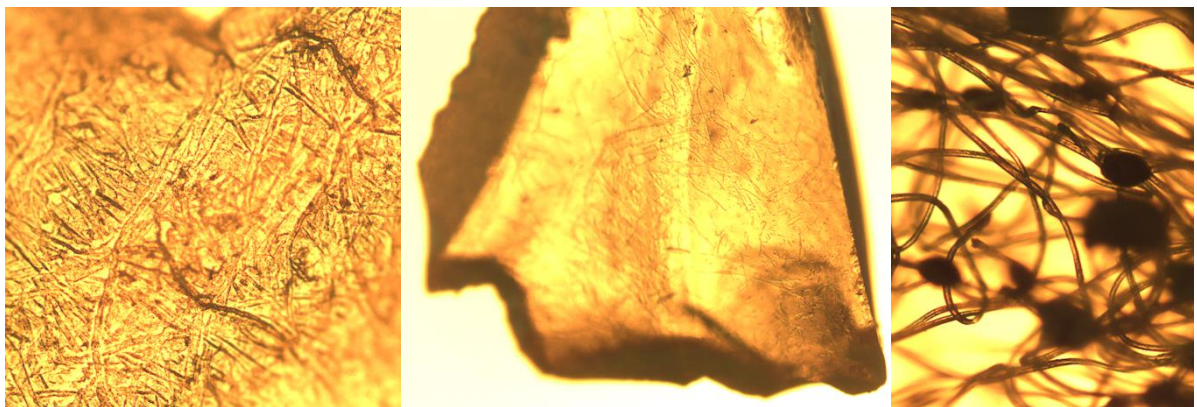


Abbildung 28: Fremdstoffpartikel unter dem Lichtmikroskop: Plastikfolie, Glas, Textilfaser (von links nach rechts)

3.4.4 Untersuchung mit dem Raman-Spektrometer

Beispielhaft wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Stichprobe der Fraktion $< 1\text{ mm}$ unter einem Raman-Spektrometer betrachtet. Dies ist Abbildung 29 dargestellt.



Abbildung 29: Stichprobe der Fraktion $< 1\text{ mm}$ unter dem Raman-Spektrometer

Einige dieser Partikel (farbig eingekreist) könnten Plastik, Glas oder mineralische Bestandteile sein. Lediglich das größte Partikel unten in der Mitte in Abbildung 29 konnte ohne Zweifel als Glas bestimmt werden. Für eine Identifizierung der anderen Partikel ist eine genauere spektroskopische Analyse notwendig. Weitere Bildausschnitte von der Untersuchung unter einem Lichtmikroskop sind im Anhang aufgeführt gezeigt. (siehe Kapitel 7.4)

4 BESTIMMUNG VON FREMDSTOFFEN UND MIKROPLASTIK IN AUSGEWÄHLTEN KOMPOSTPROBEN

Die entwickelte Methode wurde an Kompostproben aus einer Kompostierungs- und einer Vergärungsanlage eingesetzt. Im Folgenden wird die Technik der Kompostierungs- und einer Vergärungsanlage erläutert, die Probennahmen beschrieben sowie die Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert.

4.1 Einführung

Im Zuge dieser Masterarbeit wurden zwei Komposte von zwei verschiedenen Anlagen auf Mikroplastik und Fremdstoffe untersucht.

Die erste Anlage ist eine Bioabfallvergärungsanlage mit einem Einzugsgebiet von ca. 900.000 Einwohnern. In der Anlage wird überwiegend Bioabfall aus Haushalten verarbeitet. Saisonbedingt wird Pflanzenabfall beigemischt. Die Jahresdurchsatzmenge beträgt im Schnitt 25.000 Tonnen. Dadurch wird eine jährliche Biogasmenge von 2.600.000 Kubikmeter erzeugt, womit ca. 1.500 Haushalte mit regenerativem Strom (Ökostrom) versorgt werden können. Vor der Vergärung werden mit einem Sieb Fremdstoffe größer 60 cm abgetrennt. Im Anschluss findet eine Metallabscheidung statt. Die Vergärung wird kontinuierlich betrieben. Der Aufenthalt im Fermenter beträgt etwa 21 Tage. Das Produkt wird gepresst und das Presswasser wird teilweise zur Bewässerung zurück in den Fermenter geleitet. Alternativ kann es als Flüssigdünger in der Landwirtschaft verwendet werden. Die Feststoffe werden aufbereitet, etwa sieben Tage belüftet und anschließend auf Mieten kompostiert. Vor dem Absatz in der Landwirtschaft wird der Fremdstoffanteil mittels Stern- und Trommelsieben weiter reduziert. Der Kompost ist RAL-gütegesichert.

Die zweite Anlage ist eine Pflanzenkompostierungsanlage. Ausgangsmaterial für die Kompostierung sind ausschließlich Grünabfälle. Es werden keinerlei Biotonnenabfälle verarbeitet. Das Einzugsgebiet umfasst etwa 120.000 Einwohner. Kompostiert werden im Jahr durchschnittlich 17.000 Tonnen Frischmaterial. Dieses wird an Sammelstellen im Einzugsgebiet erfasst und mit Sammelfahrzeugen zur Anlage geliefert. Nur ca. 5 - 10 % werden direkt an die Kompostierungsanlage angeliefert. Die Kompostierung erfolgt in offenen Mieten. Die angelieferten Ausgangsstoffe werden zunächst mit einem Schredder zerkleinert und anschließend zur jeweiligen Vorrottefläche transportiert. Mieten mit einer Breite von 6,0 m sowie einer Höhe von ca. 2,00 m

bis 2,50 m werden aufgebaut. Die Gesamtröttezeit zur Erzeugung eines ausgereiften, hochwertigen Kompostes beträgt etwa ein halbes bis ein Jahr. Erzeugt wird auf der Anlage sowohl Fertigkompost als auch Frischkompost. Der Fertigkompost wird vor allem an Garten- und Landschaftsbaubetriebe geliefert und der Frischkompost (bzw. angerottetes Mulchmaterial) wird fast ausschließlich an die Landwirtschaft abgegeben. Der erzeugte Kompost ist ebenfalls RAL-gütegesichert.

4.2 Probenahme

Beprobt wurde jeweils eine Miete Fertigkompost. Als Gefäß wurden 13 L- Edelstahlimer verwendet. Diese wurden mit Kompost gefüllt. Dazu wurde mit einer Schaufel an verschiedenen Stellen der Miete Kompost entnommen. Dabei wurden alle Mietenbereiche, Mietenfuß, -seite und first, sowie an der Oberfläche und im Inneren, beprobt.

In den folgenden Abbildungen sind von beiden Anlagen die Probenahmebereiche und eine Nahaufnahme der Körnung der organischen Substanz fotografisch dokumentiert.



Abbildung 30: Fertigkompostmiete mit Probenahmebereich



Abbildung 31: Nahaufnahme des Komposts der Kompostierungsanlage (links) und der Vergärungsanlage (rechts)



Abbildung 32: Miete des aerob nachbehandelten Gärrückstandes

4.3 Durchführung der Versuche

Die Durchführung der Versuche ist vergleichbar mit der Bestimmung der Wiederfindungsrate. Auch hier wird eine Nasssiebung durchgeführt. Die genaue Beschreibung der Durchführung

findet sich in Kapitel 3.3. Die Untersuchung und die Ergebnisse werden schriftlich und fotografisch dokumentiert. Zum Vergleich werden mehrere Proben von jeweils einem Kilogramm untersucht.

Bei der Untersuchung der Proben beider Anlagen wird folgende Vorgehensweise angewendet. Diese ist in Abbildung 33 dargestellt.

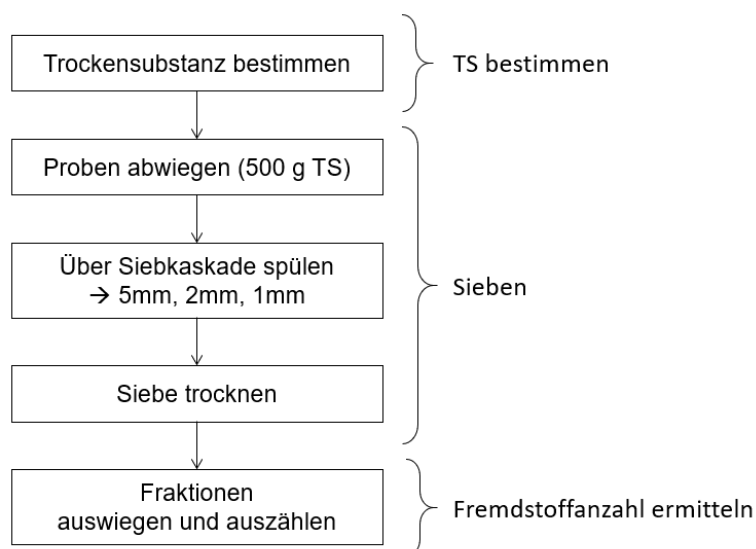


Abbildung 33: Vorgehen zum Untersuchen der Proben auf Mikroplastik und Fremdstoffe

4.4 Ergebnisse und Diskussion

4.4.1 Pflanzenabfallkompostierungsanlage

Am Anfang vor jeder Untersuchung wird für die Vergleichbarkeit die Trockensubstanz bestimmt. Die Ergebnisse der TS-Bestimmung sind in folgender Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18: Trockensubstanz der Proben

Proben		TS [%]
1	1.1	71,85
	1.2	71,39
2	2.1	73,43
	2.2	71,82
3	3.1	73,70
	3.2	76,64
4	4.1	73,18
	4.2	71,97

In Tabelle 18 ist zu erkennen, dass die Trockensubstanz relativ konstant ist. Im Mittel hat der Kompost eine TS von 73 %. Die Abweichung in den einzelnen Ergebnissen lässt sich durch die sehr inhomogene Masse erklären. Der Kompost weist eine sehr unterschiedliche Körnung von wenigen Mikrometern bis zu mehreren Zentimetern auf.

Untersucht werden vier Proben mit jeweils einem Kilogramm Trockensubstanz. Diese Probe wurde in zwei 500 g-Portionen gesiebt und am Ende wieder zusammengefasst. Die eingewogenen Massen (gesamt) sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 19: Eingewogene Massen an Kompost (trocken)

Proben	abgewogene Mengen [g TS]
1	1000,08
2	1000,09
3	1000,09
4	1000,07

Bei jedem Siebvorgang werden jeweils die Zeit und der Wasserverbrauch dokumentiert. Dies ist in Tabelle 20 zusammengefasst.

Tabelle 20: Zeitdauer und Wasserverbrauch der Siebdurchgänge

Proben		Zeit [min]	Wasserverbrauch [L]
1	1.1	25	109
	1.2	25	112
2	2.1	30	114
	2.2	35	115
3	3.1	25	107
	3.2	25	110
4	4.1	30	108
	4.2	25	112
Durchschnitt		27,5	110,88

Nach der Trocknung über Nacht im Trockenschrank bei 95 °C werden die Fraktionen auf den Sieben ausgewogen und anschließend einzeln nach Fremdstoffen untersucht. Die gewogenen Fraktionen sind in folgender Tabelle 21 zusammengefasst. Die Fraktion kleiner als 1 mm kann nicht durch Wiegen bestimmt werden, da diese beim Sieben verworfen wird. Berechnet ergibt sich die Fraktion aus der Differenz der eingewogenen Masse und der Masse der drei Fraktionen (> 5 mm, 2 – 5 mm und 1 – 2 mm).

Tabelle 21: Gewogene Fraktionen auf den Sieben der Proben

Fraktion [mm]	Proben [g]			
	1	2	3	4
> 5	94,11	105,27	163,11	113,26
2 – 5	126,41	147,93	132,22	154,36
1 – 2	85,32	117,77	91,62	114,48
< 1	694,24	629,12	613,14	617,97
Summe	1000,08	1000,09	1000,09	1000,07

Die Fraktionen werden einzeln nach Fremdstoffpartikeln untersucht. Die einzelnen Ergebnisse der 500 g-Proben werden zum Vergleich zu Kilogrammproben zusammengefasst. Die gefundenen Partikel sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 22: gefundene Fremdstoffpartikel in den Proben

Proben	Maschenweite			
	1-2 mm	2-5 mm	> 5 mm	gesamt
1	22	16	5	43
2	30	33	3	66
3	48	16	4 (+1)	68
4	31	12	1	44

Beispielhaft sind in folgender Abbildung 34 ausgewählte gefundene Fremdstoffe fotografisch dargestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Proben sind im Anhang aufgeführt. (siehe Kapitel 7.3.1)



Abbildung 34: gefundene Fremdstoffe der Kompostierungsanlage sortiert nach Folien, Fasern, Fragmenten, Glas und Metall / Alu (von links nach rechts)

4.4.2 Bioabfallvergärungsanlage

Die Ergebnisse der Untersuchung des Komposts der Bioabfallvergärungsanlage sind im Folgenden analog zum vorigen Kapitel 4.4.1 zusammengefasst.

Tabelle 23: Trockensubstanz der Proben

Proben		TS [%]
1	1.1	59,35
	1.2	59,19
2	2.1	59,72
	2.2	58,86
3	3.1	58,46
	3.2	58,83
4	4.1	62,18
	4.2	60,58
5	5.1	59,79
	5.2	59,38

Tabelle 24: Eingewogene Massen an Kompost (trocken)

Proben	abgewogene Mengen [g TS]
1	1000,11
2	1000,09
3	1000,08
4	1000,07
5	1000,13

Tabelle 25: Zeitdauer und Wasserverbrauch der Siebdurchgänge

Proben		Zeit [min]	Wasserverbrauch [L]
1	1.1	25	98
	1.2	20	73
2	2.1	20	77
	2.2	20	77
3	3.1	25	78
	3.2	25	77
4	4.1	20	77
	4.2	25	78
5	5.1	25	79
	5.2	25	78
Durchschnitt		23	79,2

Tabelle 26: Gewogene Fraktionen auf den Sieben der Proben

Fraktion [mm]	Proben [g]				
	1	2	3	4	5
> 5	61,40	55,60	52,94	45,88	44,11
2 – 5	281,21	260,12	261,36	277,81	271,37
1 – 2	217,91	205,01	196,79	193,35	218,95
< 1	439,59	479,36	488,99	483,03	456,7
Summe	1000,11	1000,09	1000,08	1000,07	1000,13

Tabelle 27: gefundene Fremdstoffpartikel in den Proben

Proben	Fremd- und Mikroplastikpartikel			
	1-2 mm	2-5 mm	> 5 mm	gesamt
1	152	182	26	360
2	164	163	24	351
3	214	184	25	423
4	192	155	35	382
5	185	209	35	429

Beispielhaft sind in folgender Abbildung 35 gefundene Fremdstoffe fotografisch dargestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Proben sind im Anhang aufgeführt. (siehe Kapitel 7.3.2)



Abbildung 35: gefundene Fremdstoffe der Vergärungsanlage sortiert nach Folien, Fasern, Fragmenten, Glas und Metall / Alu (von links nach rechts)

4.4.3 Zusammenfassung der beprobten Komposte

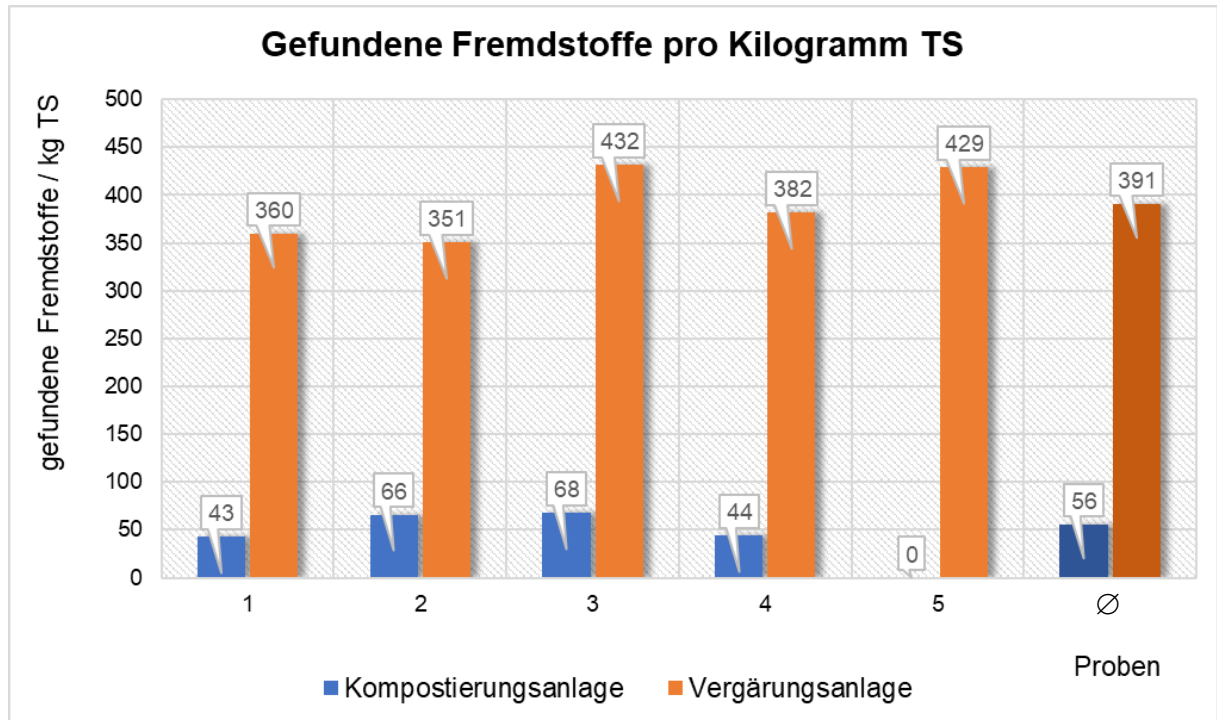


Abbildung 36: Vergleich der gefundenen Fremdstoffe und MPP pro Kilogramm TS der beiden untersuchten Anlagen

In Abbildung 36 sind die Fremdstoff- /MPP-Gehalte der unterschiedlichen untersuchten Komposte der Bioabfallvergärungsanlage (orange) und der Pflanzenabfallkompostierungsanlage (blau) gegenübergestellt. Es ist ein deutlicher Unterschied in den gefundenen Partikelanzahlen zu erkennen. Der Bioabfallkompost enthält sehr viel mehr Fremdstoffe als der Pflanzenabfallkompost. Im Durchschnitt weist der untersuchte Bioabfallkompost etwa 6-fach höhere Fremdstoffpartikel auf als der Pflanzenkompost. Beide Komposte unterliegen der RAL-Gütesicherung. Ob die Vorgaben zu den Grenzwerten eingehalten sind kann nicht untersucht werden. Die Grenzwerte zu Fremdstoffen liegen bei 15 cm² pro Liter Frischsubstanz. [52] Diese Werte wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht bestimmt.

Vor der Untersuchung ausgewählter Proben wurde eine Wiederfindungsrate der Partikel bestimmt, um die Qualität der Messergebnisse zu validieren. Die ermittelte Wiederfindungsrate beträgt im Schnitt 98 %. Das bedeutet, dass etwa 2 % der Fremdstoffe bei der Untersuchung nicht aussortiert wurden. Die Ergebnisse, die in Abbildung 36 dargestellt sind, sind nicht um die Wiederfindungsrate korrigiert. Es sind die absoluten Zahlen abgebildet, die bei der Untersuchung ermittelt wurden.

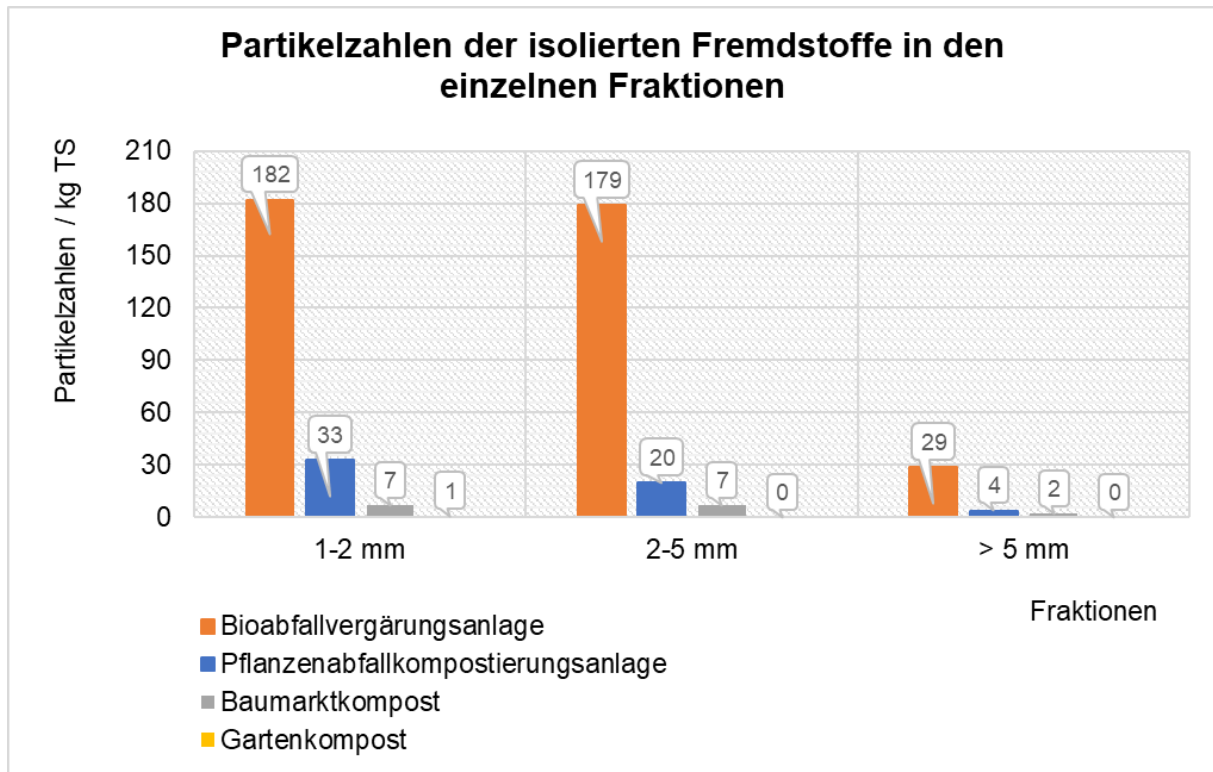


Abbildung 37: Partikelzahlen der isolierten Fremdstoffe in den einzelnen Fraktionen pro kg TS

Bezüglich der Größenverteilung der isolierten Fremdstoffe und MPP liegen die meisten Partikel in der Fraktion 1-2 mm. In der Bioabfallvergärungsanlage lag die Größenverteilung im Durchschnitt ungefähr zu gleichen Teilen in den Fraktionen 1-2 mm (182 Partikel) und 2-5 mm (179 Partikel). Vergleichsweise nur sehr wenig Partikel wurden in der Fraktion größer als 5 mm (29 Partikel) gefunden. In der Pflanzenabfallkompostierungsanlage wurden die meisten Partikel in der kleinsten Fraktion 1-2 mm aussortiert (33 Partikel). Etwas weniger Fremdstoffe wurden in der Fraktion 2-5 mm entdeckt (20 Partikel). Mit Abstand am wenigsten Partikel sind in der Fraktion größer als 5 mm gefunden worden (4 Partikel).

Im Vergleich zu den beiden beprobten Anlagen sind im Baumarktkompost sehr wenig Partikel. Untersucht wurden in dieser Masterarbeit 500 g-Proben des Baumarktkomposts. Die Ergebnisse der Blindproben wurden für Abbildung 37 auf Kilogrammproben hochgerechnet, um einen Vergleich vornehmen zu können. In den Fraktionen 1-2 mm und 2-5 mm sind die meisten Fremdstoffe gefunden worden (jeweils 7 Partikel). Die mit Abstand wenigsten Partikel wurden in der Fraktion größer als 5 mm gefunden (2 Partikel).

Der Gartenkompost enthält nur ein einziges Partikel in der Fraktion 1-2 mm. Dieser Kompost wurde sehr bedacht gepflegt und nur ausgewählte Stoffe (Küchen- und Gartenabfälle) wurden hier kompostiert.

4.4.4 Diskussion

Komposte und Gärprodukte werden hauptsächlich zur Düngung in der Landwirtschaft, aber auch im privaten Gartenbau eingesetzt.

Um das Wertstoffpotenzial optimal zu nutzen, ist eine getrennte Sammlung von Bioabfällen erforderlich. In der Theorie wird eine reine organische Fraktion, welche gut für die Vergärung oder die Kompostierung geeignet ist, gesammelt. Dem wirken die BioAbfV bzw. die Gütebestimmungen durch Begrenzung der Fremdstoffe und Folien entgegen. Trotzdem erfolgt ein Eintrag von sehr vielen Fremdstoffen, wie z.B. Plastik, durch den Bioabfall (siehe Kapitel 2.2.2). Mit dem Sammeln dieser verunreinigten Bioabfälle gelangen sämtliche enthaltenen Fremdstoffe in die Bioabfallbehandlungsanlagen. Die Fremdstoffbestimmungen dieser Arbeit bestätigen diese Aussage.

In den untersuchten Kompostproben der Bioabfallvergärungsanlage wurden hauptsächlich Folienfragmente isoliert. Diese sind wahrscheinlich sekundäres Mikroplastik, welches durch Zerfall von größeren Plastikmaterialien wie Kompostbeutel aus Bioplastik entstanden ist. Die Fragmente sind auch ohne spektroskopische Untersuchung optisch sehr deutlich als Folienstücke erkennbar. In der Abbildung ist ein Partikel exemplarisch photographisch gezeigt.



Abbildung 38: Nahaufnahme eines Folienfragments (links) und eines Glasfragments (rechts) in der Fraktion 2-5 mm

In der kleinen Siebfraktion (1-2 mm) wurden vergleichsweise viele Glasfragmente gefunden. Vermutlich sind diese durch Fehlwürfe von Glasflaschen oder kaputten Gläsern in die Biotonne gelangt. Durch das Umleeren beim Sammeln und den Transport der Tonnen sowie bei der Behandlung wurden größere Glasscherben oder ganze Flaschen bzw. Gläser vermutlich stark zerkleinert. Diese Fragmente sind zu klein, um vor der Behandlung aussortiert werden zu können und gelangen in den fertigen Kompost. Glasfragmente sind vor allem durch Lichtreflexion

sehr deutlich von der organischen Substanz zu unterscheiden und leicht als Glas zu identifizieren. Sonstige Partikel, die aussortiert wurden, waren Fasern, Textilfasern, Schaumstoff, Aluminiumfolie, Tackernadeln oder Hartplastikfragmente. Aluminiumfolie wird viel zum Einpacken und Aufbewahren von Essensresten verwendet. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass diese zusammen in den Bioabfall entsorgt wurden. Hartplastikfragmente könnten Verpackungsreste sein. Ist z.B. das Mindesthaltbarkeitsdatum abgelaufen, werden noch verschlossene Verpackungen in den Biomüll entsorgt. Ansonsten sind vermutlich unachtsame Fehlwürfe von Haushaltsmaterialien wie Tackernadeln, Textilien oder Verpackungsmaterialien wie Schaumstoff Ursache der gefundenen Fremdstoffe in den Kompostproben.

In den Proben der Pflanzenabfallkompostierungsanlage wurden trotz Verwertung reiner Pflanzenabfälle Plastikpartikel und Fremdstoffe gefunden. In diesen Proben wurden hauptsächlich Folienfragmente und Fasern aussortiert. Folien gelangen wahrscheinlich durch die Sammlung der Grünabfälle in entsprechenden Plastikbeuteln in den Kompost. Werden z.B. Äste mit Schnüren für den Transport zusammengebunden, können auch die Fasern mit dem Grünschnitt zusammen in die Behandlungsanlagen gelangen. In den Proben wurden zusätzlich Glas- und Hartplastikfragmente identifiziert.

In allen Proben sowohl der Bioabfallvergärungsanlage als auch der Pflanzenabfallkompostierungsanlage wurden Folienfragmente gefunden. Es wurde keine spektroskopische Analyse im Anschluss an die optische Sortierung durchgeführt. Es ist jedoch bekannt, dass Plastikfolien hauptsächlich aus PE, PP oder PS bestehen. Vor allem PE und PS sind persistent in der Umwelt. Daher ist eine Anreicherung dieser Fragmente, welche über dem Kompost in die Umwelt gelangen, über einen längeren Zeitpunkt sehr wahrscheinlich.

Die kleinste Fraktion, die im Rahmen der Masterarbeit untersucht werden konnte, war 1 mm. Die optische Sortierung war hier teilweise sehr schwierig, da die Partikel in einigen Fällen dieselbe Form und Farbe wie die organische Substanz aufwiesen. Durch die geringe Größe der Partikel war eine genaue Identifizierung als Fremdstoff oder Mikroplastik nicht immer einfach. Mittels einer genauen Betrachtung vermuteter Fremdpartikel sowohl durch Fühlen, Betrachten oder „versuchtes Zerreißen“ wurde eine möglichst präzise Auswahl getroffen und eine quantitative Auswertung durchgeführt.

Eine Fragmentierung von Plastikteilen in Partikelgrößen kleiner als 1 mm ist in der Natur durch z.B. Wellenwirkung oder UV-Strahlung wahrscheinlicher als in Bioabfallbehandlungsanlagen. Dennoch ist z.B. durch das Umsetzen der Kompostmieten oder die mechanische Beanspruchung beim Sieben eine Fragmentierung im Kompost nicht auszuschließen. Eine optische Sortierung dieser Partikel ist jedoch nicht mehr ohne großen Aufwand möglich. Mit bloßem

Außerdem sind Fremdstoffe nicht mehr zu erkennen. Aufgrund des sehr hohen Anteiles an organischer Substanz ist eine Sortierung unter dem Lichtmikroskop extrem aufwändig und für große Mengen nicht effizient. Auch eine Entfernung der organischen Substanz ist kaum möglich.

Die vorliegende Arbeit hat sich mit der Untersuchung und Methodenentwicklung von Fremdstoffen und MPP und Komposten unterschiedlicher Herkunft befasst. Die Ergebnisse geben einen ersten Einblick zum MPP-Gehalt verschiedener Kompostproben. Sie sind aber nur eingeschränkt repräsentativ für die Fremdstoffbestimmung in Komposten. Es wurde nur jeweils eine Anlage mit dem Eingangsmaterial Pflanzenabfall und aerober Behandlung bzw. Bioabfall mit anaerober Behandlung und abschließender Kompostierung beprobt. Auch wurden jeweils nur 4 kg bzw. 5 kg des Komposts auf Fremdstoffe durchsucht. Für statistisch repräsentative Ergebnisse sind deutlich mehr Proben von mehreren verschiedenen Anlagen notwendig. Durch zeitliche und logistische Gegebenheiten war dies im Rahmen der vorliegenden Abschlussarbeit jedoch nicht möglich. Eine bundesweite Extrapolation ist aufgrund der eingeschränkten Ergebnisse nicht möglich.

Die Siebversuche wurden mit der Methodik der Studie der Universität Bayreuth „Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment“ [2] durchgeführt. Für die Siebung wurden dieselben Maschenweiten von 1, 2 und 5 mm ausgewählt, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Durchführung und Ergebnisse der Studie sind in Kapitel 2.6.2 zusammengefasst. Insgesamt wurden in der Bayreuther Studie Kompostproben zweier Bioabfallvergärungsanlagen (Anlagen B und D) untersucht. Die gefundenen Partikel pro Kilogramm variieren sehr stark zwischen 70 und 895. Die mittlere Fremdstoffanzahl betrug 309 pro Kilogramm. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Bioabfallvergärungsanlage beprobt. Die durchschnittliche Partikelzahl betrug hier 390 pro Kilogramm. Es wurde von den Forschern der Universität Bayreuth nur eine Kompostierungsanlage untersucht. Diese verarbeitet Bioabfall. Somit sind die Ergebnisse nicht direkt mit den Ergebnissen der hier untersuchten Pflanzenabfallkompostierungsanlage zu vergleichen. In der Bayreuth-Studie wurden nur Vergärungsanlagen, die reine Energiepflanzen oder landwirtschaftliche Abfälle verwerten, untersucht. Diese Ergebnisse sind ebenfalls nicht direkt mit dem Untersuchungsergebnis der Pflanzenabfallkompostierungsanlage vergleichbar. Dennoch sind die Ergebnisse in folgender Abbildung gegenübergestellt.

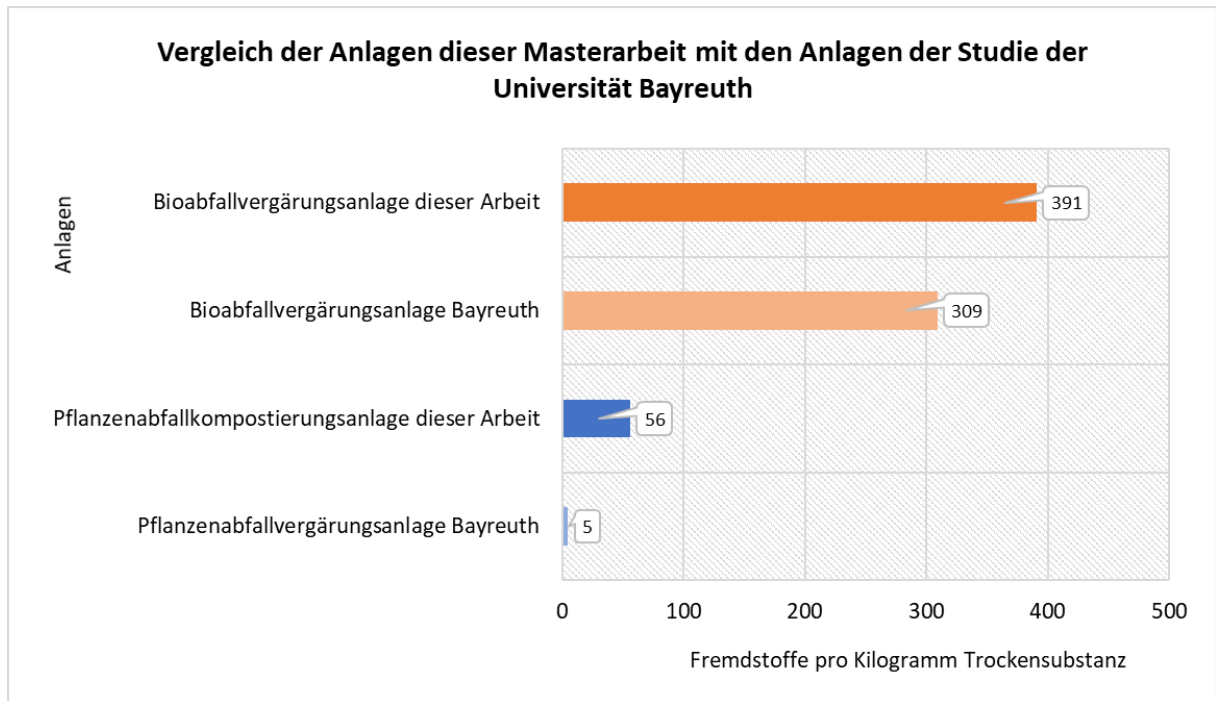


Abbildung 39: Vergleich der Partikelzahlen der untersuchten Anlagen dieser Masterarbeit mit den untersuchten Anlagen der Studie der Universität Bayreuth

5 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Der Wissensstand zum Vorkommen von Kunststoffen bzw. Fremdstoffen im Boden und Kompost ist deutlich geringer als der zu Gewässern und Ozeanen. Es gibt sehr wenige Untersuchungen, die die Einträge aus verschiedenen Quellen in den Boden quantifizieren. Wegen fehlender Einheitlichkeit der Untersuchungsmethoden lassen sich Vergleiche zwischen Literaturergebnissen kaum durchführen.

Darüber hinaus herrschen erhebliche Wissenslücken in Bezug auf das Schadpotenzial von Mikroplastik im Boden und auf die dort vorhandenen Lebewesen. Die Auswirkungen von anhaftenden oder enthaltenen toxischen Substanzen sind nur in Einzelfällen untersucht worden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode zur Bestimmung von Fremdstoffen und MPP in Komposterden entwickelt. Teil der Methodenentwicklung sind Tests zur Wiederfindungsrate. Im Idealfall sollte die dafür verwendete Komposterde kontaminationsfrei sein. Es ist schwierig, unbelasteten Kompost zu finden. Die Komposterde aus dem Baumarkt wies im Schnitt 7 Fremdstoffpartikel pro 500 g Trockensubstanz auf. Der streng kontrollierte Gartenkompost weist nur im Einzelfall ein Fremdstoffpartikel auf. Bei der Untersuchung einer Pflanzenabfallkompostierungsanlage wurden pro Kilogramm Trockensubstanz im Schnitt 56 Partikel isoliert und bei einer Bioabfallvergärungsanlage im Mittel 391. Die Wiederfindungsrate der zugesetzten Partikel mit 1-5 mm Korngröße wurde zu etwa 98 % ermittelt. Die untersuchten Proben geben keine genauen Zahlen für sämtliche Fremdstoffe an. Es konnten Partikel mit einer Größe zwischen ein und fünf Millimeter quantitativ bestimmt werden. Die tatsächliche Zahl an MPP und Fremdstoffen in Kompost ist wahrscheinlich höher als die gefundenen Ergebnisse. Quantitative Untersuchungen im Bereich kleiner 1 mm sind lichtmikroskopisch praktisch nicht durchführbar. Genommene Stichproben dieser Fraktion zeigen, dass noch weitere Fremdpartikel im Kompost enthalten sind. Eine quantitative und qualitative Analyse in dieser Partikelklasse konnte nicht erfolgen.

Die Zuverlässigkeit der in dieser Arbeit entwickelten Methode ist abhängig von der Sorgfalt des Durchführenden. Allgemein kann eine reine optische Identifizierung durch fehlerhafte Zuordnung oder das Nichterkennen einiger Partikel beeinflusst werden. Durch eine Kombination mit spektroskopischen Methoden zur qualitativen Untersuchung könnte die Methodik weiter optimiert werden. Durch den händischen Siebvorgang ist die Trennung in die einzelnen Fraktionen ausreichend, jedoch ungenauer als automatisierte mechanische Trennmethode, wie z.B. ein Rüttelsieb. Diese erhöhen die Trennschärfe. Durch das automatisierte mechanische Sieben der Trockensubstanz kann die Organik leichter zerfallen und die Fremdstoffe sind

leichter zu identifizieren. Eine Möglichkeit, die Untersuchungsschritte zukünftig weiter zu optimieren, ist der Einsatz von Chemikalien. Durch das Entfernen der organischen Substanz der Rückständen auf den Sieben nach dem Siebvorgang z.B. mit Wasserstoffperoxid, können Fremdstoffgehalte zuverlässig quantitativ bestimmt werden. Die Chemikalie oxidiert den organischen Anteil der Probe und die Fremdstoffe bleiben zurück. Aufgrund des sehr hohen Anteils an organischer Matrix ist der Zusatz von Chemikalien praktisch schwierig durchzuführen bei gleichzeitig hohem Chemikalienverbrauch.

Ein übergreifender Vergleich der Ergebnisse ist eingeschränkt möglich, da bisher nur eine vergleichbare Studie zu MPP in Kompost vorliegt (Studie der Universität Bayreuth). Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind aus statistischer Sicht im Vergleich zu den Ergebnissen der Studie der Universität Bayreuth weniger repräsentativ. Es wurden insgesamt zwei Anlagen beprobt. Pro Anlage wurden vier bzw. 5 Kilogramm Kompost auf Fremdstoffe untersucht. Durch die Untersuchung mehrerer Proben kann die statistische Signifikanz der Messwerte grundsätzlich verbessert werden. In der Studie von Bayreuth wurden insgesamt 14 Anlagen beprobt sowie größere Probenmengen pro Anlage untersucht. Die aussortierten Fremdpartikel wurden mittels spektroskopischer Analyse identifiziert. Dadurch konnten optisch falsch identifizierte Partikel erkannt und aussortiert werden. Die Ergebnisse sind in Hinblick auf die Genauigkeit statistisch relevanter. Entscheidend beim Vergleich dieser beiden Arbeiten ist die Personenanzahl. An der Bayreuther Studie war eine Arbeitsgruppe beteiligt, wohingegen bei dieser Arbeit nur eine Person die Untersuchungen durchgeführt hat. Unabhängig von der Zahl der Untersuchenden sind die Ergebnisse beider Arbeiten sehr ähnlich. Als Ergebnis kann für den Fremdstoffgehalt in Kompost aus haushaltstypischen Bioabfällen von 300 bis 400 Partikeln pro Kilogramm Trockensubstanz ausgegangen werden.

Als Empfehlung sollten in Zukunft verstärkt Maßnahmen zur Minimierung von Fremdstoffeinträgen an der Quelle vorgenommen werden. Sowohl die Aufklärung der Bürger als auch Kontrollen z.B. der Bioabfalltonnen sollten vermehrt durchgeführt werden. Bei Verstößen gegen die Sortenreinheit von Bioabfällen sind ggfs. Disziplinarmaßnahmen erforderlich.

Allgemein müssen mehrere Studien speziell zum Thema Fremdstoffe in Kompost in Form von Ringversuchen durchgeführt werden, um alle Ergebnisse dieser Arbeit zuverlässig einzuordnen. Ringversuche dienen der Qualitätssicherung der angewendeten Messverfahren. Dabei werden identische Proben mit gleichen oder unterschiedlichen Verfahren untersucht und die Ergebnisse auf Genauigkeit verglichen. Somit können Untersuchungsmethoden bzw. -vorschriften validiert werden und der Vergleich von Ergebnissen verschiedener Studien ist übergreifend möglich.

In Bezug auf eine beabsichtigte Verwendung des Komposts als Düngemittel sind zusätzliche Untersuchungen sinnvoll, um die Folgen der Belastung von Kompost aus anaeroben und aeroben Behandlungsanlagen mit Fremdstoffen und Mikroplastik zu beurteilen. Eine Beeinträchtigung der Bodenqualität oder Auswirkungen auf Lebensformen im Boden kann Untersuchungsgegenstand zukünftiger Studien sein. Damit steigt der Wissensstand durch eine mögliche Aufnahme der Fremdstoffe über die Nahrungskette. Erst mit solchen Erkenntnissen kann eine Risikobewertung sinnvoll durchgeführt werden und eine ganzheitliche Betrachtung der Auswirkungen von MPP und Fremdstoffen erfolgen.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Umweltbundesamt, „Kunststoffabfälle,“ 20 Dezember 2018. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#textpart-1>. [Zugriff am 4 August 2019].
- [2] N. Weithmann, J. N. Möller, M. G. J. Löder, S. Piehl, C. Laforsch und R. Freitag, „Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment,“ *Science Journals - AAAS*, 4, 2018.
- [3] S. Piehl, A. Leibner, M. G. J. Löder, R. Dris, C. Bogner und C. Laforsch, „Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland,“ *Scientific reports*, 2018.
- [4] J. Bertling, L. Hamann, R. Bertling, T. Bladier, R. Kopitzky, D. Maga, N. Thonemann und T. Weber, „Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen.; Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.),“ Fraunhofer Verlag, Kurzfassung der Konsortialstudie, Oberhausen , DOI 10.24406/UMSICHT-N-497117, 2018.
- [5] C. Arthur, J. Baker und H. Bamford, „Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris,“ NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-30, 2008.
- [6] U. Braun, M. Jekel, G. Gerdt, N. P. Ivleva und J. Reiber, „Mikroplastik-Analytik. Probenahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren,“ Plastik in der Umwelt: Quellen, Senken, Lösungsansätze, Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2018.
- [7] Bundesregierung, „Mikroplastik – Gefahr für Umwelt und Gesundheit,“ Bundesanzeiger Verlag GmbH, ISSN 0722-8333, 2018.
- [8] R. Bertling, J. Bertling und M. Hiebel, „Mikroplastik - Fraunhofer UMSICHT nimmt Stellung,“ Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Positionspapier, DOI 10.24406/UMSICHT-N-477483, 2015.

-
- [9] B. Liebmann, H. Brielmann, H. Heinfellner, P. Hohenblum, S. Köppel, S. Schaden und M. Uhl, „Mikroplastik in der Umwelt,“ Umweltbundesamt GmbH, Wien, Publikation, 9783990043622, 2015.
- [10] M. Kern, T. Raussen, K. Funda, A. Lootsma und H. Hofmann, *Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz*, [online] <http://www.uba.de/uba-info-medien/4010.html> ISSN 1862-4804: Umweltbundesamt, 2010.
- [11] R. Brunstermann, „Biologische Abfallbehandlung,“ Modul Abfallwirtschaft 1, Vorlesungsfolien, Universität Duisburg Essen, 2007.
- [12] Umweltbundesamt, „Bioabfälle - Gute Qualität ist Voraussetzung für eine hochwertige Verwertung,“ 6 März 2019. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bioabfaelle#textpart-1>. [Zugriff am 22 April 2019].
- [13] U. Stadtmüller, Grundlagen der Bioabfallwirtschaft, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, ISBN 3-935317-12-3, 2004.
- [14] D. B. Kehres, „Kunststoffe in Kompost und Gaerprodukten - Herkunft, Bedeutung, Vermeidung,“ 2018.
- [15] Umweltbundesamt, „Bioabfallbehandlung - Kompostierung und Vergärung,“ 13 Januar 2016. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/entsorgung/bioabfallbehandlung#textpart-1>. [Zugriff am 25 April 2019].
- [16] M. Kern, T. Raussen, T. Graven, C.-G. Bergs und T. Hermann, *Ökologisch sinnvolle Verwertung von Bioabfällen. Anregungen für kommunale Entscheidungsträger*, 1. Auflage: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Umweltbundesamt (UBA), 2012.
- [17] T. Turk, W. Sprick, M. Kern und T. Raussen, „Stand der Bioabfallvergärung in Deutschland,“ in *Neue Perspektiven für die Bioabfallwirtschaft*, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2018, pp. 121-138.

- [18] J. Bertling, L. Hamann und M. Hiebel, „Mikroplastik und synthetische Polymere in Kosmetikprodukten sowie Wasch-, Putz- und Reinigungsmitteln; Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.),“ Fraunhofer Verlag, Endbericht, Oberhausen, DOI 10.24406/UMSICHT-N-490773, 2018.
- [19] B. Kehres, „Sortenreinheit von Bioabfällen gewährleisten,“ Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Positionspapier, 2016.
- [20] Gesetze im Internet, „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG), § 20 Pflichten der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger,“ [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/__20.html. [Zugriff am 1 April 2019].
- [21] Gesetze im Internet, „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG), § 11 Kreislaufwirtschaft für Bioabfälle und Klärschlämme,“ [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/__11.html. [Zugriff am 1 April 2019].
- [22] Gesetze im Internet, „Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV), § 3 Getrennte Sammlung, Vorbereitung zur Wiederverwendung und Recycling von gewerblichen Siedlungsabf.,“ [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv_2017/__3.html. [Zugriff am 1 April 2019].
- [23] B. Kehres, A. Kirsch, K. Luyten-Naujoks, M. Thelen-Jüngling, L. v. Aaken, K. Wacker, S. Weyers, J. Zimmermann und M. Guttuso, „Mikrokunststoffe durch Lebensmittelabfälle,“ *Humuswirtschaft & Kompost, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.*, Bd. 12, pp. Ausgabe Q2 - 2018, 13 Juli 2018.
- [24] L. Mehren und B. Kehres, „Sauberer Bioabfall - Guter Kompost,“ *Der Landkreis. Zeitschrift für kommunale Selbstverwaltung. Vom Müll zum Wertstoff*, Nr. 87, Aug/Sep 2017.
- [25] B. Kehres, „Problem Fremdstoffe / Kunststoffe in Bioabfall und Kompost,“ Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 11. Biomasseforum, Textbeitrag, 2017.

- [26] B. Kehres, M. Bieker, B. Föhmer, A. Kirsch, K. Luyten-Naujoks, M. Thelen-Jüngling, L. v. Aaken, K. Wacker, S. Weyers und J. Zimmermann, „Sortenreinheit von Bioabfällen verbessern,“ *Humuswirtschaft & Kompost, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.*, Bd. 13., pp. Ausgabe Q1 - 2018, 28 März 2018.
- [27] D. Miklos, N. Obermaier und P. D. M. Jekel, „Mikroplastik: Entwicklung eines Umweltbewertungskonzepts. Erste Überlegungen zur Relevanz von synthetischen Polymeren in der Umwelt,“ Umweltbundesamt, Technische Universität Berlin, Masterthesis, ISSN 1862-4804, 2016.
- [28] D. Pflanz, „Bodenerosion - Gefährdung der Ressource Boden,“ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, [Online]. Available: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Ressourcenbewertung/Bodenerosion/Bodenerosion_node.html. [Zugriff am 27 März 2019].
- [29] J. Mayer, „Mikroplastik in Fließgewässern, Hessisches Landesamt für Natur, Umwelt und Geologie (HLNUG),“ [Online]. Available: <https://www.hlnug.de/themen/wasser/fliessgewaesser/fliessgewaesser-chemie/mikroplastik.html>. [Zugriff am 6 August 2019].
- [30] N. u. n. S. Bundesministerium für Umwelt, „Entsorgung und Verwertung von Klärschlamm,“ 19 März 2019. [Online]. Available: <https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/klaerschlam/entsorgung-und-verwertung-von-klaerschlam-infografik/>. [Zugriff am 2019 August 4].
- [31] Bundesregierung, *Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD*, Rheinbach: Union Betriebs-GmbH, 2013.
- [32] S. Wolff, J. Kerpen, J. Prediger, L. Barkmann und L. Müller, „Determination of the microplastics emission in the effluent of a municipal waste water treatment plant using Raman microspectroscopy,“ *Water Research X*, 19 September 2018.
- [33] M. M. Torre, „Microplastics in waste water treatment plants and separation techniques,“ Department of Water, Atmosphere and Environment, Wien, University of Natural Resources and Life Sciences, Masterthesis, 2015.

-
- [34] M. Heß, P. Diehl, J. Mayer, H. Rahm, W. Reifenhäuser, J. Stark und J. Schwaiger, „Mikroplastik in Binnengewässern Süd- und Westdeutschlands - Bundesländerübergreifende Untersuchungen in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz,“ 2018.
- [35] A. Stolte, „The detection of microplastics in beach sediments,“ Universität Rostock, Universitätsbibliothek, Rostock, Masterthesis, 2015.
- [36] Leibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemünde, „MikrOMIK: Microplastics as vector for microbial populations in the ecosystem of the Baltic Sea,“ 26 Juni 2018. [Online]. Available: <https://www.io-warnemuende.de/mikromik-home.html>. [Zugriff am 5 August 2019].
- [37] A. Lusher, „Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects,“ *Marine Anthropogenic Litter*, Seiten 245–307, DOI 10.1007/978-3-319-16510-3_10, 2015.
- [38] E. M. Foekema, C. d. Gruijter, M. T. Mergia, J. A. van Franeker, A. J. Murk und A. A. Koelmans, „Plastic in north sea fish,“ *Environmental science & technology*, Nr. 47, p. 8818–8824, 2013, Ausgabe 47.
- [39] L. v. Cauwenberghe und C. R. Janssen, „Microplastics in bivalves cultured for human consumption,“ *Environmental pollution*, p. 65–70, 2014, Ausgabe 193.
- [40] O. Setälä, V. Fleming-Lehtinen und M. Lehtiniemi, „Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web,“ *Environmental pollution*, Nr. 185, p. 77–83, 2014.
- [41] A. C. Wieheu, „Raman-Mikrospektroskopie zur Analyse von organischen Bodensubstanzen und Mikroplastik,“ Technische Universität München, Doktorarbeit, 2017.
- [42] K. Stöven, F. Jacobs und E. Schnug, „Mikroplastik: Ein selbstverschuldetes Umweltproblem im Plastikzeitalter,“ *Journal für Kulturpflanzen*, Bd. 7, Nr. 67, pp. 241–250, Verlag Eugen Ulmer KG, 2015.

-
- [43] R. Essel, L. Engel, M. Carus und D. R. H. Ahrens, „Quellen für Mikroplastik mit Relevanz für den Meeresschutz in Deutschland,“ Umweltbundesamt, ISSN 1862-4804, 2015.
- [44] B. Kehres, M. Günther und J. Baumann, „Methodenentwicklung zur Bestimmung der Sortenreinheit von Bioabfällen,“ Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Abschlussbericht, 1. Auflage 2017.
- [45] B. Kehres, „Chargenanalyse - Bestimmung der Sortenreinheit einer Fahrzeugladung von Biogut,“ Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Methodenpapier, 2018.
- [46] B. Kehres, „Gebietsanalyse - Bestimmung der Sortenreinheit von Biogut eines Entsorgungsgebietes,“ Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Methodenpapier, 2018.
- [47] D.-I. M. Kern, D.-I. H.-J. Siepenkothen und F. Neumann, *Sortenreinheit von Bioabfällen*, L. L. f. U. Baden-Württemberg, Hrsg., Karlsruhe: MURR GmbH, 2018.
- [48] C. v. Bechtolsheim, „Ansatzpunkte zur Reduzierung von fremdstoffen in Bioabfällen aus der kommunalen Sammlung,“ Abschlussbericht, Berlin.
- [49] INTECUS GmbH, *Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen*, L. u. G. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Hrsg., Stefan Zinkler, Micaela Ritscher, 2014.
- [50] B. Kehres, A. Kirsch, K. Luyten-Naujoks, S. Röhlen, M. Thelen-Jüngling, L. v. Aaken, K. Wacker, S. Weyers und J. Zimmermann, „Bestimmung von Fremdstoffgehalten,“ *Humuswirtschaft & Kompost*, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Bd. 12., pp. Ausgabe Q4 - 2017, 19 Dezemeber 2017.
- [51] Gesetze im Internet, „Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV), § 4 Anforderungen hinsichtlich der Schadstoffe und weiterer Parameter,“ [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/bioabfv/BioAbfV.pdf>. [Zugriff am 10 August 2019].

-
- [52] Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., „Qualitätsanforderungen für Fertigkompost - Qualitätsmerkmal Fremdstoffe,“ [Online]. Available: https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Guetesicherung/Dokumente_Kompost/Dok._251-006-2_Qualitaetskrit._K.pdf. [Zugriff am 10 August 2019].
- [53] IG saubere Umwelt, „Was ist Littering,“ [Online]. Available: <https://www.igsu.ch/de/littering/was-ist-littering/>. [Zugriff am 6 März 2019].

7 ANHANG

7.1 Sortierhilfe nach Anlage 2 der Gebiets- und Chargenanalyse der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK)



Anlage 2

Sortierhilfe

(nicht abschließend)

Die Sortierhilfe ist eine Orientierung für die Sortierung nach dieser Methode. Sortiervorgaben einzelner öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger können davon abweichende Vorgaben enthalten.

	Stoffgruppen	Zugehörige Materialien	Bemerkungen
1.1	Kunststoffe (folienartig)	Säcke, Tragetaschen, Beutel (Inlets für Sammelbehälter), Hemdchenbeutel, u.ä.	
1.2	Kunststoffe (sonstige)	Kunststoffkörper wie Flaschen, Becher, Dosen, Tuben, Schalen, Kanister, Eimer, Blister, Schraubdeckel, Korken, u.ä. Netze, Schnüre Kaffee kapseln, Milchdöschchen Cateringgeschirr Rohre, Hülsen, Einwegspritzen (leer) Blumentöpfe, inkl. Scherben Gummiartikel	auch aus biologisch abbaubarem Kunststoff
1.3	Glas	Glaskörper, Glasscherben Flachglas Verbundstoffe mit überwiegend Glas	
1.4	Metall	Messer, Besteck Kronkorken Büchsen, Becher, Flaschen, Dosen Alufolie, Knäule von Alufolie, Draht Kaffee kapseln Gartengeräte, -werkzeuge	
1.5	Verpackte Lebensmittel ¹⁾	verpackte Lebensmittel, ungeöffnet, aus Kunststoff verpackte Lebensmittel, ungeöffnet, aus Glas verpackte Lebensmittel, ungeöffnet, aus Metall	bei Verbundmaterialien Zuordnung nach größtem Materialanteil
1.6	Schadstoffe	Batterien Medikamente Chemikalien Farbdosen altölhaltige Materialien Leuchtmittel	soweit nicht restentleert soweit nicht restentleert



	Stoffgruppen	Zugehörige Materialien	Bemerkungen
1.7	sonstige Fremdstoffe		
	Verbundstoffe	Kartonverbundverpackungen (Tetrapack, u.ä.)	restentleert
		Papierverbunde (z.B. Brotverpackungen mit Kunststofffenster)	
		beschichtete Papiere (Hochglanzpapiere und -zeitschriften)	
		verklebte Papiere (z.B. Alttapeten)	
		Babywindeln, Inkontinenzwindeln	
	Mineralien	Mauerwerk	
		Keramik und Scherben	
		Tonblumentöpfe und Scherben	
		Gips	
		Kleintierstreu (verpackt, in Beuteln)	
		Staubsaugerbeutel	
	Textilien	Lappen, Lumpen	auch aus Naturfasern hergestellt
		Bekleidung	
		Jutesäcke	
		Leder, Schuhe	
		Dachpappe	
	weitere sonstige Fremdstoffe	Altholz, Möbelholz (behandelt)	
		Teppichböden	
		Elektro(nik)altgeräte	
		Hygieneartikel (Tampons, Binden, Wattestäbchen, Verbandmaterial)	
		Windeln inkl. Inkontinenzwindeln	
		Exkreme von Tieren	
		sonstige nicht genannte Fremdstoffe	
2	Garten- und Küchenabfälle		
	organische Gartenabfälle	Rasen-, Strauch-, Baumschnitt	
		Pflanzen mit und ohne Wurzelballen	
		Laub	
		Fallobst	
		Holz, Holzwolle, -späne	
		natürliche Steine	



Stoffgruppen	Zugehörige Materialien	Bemerkungen
organische Küchenabfälle	Reste von Nahrungsmitteln pflanzlicher und tierischer Herkunft, gekocht, ungekocht, verdorben inkl. Knochen, in haushaltsüblichen Mengen	
	Obst inkl. Schalen und Kerne	
	Kaffee-Filtertüten, Kaffeesatz	
	Teebeutel	
	Papier, Pappe	ohne Hochglanzpapier und Alttapeten
	Küchen- und Hygienepapiere	
	Bioabfall-Sammelbeutel aus Papier	
	Kaffeepads	nur aus Filterpapier und Kaffeeabsatz bestehend
	Federn und Haare	

¹⁾ Die Sortierung der Stoffgruppe verpackte Lebensmittel ist nur erforderlich, soweit die Verpackungen nicht geöffnet und entleert und die Stoffe den jeweils zutreffenden Stoffgruppen zugeordnet werden. Werden die Verpackungen nicht geöffnet, erfolgt die Berechnung der Masse der Verpackung nach Anlage 4 dieser Methodenvorschrift.

Anlage 3

Berechnung der Masse sortierter Kunststoffbeutel [5]

Stoffgruppe	Stückmasse ¹⁾ g
Kunststoffbeutel Kategorie 1 Dickwandige Tragetasche > A4 und Müllsäcke > 60 l	50
Kunststoffbeutel Kategorie 2 dünnwandige Müllbeutel (Rollenware) > A4	25
Kunststoffbeutel Kategorie 3 kleinformatige dünnwandige Beutel < A4	10

¹⁾ Bei den angegebenen Stückmassen handelt es sich um gerundete mittlere Feuchtmassen ohne sonstige Anhaftung.

Soweit Beutel aus biologisch abbaubaren Kunststoffen (BAW) separat von anderen Beuteln festgestellt werden sollen, kann eine Kategorie 4 (BAW-Beutel) gebildet und die Stückmasse der Kategorie 2 zugrundegelegt werden.

7.2 Materialliste

Tabelle 28: Materialliste der verwendeten Geräte inklusive Bezeichnung

Geräte	Bezeichnung
Analysenwaage	
	Mettler-Toledo GmbH, Model ML4002T/00, d = 0,01 g, Max. = 4200 g
Analysensiebe	
1 mm	Haver & Boecker OHG, DIN ISO 3310-1, ISO 3310-1, BS ISO 3310-1, Nennmaschenweite (w): 1,0 mm, Siebdurchmesser: 315 mm, Siebboden: Edelstahl, Siebrahmen: Edelstahl, Seriennummer: 27191268
	Haver & Boecker OHG, DIN ISO 3310-1, ISO 3310-1, BS ISO 3310-1, Nennmaschenweite (w): 1,0 mm, Siebdurchmesser: 315 mm, Siebboden: Edelstahl, Siebrahmen: Edelstahl, Seriennummer: 21191356
2 mm	Haver & Boecker OHG, DIN ISO 3310-1, ISO 3310-1, BS ISO 3310-1, Nennmaschenweite (w): 2,0 mm, Siebdurchmesser: 315 mm, Siebboden: Edelstahl, Siebrahmen: Edelstahl, Seriennummer: 27191269
	Haver & Boecker OHG, DIN ISO 3310-1, ISO 3310-1, BS ISO 3310-1, Nennmaschenweite (w): 2,0 mm, Siebdurchmesser: 315 mm, Siebboden: Edelstahl, Siebrahmen: Edelstahl, Seriennummer: 21191357
5 mm	Haver & Boecker OHG, DIN ISO 3310-1, ISO 3310-1, BS ISO 3310-1, Nennmaschenweite (w): 5,0 mm, Siebdurchmesser: 315 mm, Siebboden: Edelstahl, Siebrahmen: Edelstahl, Seriennummer: 27191270
	Haver & Boecker OHG, DIN ISO 3310-1, NF ISO 3310-1, BS 410-1, Nennmaschenweite (w): 5,0 mm, Siebdurchmesser: 315 mm, Siebboden: Edelstahl, Siebrahmen: Edelstahl, Seriennummer: 221175109
Edelstahleimer und Deckel	
Je 2 Stück	Eimer Carl Roth GmbH, Material Remanit 4301, Volumen 12 L, Gesamthöhe: 298 mm, Durchmesser oben: 340 mm, Durchmesser unten: 220 mm Deckel Carl Roth GmbH, Durchmesser: 340 mm
Je 1 Stück	Eimer Carl Roth GmbH, Material Remanit 4301, Volumen 15 L, Gesamthöhe: 340 mm, Durchmesser oben: 355 mm, Durchmesser unten: 250 mm Deckel Carl Roth GmbH, Durchmesser: 355 mm
Trockenschränke	
	Heraeus Instruments, DIN 12880/1, Typ UT 6, 250 °C, IP 20, 1N/PE, 50/60 Hz, 230 V, 5,5 A, 1,27 KW, Fabrik Nr.: 97112461
	Heraeus Instruments, DIN 12880/1, Typ T 6, 250 °C, IP 20, 1N/PE, 50/60 Hz, 230 V, 5,3 A, 1,22 KW, Fabrik Nr.: 97112098
	Binder GmbH, DIN 12880, 300 °C, IP 20, 1N, 50/60 Hz, 230 V, 4,6 A, 1,05 KW, Art.No.: 9010-0333

Geräte	Bezeichnung
Kristallisierschalen ohne Ausguss	
4 Stück	Carl Roth GmbH, Material: Duran, DIN 12337, Durchmesser außen: 230 mm, Höhe 100 mm, Volumen: 3500 ml
Kamera	
	Canon EOS 600D SLR-Digitalkamera
Lichtmikroskop	
	Carl Zeiss, Primo Star, Serien-Nr.: 3131001170
Raman - Spektrometer	
	Raman microspectrometer, DXR2xi, Thermo Fisher Scientific Inc., USA

7.3 Fremdstoffe in ausgewählten Kompostproben

7.3.1 Pflanzenabfallkompostierungsanlage



Abbildung 40: Probe 1 der Pflanzenabfallkompostierungsanlage



Abbildung 41: Probe 2 der Pflanzenabfallkompostierungsanlage



Abbildung 42: Probe 3 der Pflanzenabfallkompostierungsanlage



Abbildung 43: Probe 4 der Pflanzenabfallkompostierungsanlage

7.3.2 Bioabfallvergärungsanlage



Abbildung 44: Probe 1 der Bioabfallvergärungsanlage



Abbildung 45: Probe 2 der Bioabfallvergärungsanlage



Abbildung 46: Probe 3 der Bioabfallvergärungsanlage



Abbildung 47: Probe 4 der Bioabfallvergärungsanlage



Abbildung 48: Probe 5 der Bioabfallvergärungsanlage

7.4 Aufnahmen der Fraktion < 1 mm

7.4.1 Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop

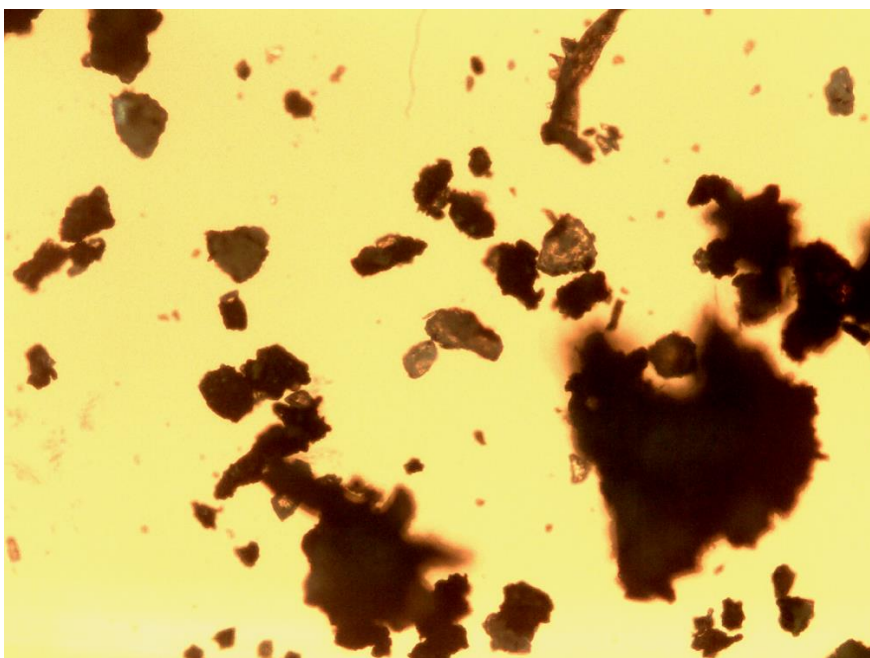


Abbildung 49: Übersichtsaufnahme mit dem Lichtmikroskop

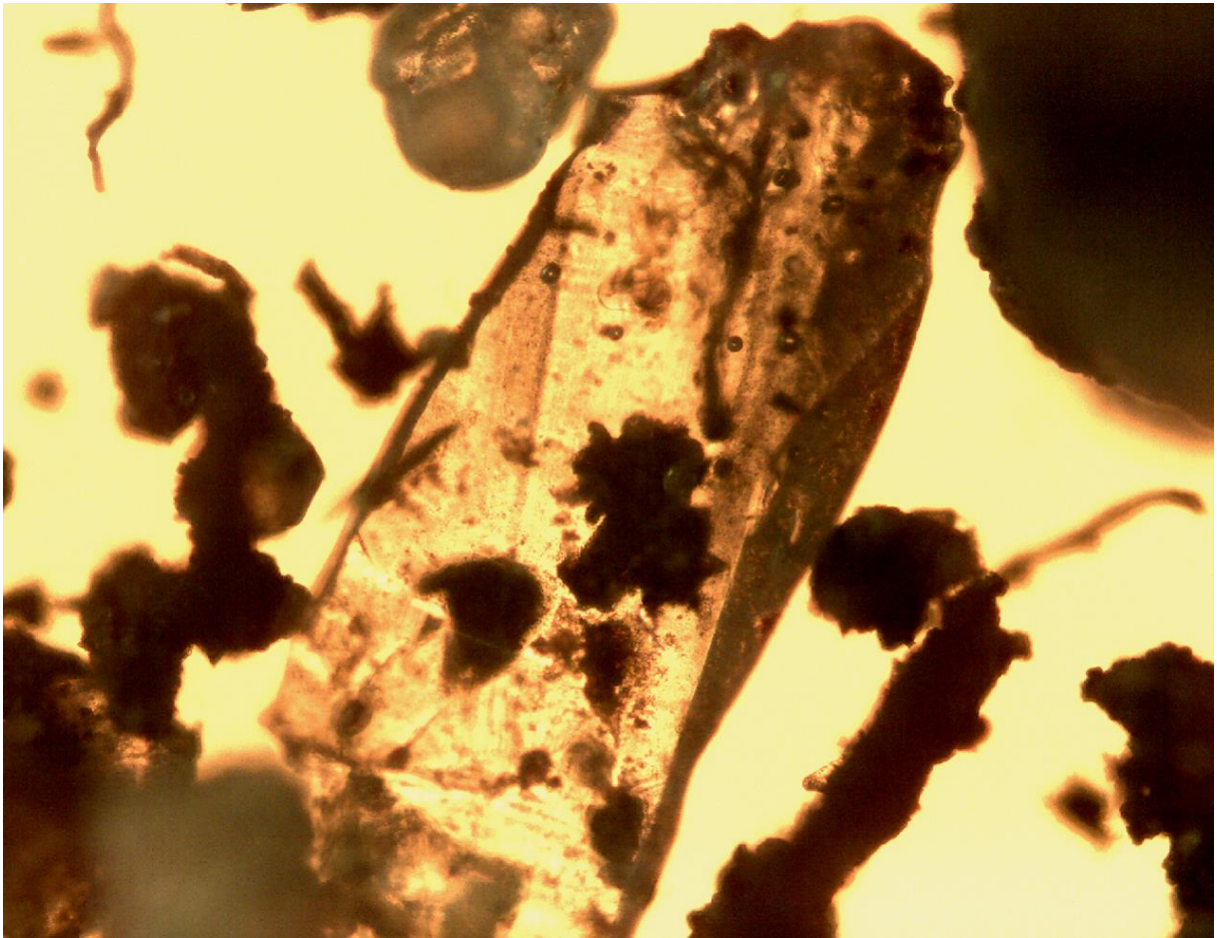


Abbildung 50: Aufnahme eines Partikels mit dem Lichtmikroskop

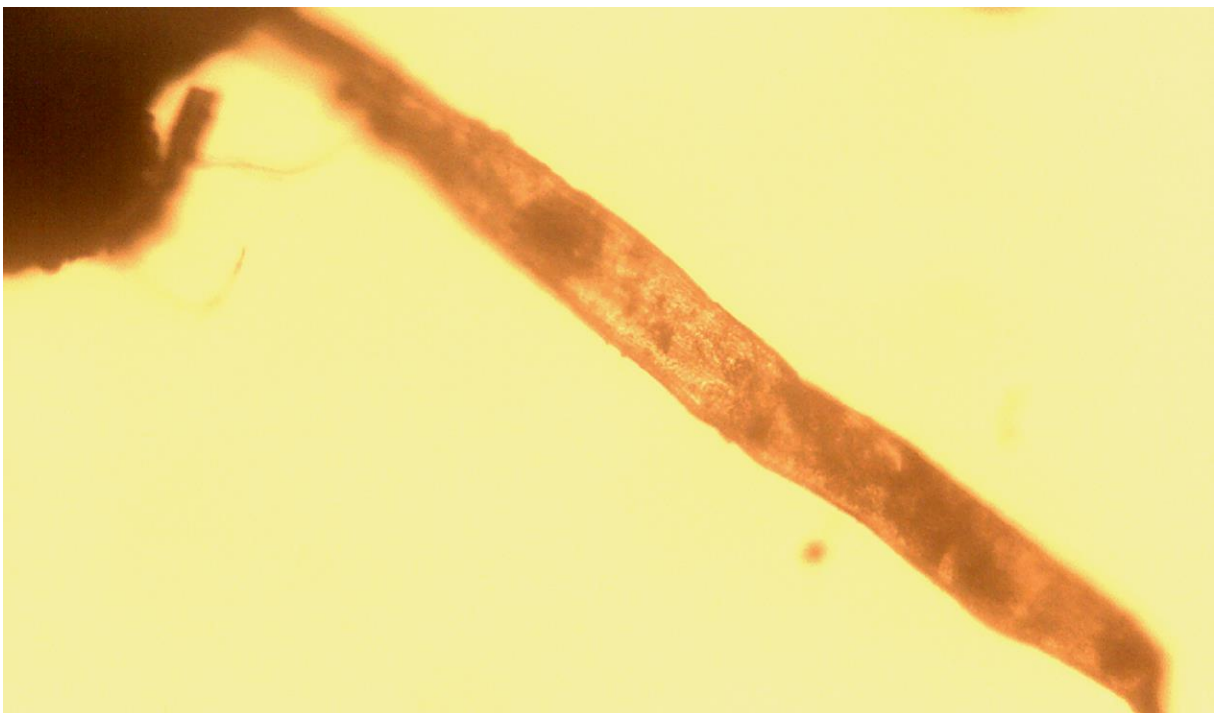


Abbildung 51: Aufnahme einer Faser mit dem Lichtmikroskop

7.4.2 Aufnahmen mit dem Raman-Spektrometer



Abbildung 52: Aufnahme mit dem Raman-Spektrometer der unteren Ebene auf einem Silithiumfilter

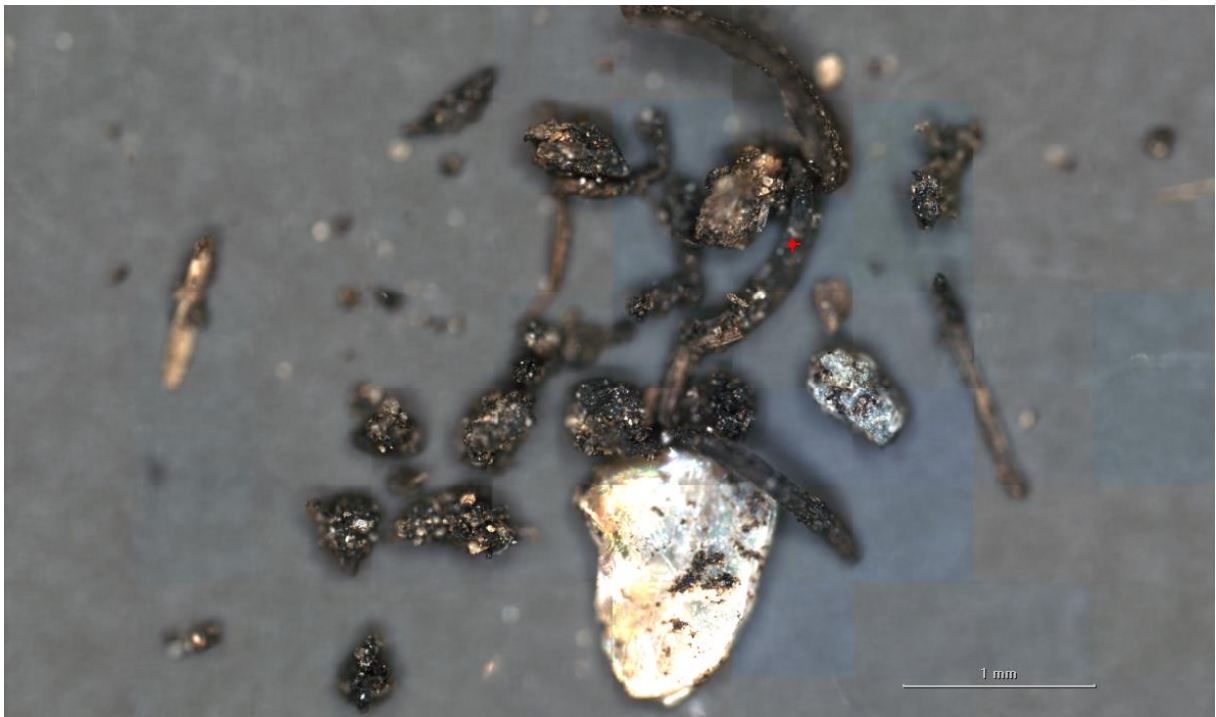


Abbildung 53: Aufnahme mit dem Raman-Spektrometer der oberen Ebene auf einem Silithiumfilter