

Stefan Deegener
Michelle Viramontes Espinosa
Paulina Echavarria
Ina Körner

Untersuchung des Verhaltens von Beuteln aus biologisch abbaubaren Kunststoffen in der Kompostierungsanlage Neumünster



Technische Universität Hamburg, 2022

Stefan Deegener, Michelle Viramontes Espinosa, Paulina Echavarría, Ina Körner

Untersuchung des Verhaltens von Beuteln aus biologisch abbaubaren Kunststoffen in der Kompostierungsanlage Neumünster. Technische Universität Hamburg (TUHH), Juni 2022

DOI: <https://doi.org/10.15480/882.4374>; Handle: <http://hdl.handle.net/11420/12855>

Weitere Identifier: urn:nbn:de:gbv:830-882.0187454

Weitere Beteiligte der TUHH:

Tala Allababidi, Asma Sikander, Ersalina Soetijono, Shadaab Hussain Khan, Luis Marcel Vargas

Kontakt:

Technische Universität Hamburg (TUHH)

Institut für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz (AWW)

Gruppe Bioressourcen-Management (BIEM), Eissendorfer Str. 42, 21073 Hamburg

PD Dr. habil. Ina Körner (ORCID ID: 0000-0002-8937-5970), i.koerner@tuhh.de

Dipl. Ing. Stefan Deegener, deegener@tuhh.de

Weitere beteiligte Institutionen:

VERBUND: Verbund kompostierbare Produkte e.V., Berlin

EBL: Entsorgungsbetriebe Lübeck, Sparte Stadtreinigung, Lübeck

SWN: Stadtwerke Neumünster, Bio-Abfall-Verwertungsgesellschaft mbH, Neumünster

Experimentelle Arbeiten unterstützt durch:

VERBUND: Verbund kompostierbare Produkte e.V.

Auswertung unterstützt durch folgende Projekte:

C4T531: Abbau von Müllsammelbeuteln aus biologisch abbaubaren Kunststoffen bei der Kompostierung (Hamburg Innovation)

SOILCOM: Sustainable soils by quality compost with defined properties (EU Interreg North Sea Region Programm)

DECISIVE: Dezentrale Management-Ansätze zur innovativen Verwertung urbaner Bioabfälle (EU H2020 n°689229)

CC BY-SA 4.0: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.de>

Sie dürfen das Material in jedwedem Format oder Medium vervielfältigen und weiterverbreiten, remixen und darauf aufbauen. Sie müssen angemessene Urheber- und Rechteangaben machen, einen Link zur Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Diese Angaben dürfen in jeder angemessenen Art und Weise gemacht werden, allerdings nicht so, dass der Eindruck entsteht, der Lizenzgeber unterstütze gerade Sie oder Ihre Nutzung besonders. Wenn Sie das Material remixen, verändern oder anderweitig direkt darauf aufbauen, dürfen Sie Ihre Beiträge nur unter derselben Lizenz wie das Original verbreiten.

Die in dieser Arbeit dargelegten Informationen und Ansichten sind die der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die offizielle Meinung der unterstützenden Institutionen wider.

1. Auflage, Hamburg, Juni 2022



Verbund
kompostierbare
Produkte e.V.



Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung.....	6
Short summary	7
Verzeichnis der Abbildungen.....	8
Verzeichnis der Tabellen	9
Abkürzungsverzeichnis	10
Der Versuch im Überblick.....	11
I. Hintergrund und Ziele	11
II. Vorgehen	11
III. Hauptergebnisse.....	12
IV. Grenzen der Studie.....	13
Der Versuch im Detail.....	15
1 Verwendete Materialien	15
1.1 Bioabfallsammelbeutel.....	15
1.2 Netzmaterialien	15
1.3 Bioabfälle.....	16
2 Versuchsdurchführung	17
2.1 Befüllung von Beuteln und Netzen.....	17
2.1.1 Beutel	17
2.1.2 Netze	17
2.1.3 Kompostierung der Netze	19
2.1.3.1 Rottedauer und Rottetypen	19
2.1.3.2 Hauptrotte in Containern	19
2.1.3.3 Nachrotte in einer Miete.....	19
2.2 Beprobung der Netze	21
2.2.1 Entnahme und Öffnung der Netze	21
2.2.2 Entnahmen aus den Netzen	21
2.2.2.1 BAK-Makropartikel	21
2.2.2.2 Repräsentative Netzinhaltsproben.....	21
2.2.2.3 Sonstige Netzinhaltsproben	21
2.3 Messungen und Analysen	22
2.3.1 Rottegut.....	22
2.3.1.1 Masse, Volumen, Schüttdichte.....	22
2.3.1.2 Temperatur und Belüftung.....	22
2.3.1.3 Siebfraktionen	23

2.3.1.4	Wassergehalt.....	23
2.3.1.5	Rottegrad.....	23
2.3.2	BAK-Beutel und BAK-Partikel	23
2.3.2.1	Originale Beutel.....	23
2.3.2.1.1	Optik, Haptik, Masse und Folienstärke	23
2.3.2.1.2	Fläche	24
2.3.2.2	BAK-Makro-, Meso- und Mikropartikel nach Kompostierung.....	24
2.3.2.2.1	Separierung	24
2.3.2.2.2	Masse der BAK-Makropartikel	24
2.3.2.2.3	Flächenzahl der BAK-Makropartikel.....	24
2.3.2.2.4	Flächenzahl der BAK-Meso- und Mikropartikel	25
2.3.2.2.5	Spezifische Flächensumme der BAK-Makro- und Mesopartikel	25
3	Ergebnisse	26
3.1	Charakteristik der leeren BAK-Beutel.....	26
3.2	Charakteristik der gefüllten BAK-Beutel und Netze	27
3.3	Charakteristik der Rotte	28
3.3.1	Hauptrottephase in Containern	28
3.3.2	Nachrottephase auf Miete	30
3.4	Charakteristik der Netze.....	31
3.4.1	Temperatur.....	31
3.4.2	Wassergehalte	32
3.4.3	Massen	34
3.4.4	Rottegrad.....	35
3.5	Rottegutkörnung	36
3.5.1	Siebfraktionierung im Labor.....	36
3.5.2	Trommelsiebung in der Kompostanlage	37
3.6	Charakteristik des Abbaus.....	38
3.6.1	BAK-Makropartikel	38
3.6.1.1	Flächenzahl und BAK-Makropartikel-Restfläche	38
3.6.1.2	BAK-Makropartikel-Restmasse.....	42
3.6.2	BAK-Meso- und Mikropartikel.....	43
3.6.2.1	Partikelanzahl und Flächenzahl	43
3.6.2.2	Restmasse.....	47
3.6.3	Spezifische Flächensumme von BAK-Makro- und Mesopartikeln.....	48
3.6.4	Abbaugrade nach Fläche und nach Masse	50
4	Schlussfolgerungen und Ausblick	56

5	Danksagung	59
6	Literaturverzeichnis.....	60
7	Anlagen – Tabellen.....	62
8	Anlagen – Abbildungen.....	78

Kurzzusammenfassung

In der Kompostierungsanlage Neumünster wurden Abfallbeutel aus biologisch abbaubaren Kunststoffen (BAK) auf ihre Abbaubarkeit unter großtechnischen Bedingungen getestet. Die belüftete Intensivrotte dauerte zwei, die natürlich ventilierte Nachrotte vier Wochen. Zum Einsatz kamen vier verschiedene Beutelsorten, zwei Stärke- und zwei PLA-Blends. Je Typ wurden 160 Beutel, verteilt auf 8 Netze, eingebracht und nach 2, 3, 4, 5 bzw. 6 Wochen wieder entnommen. Die Netzinhalte wurden auf BAK-Rückstände untersucht, wobei nach Mikro- (<1 mm, 1-2 mm), Meso- (2-8 mm) und Makropartikeln (>8 mm) unterschieden wurde. Der BAK-Abbaugrad wurde näherungsweise bestimmt. Auf Basis der Partikelrestflächen konnte ein maximal möglicher Abbaugrad und auf Basis von Partikelrestmassen der minimal aufgetretene Abbaugrad ermittelt werden. Der tatsächliche Abbaugrad wird dazwischenliegen. Die ermittelten Restmassen waren vor allem durch Partikelverunreinigungen mit Unsicherheiten behaftet, die Restflächen durch eine Vernachlässigung der 3-Dimensionalität bei großen Partikeln.

Die Entwicklung der Temperaturen und Wassergehalte im Rottegut über die Behandlungszeit war in den meisten Netzen typisch für die Kompostierung von Bioabfällen, einschließlich der zu erwartenden Inhomogenitäten. Der stärkste BAK-Abbau erfolgte bei allen Beutelsorten in den ersten drei Wochen, wobei bereits nach zwei Wochen ein deutlicher Abbau zu verzeichnen war. Stärke-Blends zeigten einen schnelleren Abbau als die PLA-Blends. Nach 4 bis 6 Wochen war bei den meisten Stärke-Blend-Chargen ein Abbaugrad über 90% zu verzeichnen. Obwohl bei den meisten PLA-Blend-Chargen der Abbaugrad nach Fläche über 90% war, muss davon ausgegangen werden, dass ihr realer Abbaugrad teilweise unter 90% liegen wird. Bei den Beuteln mit Zugband lag der minimale Abbaugrad nach Masse zwischen 58 und 80%, bei denen ohne Zugband zwischen 71 und 94%. Bei allen Entnahmezeitpunkten wurden in allen Chargen Mikro- und Mesopartikel detektiert, bei den meisten auch Makropartikel. Einige Stärke-Blend-Chargen waren frei bzw. nahezu frei an Makropartikeln, in einem Fall bereits nach drei Wochen.

Neben der Materialsorte, hatte die Materialdicke einen Einfluss auf den BAK-Abbau. Bei der am schlechtesten abgebauten Beutelsorte akkumulierten Überreste der dickeren Zugbänder. Darüber hinaus war die Rottegutfeuchte bedeutend. Es gab einige ausgetrocknete Zonen mit Wassergehalten um 20%, in denen keine biologische Abbauaktivität stattfand und dementsprechend auch der BAK-Abbau nicht fortschritt.

Short summary

Waste bags made of biodegradable plastics (BDP) were tested for their degradability under industrial-scale conditions at the Neumünster composting plant. The aerated intensive rotting lasted two weeks, the naturally ventilated curing four weeks. Four different types of bags were used, two starch blends and two PLA blends. For each type, 160 bags, distributed over 8 nets, were introduced and removed after 2, 3, 4, 5 and 6 weeks, respectively. The net contents were analyzed for BDP residues, differentiating between micro (< 1 mm, 1-2 mm), meso (2-8 mm) and macro (>8 mm) particles. The BDP degradation level was determined approximately. Based on the residual particle areas, the possible maximum degree of degradation could be determined, and based on residual particle masses, the minimum degree of degradation that occurred. The actual degree of degradation will be in between. The determined residual masses were subject to uncertainties mainly due to particle impurities, the residual areas due to a neglect of the 3-dimensionality for large particles.

The development of temperatures and water contents in the rotting material over the treatment period was typical for biowaste composting in most of the nets, including the expected inhomogeneities. The strongest BDP degradation occurred in all bag types in the first three weeks, with significant degradation already after two weeks. Starch blends showed a faster degradation than the PLA blends. After 4 to 6 weeks, most starch blend batches showed a degradation rate above 90%. Although most PLA blend batches had a degradation level by area above 90%, it must be assumed that their real degradation level will be partly below 90%. The minimum degradation level by mass for the bags with a drawstring was between 58 and 80%, and between 71 and 94% for those without a drawstring. Micro and meso particles were detected in all batches at all sampling times, and macro particles were detected in most. Some starch blend batches were free or almost free of macro particles, in one case already after three weeks.

Besides the type of material, the thickness of the material had an influence on the BDP degradation. In the worst degraded bag type, residues of the thicker drawstrings accumulated. In addition, the rotting material moisture was significant. There were some dried-out zones with water contents of about 20% in which no biodegradation activity took place and, accordingly, BDP degradation did not progress.

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Verwendete BAK-Beutel mit Typen-Bezeichnung	15
Abbildung 2: Vorbereitung der BAK-Beutel und der mit BAK-Beuteln gefüllten Netze auf die Rotte..	18
Abbildung 3: Hauptrottecontainer sowie Nachrottemiete zu Beginn und am Ende der Nachrotte	19
Abbildung 4: Impressionen vom Netzein- und -ausbau	20
Abbildung 5: Entnahme von BAK-Makropartikeln und repräsentativen Kompostproben	21
Abbildung 6: Temperaturen und Masseverluste in den Containern in der Hauptrottephase	29
Abbildung 7: Substratoberfläche in den Containern am Ende der Hauptrottephase	29
Abbildung 8: Beispiele für Feuchte- und Temperaturinhomogenitäten in Containern	30
Abbildung 9: Beispiele für Oberflächentemperaturen nach Entnahme von Netzen	30
Abbildung 10: Temperaturverläufe in den Netzen während der Nachrotte	32
Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der Wassergehalte in den ausgebauten Netzen	33
Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf der Gesamtmassen der Netze während der Kompostierung.....	34
Abbildung 13: Kumulative Siebdurchgänge von Rottegut in verschiedenen Rottewochen	36
Abbildung 14: Impressionen von der Trommelsiebung zur Fraktionierung des Rottegutes	37
Abbildung 15: Bestimmung der Flächenzahl der aus den Netzen ausgelesenen BAK-Makropartikel ..	38
Abbildung 16: Ausgelesene BAK-Makropartikel aus Netzen mit Stärke-Blend-Beuteln.....	39
Abbildung 17: Ausgelesene BAK-Makropartikel aus Netzen mit PLA-Blend-Beuteln	40
Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf der Flächenzahlen der ausgelesenen BAK-Makropartikel	41
Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf der feinverunreinigten der BAK-Makropartikel-Restmassen.....	43
Abbildung 20: Anzahl an PLA-Blend-Mikro- und Mesopartikeln in den Rottegutsiebfraktionen	44
Abbildung 21: Anzahl an Stärke-Blend-Mikro- und Mesopartikeln in den Rottegutsiebfraktionen	45
Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Flächenzahlen von Mikro- und Mesopartikeln pro Netz	46
Abbildung 23: Spezifische Flächensummen für BAK-Makro- und BAK-Mesopartikel.....	49
Abbildung 24: Maximale BAK-Abbaugrade nach Fläche nach Charge und Zeit	52
Abbildung 25: Minimale BAK-Abbaugrade nach Masse nach Charge und Zeit.....	53
Abbildung 26: Maximale Abbaugrade nach Fläche für verschiedene Phasen der Kompostierung	54
Abbildung 27: Minimale Abbaugrade nach Masse für verschiedene Phasen der Kompostierung	55
Abbildung 28: Temperaturverläufe in den Containern während der Hauptrottephase.....	78
Abbildung 29: Exemplarischer Temperaturverlauf in der Nachrottemiete	78

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten BAK-Beutel.....	15
Tabelle 2: Charakteristik und Funktion der eingesetzten Bioabfälle	16
Tabelle 3: Basisinformationen zu den eingesetzten BAK-Beuteln	26
Tabelle 4: Charakteristik der BAK-Beutel-Chargen und der Netze bei Untersuchungsbeginn	28
Tabelle 5: Restflächen von BAK-Mikro-, Meso- und Makropartikeln im Überblick	51
Tabelle 6: Restmassen von BAK-Mikro-, Meso- und Makropartikeln bei verschiedenen BAK-Beuteln	53
Tabelle 7: Minimale und Maximale BAK-Abbaugrade für die verschiedenen BAK-Beutel-Chargen	54
Tabelle 8: Überblick über den Ablauf des Kompostierungsversuches.....	62
Tabelle 9: Charakteristik der zur Netzkonstruktion eingesetzten Materialien	62
Tabelle 10: Charakteristik der Containerkompostierungsanlage von SWN in Neumünster	63
Tabelle 11: Herstellerinformationen auf den BAK-Beuteln	64
Tabelle 12: Beurteilungen und Messungen an den Beuteln	65
Tabelle 13: Charakteristik der Chargen mit befüllten BAK-Beuteln und der Netze vor der Rotte.....	66
Tabelle 14: Platzierung der Netze in den Containern zur Hauptrotte und in der Miete zur Nachrotte	67
Tabelle 15: Charakteristik der entnommenen Netze	68
Tabelle 16: Ergebnisse der Siebfractionierungen	69
Tabelle 17: Restmassen der BAK-Makropartikel nach verschiedenen Aufbereitungsschritten	70
Tabelle 18: Flächenzahlen, Restaufsichtsflächen, spezifische Flächensummen der Makropartikel.....	71
Tabelle 19: Anzahl der BAK-Meso- und Mikropartikel für B-Netze.....	72
Tabelle 20: Anzahl der BAK-Meso- und Mikropartikel für G-Netze	72
Tabelle 21: Anzahl der BAK-Meso- und Mikropartikel für R-Netze.....	73
Tabelle 22: Anzahl der BAK-Meso- und Mikropartikel für S-Netze	73
Tabelle 23: Restflächen der BAK-Mikro- und Mesopartikel nach Netzausbau	74
Tabelle 24: Flächenzahlen BAK-Mikro-, Meso- und Makropartikel nach Ausbau.....	75
Tabelle 25: Kumulative Restflächen- und Restmassen sowie Abbaugrade nach Fläche und Masse	76
Tabelle 26: Restmasseanteile an BAK-Mikro- und Mesopartikeln.....	77

Abkürzungsverzeichnis

BAK:	Biologisch Abbaubare Kunststoffe
BDP:	Biodegradable Plastic
BioAbfV:	Bioabfallverordnung
BGK:	Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.
DIN:	Deutsches Institut für Normung
EBL:	Entsorgungsbetriebe Lübeck
EN:	Europäische Norm
FM:	Frischmasse
KrWG:	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LKW:	Lastkraftwagen
PA:	Polyamid
PBAT:	Polybutylenadipat Terephthalat
PBS:	Polybutylen Puffer
PCL:	Polycaprolacton
PE:	Polyethylen
PET:	Polyethylene Terephthalate
PHA:	Polyhydroxyalkanoate
PLA:	Poly Lactic Acid / Poly Milchsäure
PVC:	Polyvinylchlorid
PP:	Polypropylen
PS:	Polystyren
PTT	Polytrimethylen-Terephthalat
PUR:	Polyurethan
SWN:	Stadtwerke Neumünster
TS:	Trockensubstanz
TUHH:	Technische Universität Hamburg
WG:	Wassergehalt

Der Versuch im Überblick

I. Hintergrund und Ziele

Küchenabfälle werden von Bürgern teilweise in Beuteln aus biologisch abbaubaren Kunststoffen (BAK) gesammelt. Die Tendenz ist steigend, u.a. aufgrund des Rückgangs im Bereich petro-basierter Kunststoffe. BAK-Beutel dürfen prinzipiell gemäß Bioabfallverordnung (BioAbfV, 2022) über die Biotonne entsorgt werden, sofern die in der Verordnung definierten Anforderungen wie eine Zertifizierung nach DIN 13432 erfüllt sind. DIN 13432 zertifiziert einen vollständigen BAK-Abbau nach maximal 12 Wochen unter Laborbedingungen. Eine darüber hinaus gehende Norm, DINplus (2020), zertifiziert diesen bereits nach maximal 6 Wochen. Ein vollständiger Abbau ist hierbei bei einem Abbaugrad von 90% definiert. Von Kompostanlagenbetreibern gibt es jedoch Bedenken, dass in der Praxis ein vollständiger Abbau nach 6 Wochen möglich ist und dass BAK-Rückstände im Kompost verbleiben. Die Bioabfallverordnung (BioAbfV, 2022) definiert einen Grenzwert für Fremdstoffe im Kompost und setzt deren Größe ab 2 mm an. BAK-Partikel der entsprechenden Größenordnung werden der Fremdstofffraktion im Kompost hinzugerechnet. Fremdstoffe <2 mm bleiben aktuell nach BioAbfVO (2022) unberücksichtigt. Aber Mikroplastik ist ein aktuelles Thema. So berücksichtigt die BGK (2021) bei den Fremdstoffen im Kompost speziell auch Kunststoffe ab 1 mm und gibt einen diesbezüglichen Grenzwert von $\leq 0,1\%$ TS an. Die DüMV (2021) schreibt die Erfassung von Fremdstoffen ab 1 mm vor. Von Kompostanlagenbetreibern gibt es Bedenken bezüglich Verunreinigungen im Kompost auch durch kleine BAK-Partikel.

Folgende Fragen sollen daher mit Hilfe des Versuches beantwortet werden:

- Werden als kompostierbar zertifizierte BAK-Beutel in einer Kompostierungsanlage abgebaut?
- Wie ist der zeitliche Verlauf des BAK-Abbaus?
- Wie verändern sich BAK-Beutel während der Kompostierung?
- Wie verteilen sich BAK-Fragmente in Grob- und Feinfraktionen?

Definition des Begriffes „Abbau“ in dieser Studie: Der Abbau von BAK-Beuteln kann über biologische Abbau- und über Desintegrationsprozesse erfolgen, wobei beide Prozesse parallel auftreten und sich auch gegenseitig beeinflussen können. Direkte Aussagen zum biologischen Abbau, bei dem BAK-Kohlenstoff in Kohlendioxid überführt wird, gibt die Versuchsanordnung dieser Studie nicht her. Im Rahmen unserer Untersuchungen werden sowohl Desintegrations- als auch biologische Abbauprozesse erfasst, können jedoch nicht separat ausgewiesen werden. Die Aussagen zum Abbau beziehen sich also auf beide Vorgänge zusammen. Zur Bestimmung des Abbaugrades wurden als Indikatoren die Flächen bzw. Massen der verbleibenden BAK-Partikel nach dem Ausbau aus dem Kompostierungssystem im Verhältnis zu den eingebrachten Flächen bzw. Massen untersucht und die jeweiligen Methoden auf ihre Aussagefähigkeit beurteilt.

II. Vorgehen

Für die Untersuchungen wurden vier als kompostierbar zertifizierte BAK-Beutel-Sorten (B, G, R, S) durch den VERBUND ausgewählt und ihre Bereitstellung veranlasst. Die Auswahl deckt nach Aussagen des VERBUNDES im Hinblick auf die Materialzusammensetzung den Großteil der Qualitäten ab, die in Deutschland Verwendung finden.

Der Versuchsablauf im Überblick ist in Tabelle 8 (Anlagen) dargestellt. Jeweils 20 BAK-Beutel pro Hersteller wurden mit einem Gemisch aus Lebensmittelabfällen und aus Grünabfällen befüllt und in ein Netz gegeben. Das Restvolumen eines Netzes wurde mit grünabfallreichem Bioabfall aufgefüllt. Pro Beutel-Sorte wurden auf diese Weise 8 Netze vorbereitet. Die Netze wurden mittig in Container der Kompostierungsanlage von SWN in Neumünster platziert und mit Bioabfällen umschlossen. Nach zweiwöchiger Intensivrotte mit dem bei SWN üblichen belüfteten Verfahren wurden die ersten Netze entnommen und im Hinblick auf BAK-Rückstände untersucht. Weitere Chargen wurden in einer Rottehalle auf eine natürlich ventilierte Nachrottemiete eingebracht, mit zeitlichen Abständen entnommen und wiederum beprobt. Es wurden insgesamt 5 Entnahme-Zeitpunkte untersucht: nach 2, 3, 4, 5 und 6 Wochen. Die Ein- und Ausbautermine, die Netzbezeichnungen sowie spezielle Aktivitäten wie eine Befeuchtung sind ebenfalls der Tabelle 8 (Anlage) zu entnehmen.

Zunächst wurden die Eingangsflächen und -massen der BAK-Beutel ermittelt. Die aus dem Kompostierungssystem entnommenen BAK-Reste wurden in Makro-, Meso- und Mikropartikel unterschieden und separat charakterisiert. Hierbei definierten wir die Partikel wie folgt:

- Makropartikel: > 8 mm
- Mesopartikel: 2-8 mm
- Mikropartikel: <1 mm, 1-2 mm

Die BAK-Makropartikel wurden manuell weitestgehend vollständig aus den kompletten Netzinhalten separiert. Die Untersuchungen der BAK-Meso- und Mikropartikel erfolgte an repräsentativen Stichproben. Es wurden Flächenzahlen und Massen für alle Partikeltypen bestimmt. Die Flächenzahlbestimmung unterschied sich hierbei methodisch zwischen Makro- sowie Meso- und Mikropartikeln. Darüber hinaus wurde die spezifische Flächensumme für Mikro- und Mesopartikel ermittelt. Der Abbaugrad nach Masse wurde als minimaler Abbaugrad definiert, der Abbaugrad nach Fläche als maximaler. Die realen Abbaugrade werden dazwischenliegen. Eine Einengung des Bereiches ist im Rahmen weiterführender Untersuchungen durch Reduzierung der analytischen Unsicherheiten, hauptsächlich bedingt durch Makropartikel-Verunreinigungen, Vernachlässigung der 3-Dimensionalität der Makropartikel sowie Annahmen bezüglich Partikelformen und -Dichten bei den Mikro- und Mesopartikeln, möglich.

Zur Charakteristik des allgemeinen Kompostierungsprozesses wurden die Masseverluste der Netze an allen fünf Untersuchungsterminen sowie die Temperaturen, Feuchten und Rottegrade des Rottegutes aus den Netzen bei den Ausbauterminen bestimmt.

III. Hauptergebnisse

Der untersuchte Kompostierungsprozess in der Anlage in Neumünster entsprach großtechnischen Bedingungen. Es traten wie erwartet Inhomogenitäten auf. Die Masseverluste infolge des Organikabbaues und des Austrages von Wasser, der Temperaturverlauf sowie die Entwicklung des Wassergehaltes im Rottegut über die Behandlungszeit von 6 Wochen waren in den meisten Probenetzen typisch für die Kompostierung von Bioabfällen. In einigen Netzen erfolgte eine Austrocknung, die als suboptimal für die Kompostierung gilt. Die Wassergehalte lagen dort um 20%. Dass dort keine oder eine sehr geringe biologische Abbauproduktivität stattfand, zeigte sich auch an den Temperaturen, die korrespondierend auf einem niedrigen Niveau lagen. Die Ursache wurde in der Bildung von Luftkanälen während der Intensivrotte gesehen. Zum Ausgleich suboptimaler Wassergehalte wurde während der Nachrotte einmalig eine definierte Befeuchtung durchgeführt.

Die verwendete Methodik zur Beurteilung des Abbauverhaltens zeigte sich als geeignet, um den Abbau von BAK-Beuteln unter großtechnischen Kompostierungsverhältnissen zu untersuchen. Sie umfasste den Einbau einer ausreichend großen Menge an gefüllten BAK-Beuteln eingebettet in Bioabfall in Netzen, deren Einbringung in einen realen Kompostierungsprozess, die quantitative Analyse der verbleibenden BAK-Reste zu verschiedenen Zeitpunkten der Kompostierung und die Ermittlung eines minimalen sowie maximalen Abbaugrades anhand der Betrachtung der Ein- und Ausbaumassen sowie der Ein- und Ausbauflächen unter Berücksichtigung des Auftretens von Mikro-, Meso- und Makropartikeln.

Alle für die Versuche verwendeten BAK-Beutel zeigten bereits nach zwei Wochen deutliche Abbauerscheinungen. Der stärkste Abbau erfolgte jeweils in den ersten drei Wochen. Stärke-Blends zeigten einen schnelleren Abbau als die PLA-Blends. Nach 4 bis 6 Wochen war bei den meisten Stärke-Blend-Chargen ein Abbaugrad über 90% zu verzeichnen. Obwohl bei den meisten PLA-Blend-Chargen der Abbaugrad nach Fläche über 90% war, muss davon ausgegangen werden, dass ihr realer Abbaugrad teilweise unter 90% liegen wird. Bei den Beuteln mit Zugband lag der minimale Abbaugrad nach Masse zwischen 58 und 80%, bei denen ohne Zugband zwischen 71 und 94%.

Bei allen Entnahmezeitpunkten wurden in allen Chargen Mikro- und Mesopartikel gefunden, bei den meisten auch Makropartikel. Einige Stärke-Blend-Chargen waren frei bzw. nahezu frei an Makropartikeln, in einem Fall bereits nach drei Wochen. Auf den BAK-Abbau hatte neben der BAK-Materialsorte, hatte die BAK-Foliendicke einen Einfluss. Bei der am schlechtesten abgebauten Beutelsorte akkumulierten Überreste der stärkeren Zugbänder. Darüber hinaus war die Materialfeuchte bedeutend. In den Zonen mit Wassergehalten um 20%, in denen keine biologische Abbauprodukte stattfand, schritt auch der BAK-Abbau nicht fort. Inwieweit die Anforderung an Fremdstoffgehalte im Kompost eingehalten werden können, hängt neben dem BAK-Abbau auch von den in einer Kompostierungsanlage durchgeführten Aufbereitungen und den Hintergrundbelastungen ab.

IV. Grenzen der Studie

Die Ergebnisse dieser Studie beziehen sich speziell auf die vier verwendeten BAK-Beutel-Typen und die Bedingungen in der Kompostierungsanlage Neumünster. Wie sich die Beutel in anderen Anlagen verhalten würden, ist aus diesen Ergebnissen nicht konkret zu schließen, denn die BAK-Abbaufähigkeit geht mit den allgemeinen Kompostierungsbedingungen in einer Anlage einher. Höhere BAK-Abbaugrade als die hier angegebenen können vermutlich durch die Vermeidung von Zonen mit deutlicher Austrocknung erreicht werden.

In den Ergebnissen dieser Studie zeigten die Beutel aus Stärke-Blends bessere Abbauergebnisse, als die aus PLA-Blends. Diese kann jedoch nicht als allgemeine Aussage für die Abbaubarkeit der Materialtypen gelten. So kann die Materialzusammensetzung im Detail auch für Beutel des gleichen prinzipiellen Materialtyps schwanken. Darüber hinaus sind Materialstärken und Beutelaufbau, wie das Vorhandensein von Zugbändern, zu berücksichtigen. Sicherlich sind besonders dünne und einlagige Folien leichter abbaubar als dickere und mehrlagige. Jedoch sind hier Grenzen in der Verringerung der Materialdicke gesetzt, denn die Handhabungseigenschaften für den Beutelnutzer sind ein wichtiges Kriterium.

In dieser Studie wurden für die verbleibenden BAK-Reste flächen- und massenbezogenen Anteile für Mikro-, Meso- und Makropartikel angegeben. Die jeweiligen Einzelanteile sind nicht praxisrelevant, sondern der kumulative Wert ist zur Beurteilung des Abbaus ausschlaggebend. Die BAK-Folien veränderten sich während der Kompostierung deutlich im Hinblick auf ihre Festigkeit. Im Versuch

wurden intensive mechanische Belastungen, wie sie in einer großtechnischen Kompostierungsanlage durch Zerkleinerungs- und Siebungsprozesse auftreten, weitestgehend vermieden. Es ist zu vermuten, dass bei verstärkten mechanischen Belastungen ein Großteil der Makropartikel in Meso- oder Mikropartikel übergehen. Dies könnte sich auch auf den Abbaugrad auswirken. Durch eine bessere Verteilung und eine vergrößerte mikrobielle Angriffsfläche könnte dieser eventuell verbessert werden.

Der in der Studie berechnete massebezogene Abbaugrad ist als minimal möglicher Abbaugrad zu verstehen. Der tatsächliche Abbaugrad dürfte etwas höher ausfallen, insbesondere bei den Varianten mit niedrigeren Abbaugraden, da die Massebestimmungen aufgrund von Partikelverunreinigungen und Annahmen bezüglich der Partikeldimensionen mit Unsicherheiten behaftet sind. Weitere Unsicherheiten bestanden bei den BAK-Meso- und Mikropartikelmassen in Annahmen bezüglich der Materialdichte der BAK-Reste.

Die Angaben zum flächenbezogenen Abbaugrad sind ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet, vor allem wenn Makropartikel vorhanden sind. Die BAK-Beutel konnten zweidimensional gut vermessen werden. Die BAK-Makropartikel-Reste waren jedoch stark verknittert, somit dreidimensional. Die zur Abbaugradbestimmung verwendeten Flächenzahlen entsprachen jedoch der Aufsichtsfläche und waren somit zweidimensional und nicht direkt vergleichbar. Weitere Unsicherheiten bestanden bei den BAK-Meso- und Mikropartikeln in Annahmen bezüglich der Partikelform und -durchmesser. Auch hier könnte eine Weiterentwicklung der Methodik Verbesserungen im Hinblick auf die Aussagekraft des flächenbezogenen Abbaugrades bewirken.

Wieviel Mikro-, Meso- und Makropartikel bzw. BAK-Reste insgesamt tatsächlich im Kompost vorliegen können, kann mit den hier gezeigten Ergebnissen also nur in Form von Spannweiten dargestellt werden, in welcher der reale Wert sich bewegt.

Weitere Grenzen sind bei den Angaben zur spezifischen Flächensumme gesetzt. Im Praxisprozess können BAK-Folien bereits im Rahmen der allgemeinen Störstoffabscheidung ausgeschleust werden und somit nicht in die Kompostierung gelangen. Oder verbleibende BAK-Makropartikel werden mit weiteren Grobstoffen im Rahmen in der Nachbereitung des Komposts mittels Siebung entfernt. Diese würde die auf BAK-Reste zurückzuführenden Kompost-Fremdstoffe verringern.

Und letztendlich hat der Anteil der im Bioabfall enthaltenen BAK-Beutel einen Einfluss auf die Anteile an BAK-Resten im Kompost. Der Beutelanteil hängt von der Benutzungshäufigkeit durch die Bürger sowie vom Verarbeitungsverhältnis von Küchen- zu Grünabfällen in den Anlagen ab. Die in der Studie angegebenen Werte für BAK-Reste sind folglich nicht absolut sondern als orientierend zu betrachten. Eine Erhöhung der Genauigkeit der Aussagen ist mit Hilfe weiterführender Untersuchungen zu den Partikelverunreinigungen, den Materialdichten der Partikelreste sowie den Annahmen zu Partikeldurchmessern möglich. Die aktuelle Genauigkeit zeigt jedoch die Trends bereits gut auf.

Der Versuch im Detail

1 Verwendete Materialien

1.1 Bioabfallsammelbeutel

Es wurden vier verschiedene Bioabfallsammelbeutel (B, G, R, S) eingesetzt (Abbildung 1). Sie bestanden aus BAK-Kunststoffen, die laut Zertifikat entsprechend DIN EN 13432 kompostierbar sind. Die BAK-Beutel wurden von verschiedenen Herstellern zur Verfügung gestellt. Bei den G-Beuteln wurden zwei verschiedene Arten (G_a, G_b) geliefert.



Abbildung 1: Verwendete BAK-Beutel mit Typen-Bezeichnung

Eine Übersicht über die Hauptcharakteristika der Beutel bezüglich ihrer Herkunft und ihrer wesentlichen, anwendungsbezogenen Eigenschaften sowie die in den Untersuchungen verwendete Codierung gibt Tabelle 1. Die Angaben zu den Volumina standen teilweise auf den Beuteln (G_a, R, S), teilweise wurden sie von den Herstellern (B, G_b) erfragt.

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten BAK-Beutel

Codierung		Produktname	Beutel-Volumen (L)	Weitere Charakteristika		
Kürzel	Farbe			Mit Zugband	Mit Henkel	Mit Seitenfalz
B	Blau	Bioabfallbeutel	20	-	-	-
G _a	Grün	Abfallbeutel	10	-	+	+
G _b		Bioabfallbeutel	30	-	-	+
R	Rot	Bio-Zugbandbeutel	10	+	-	-
S	Schwarz	Tragegriff Müllbeutel	15	-	+	+

1.2 Netzmaterialien

Die Netze sollten stabil, luft- und flüssigkeitsdurchlässig sowie nicht verrottbar sein und zudem verhindern, dass größere Bioabfallmengen bei den Transport- und Umsetzungsprozessen verloren gehen. Um dieses Anforderungsprofil zu erfüllen, wurde eine dreilagige Konstruktion aus verschiedenen Netzmaterialien entwickelt und hergestellt. Die in Tabelle 9 (Anlage) aufgeführten Komponenten kamen dabei zum Einsatz. Das Vogelschutznetz sowie das Industrienetz wurden mit

einer Nylonschnur verbunden. Nach dem Befüllen wurde das nun doppellagige Netz jeweils mit einer weiteren Nylonschnur verschlossen. Das Fußballtornetz wurde als dritte Lage um die befüllten Netze gegeben und erhielt eine Aufhängung für den Transport mittels Kran sowie eine farbige Nylonschnur mit der Kennzeichnung des Netzinhaltes.

1.3 Bioabfälle

Für die Befüllung der Beutel, der Netze und der Container wurden unterschiedliche Bioabfalltypen, teilweise im Gemisch, verwendet. Die verwendeten unvermischten Ausgangsbioabfälle sind in Tabelle 2 gelistet. Sie wurden von den Kompostierungsanlagen in Lübeck bzw. Neumünster zur Verfügung gestellt.

Tabelle 2: Charakteristik und Funktion der eingesetzten Bioabfälle

Bioabfall	Herkunft	Charakteristik	Funktion
Lebensmittelabfälle	EBL, Lübeck	Rohe und verarbeitete Lebensmittelabfälle mit tierischen und pflanzlichen Bestandteilen, kaum verunreinigt und frisch	Frischer Küchenabfallanteil bei der Befüllung der Beutel
Bioabfälle A	EBL, Lübeck	Größtenteils Grünabfälle mit einigen Küchenabfällen; nicht weiter aufgereinigt und leicht angerottet	Älterer Küchenabfall- und Grünabfallanteil bei der Befüllung der Beutel; Ummantelung der gefüllten Beutel in den Netzen
Bioabfälle B	SWN, Neumünster	Gemischte Bioabfälle aus der Biotonne mit größtenteils Grünabfällen und mit wenigen Küchenabfällen sowie Siebrückhalt aus voriger Rotte; verunreinigt und angerottet	Ummantelung der Netzsäcke in den Containern

Die reinen Lebensmittelabfälle und die gemischten Bioabfälle A wurden in Anteilen von ca. 1:2 vermischt und in die BAK-Beutel gefüllt (Kapitel 2.1). Die gemischten Bioabfälle A wurden zudem verwendet, um die gefüllten BAK-Beutel in den Netzen zu umschließen (Kapitel 2.1.2). Die mit Lebensmittelabfällen und Bioabfällen A gefüllten Netze wurden in Container eingebaut (Kapitel 2.1.3) und waren dort in die Bioabfälle B eingebettet.

2 Versuchsdurchführung

2.1 Befüllung von Beuteln und Netzen

2.1.1 Beutel

Die Befüllung der BAK-Beutel erfolgte bei EBL in mehreren Schritten in einem Zeitraum von 2 Tagen:

i) Vorbereitung der Bioabfälle:

Die Verunreinigungen in den gemischten Bioabfällen A wurden größtenteils manuell entfernt, um die Aussortierung der BAK-Fragmente nach dem Netzausbau zu erleichtern. Dies erfolgte bei der Befüllung der Beutel und der Netze. Die Entfernung umfasste gröbere Kunststofffolien (auch BAK-Folien) und anderen flächige oder stückige Verunreinigungen.

ii) Vermischung von Bioabfällen mit Lebensmittelabfällen:

Mittels Schaufel wurden die sehr feuchten, nicht verunreinigten Lebensmittelabfälle und die gemischten Bioabfälle A (Tabelle 2) vermengt bis eine feuchte aber nicht mehr wässrige Konsistenz erhalten wurde. Die exakte Mischung variierte von Beutel zu Beutel im Hinblick auf Zusammensetzung und Menge in Grenzen. Verbleibende gröbere Fremdstoffe in den Bioabfällen A wurden manuell entfernt.

iii) Befüllung der Beutel:

Für ein Netz wurden 20 BAK-Beutel eines Typs (Abbildung 2, links oben) mit jeweils ca. 1,5 bis 2,0 kg Abfallgemisch pro Beutel befüllt. Bei den G-Beuteln kamen jeweils 10 der Sorte G_a (10 L) und 10 der Sorte G_b (30 L) zum Einsatz. Um abzusichern, dass der Massebereich eingehalten wird, wurde jeder Beutel mittels Plattformwaage gewogen. Insgesamt wurden pro Beuteltyp Chargen für 8 Netze vorbereitet.

iv) Verschluss der Beutel:

Die Beutel wurden unterschiedlich verschlossen, um die Vielfalt der in der Praxis angewandten Möglichkeiten widerzuspiegeln und zwar in Abhängigkeit vom Beuteltyp wie folgt:

- *B (B1-B8):* 10 Beutel unverschlossen, 5 mit Einfachknoten, 5 mit Doppelknoten
- *G (G1, 4, 6, 7):* fünf 10-L- und fünf 30-L-Beutel unverschlossen; drei 10-L- und zwei 30-L-Beutel mit Einfachknoten, zwei 10-L- und drei 30-L-Beutel mit Doppelknoten
G (G2, 3, 5, 8): fünf 10-L- und fünf 30-L-Beutel unverschlossen; zwei 10-L- und drei 30-L-Beutel mit Einfachknoten, drei 10-L- und zwei 30-L-Beutel mit Doppelknoten
- *R (R1-R8):* 10 Beutel unverschlossen, 10 Beutel mit zugezogenem Zugband
- *S (S1-S8):* 10 Beutel unverschlossen, 5 mit Einfachknoten, 5 mit Doppelknoten

2.1.2 Netze

Jeweils 20 gefüllte Beutel eines Typs wurden zusammen mit gemischten Bioabfällen A in ein Netz gegeben. Das Volumen der Bioabfälle A betrug ca. 160 L und wurde mittels 90-L-Behältern bestimmt. Die Befüllung der 32 Netze erfolgte in einer Weise, dass die Beutel gut mit Bioabfällen A umschlossen waren. Nach Verschluss der zweilagigen Netzschrift erfolgte eine Sicherung mit der äußeren Netzschrift, die Anbringung eines Seils zur Markierung sowie die Beschriftung der Netze (G1-G8, B1-B8, S1-S8, R1-R8) (Abbildung 2). An den Seilen waren zusätzliche Etiketten mit der Netz-ID angebracht, welche durch Kunststofffolie geschützt waren, um sie vor dem Rotteprozess zu schützen.

Pro Beuteltyp wurden insgesamt 8 Netze vorbereitet. Dies erfolgte über einen Zeitraum von 2 Tagen. Die befüllten Netze wurden über Nacht bei Außentemperaturen von ca. 5-6 °C gelagert. Ihr Transport erfolgte am Tag 3 mit einem LKW.



Befüllung, Wiegen und Volumenabschätzung der BAK-Beutel



Befüllung der Netze mit Bioabfall und BAK-Beuteln



Befüllung und Verschluss der inneren Netzlagen



Aufhängung des gefüllten Netzes zur Verwiegung



Bestimmung der Netzmasse mit Kranwaage



Lagerung der beschrifteten Netze im Außenbereich

Abbildung 2: Vorbereitung der BAK-Beutel und der mit BAK-Beuteln gefüllten Netze auf die Rotte

2.1.3 Kompostierung der Netze

2.1.3.1 Rottedauer und Rottetypen

Die Gesamtdauer der Kompostierung betrug 6 Wochen. Die Hauptrotte fand über 2 Wochen in Containern unter ständiger Luftzufuhr statt (Kapitel 2.1.3.2), die anschließende Nachrotte über 4 Wochen in einer überdachten Halle (Kapitel 2.1.3.3) (Abbildung 3). Impressionen des Ein- und Ausbaus der Netze sind Abbildung 4 zu entnehmen. Netze wurden nach dem in Tabelle 8 (Anlage) gezeigten Schema entnommen.



Abbildung 3: Hauptrottecontainer sowie Nachrottemiete zu Beginn und am Ende der Nachrotte

Die Hauptrotte folgte dem üblichen Prozess bei SWN. Der SWN-Routinebetrieb ist in Tabelle 10 (Anlage) kurz beschrieben. Nach 2-wöchiger Kompostierung in belüfteten Containern gilt das Rottegut als hygienisiert und wird als Frischkompost vermarktet. Eine Nachkompostierung erfolgt im üblichen Kompostierungsprozess bei SWN meistens nicht. Im Versuch wurde eine Nachrotte durchgeführt, da dies in vielen anderen Kompostierungsanlagen typisch ist.

2.1.3.2 Hauptrotte in Containern

Die gefüllten Netze wurden bei SWN in vier Containern (Außendimensionen jeweils 6 x 2,5 x 2,5 m) eingebaut (Abbildung 4). Ihr maximales Füllvolumen wurde mit 20 m³ angegeben. Pro Container wurden 2 Netze pro Beuteltyp eingebaut, also insgesamt 8 Netze pro Container. Das Einbauschema ist Tabelle 14 (Anlage) zu entnehmen. Die Netze wurden mittig in den Containern platziert und waren von Bioabfällen B umhüllt. Die Einfüllung der Bioabfälle erfolgte schichtweise mittels Radlader. Die Netze wurden ebenfalls mittels Radlader auf die untere Schicht gehoben und manuell ausgerichtet. Anschließend wurde die obere Schicht eingefüllt. Beide Bioabfallschichten wurden manuell eingeebnet. Die befüllten Container wurden verschlossen, gewogen, auf den Rotteplatz gefahren und dort an das Belüftungssystem und die Temperaturmessung angeschlossen. Die Belüftungsrate während der ersten beiden Wochen Intensivrotte betrug gemäß SWN pro Container ca. 220 m³/h. Nach 2 Wochen wurden die Container vom Belüftungssystem abgekoppelt und erneut verwogen. Die Containerinhalte wurden daraufhin in der Rottehalle abgekippt.

2.1.3.3 Nachrotte in einer Miete

Das angerottete Biogut aus den Containern wurde für die natürlich ventilerte Nachrotte in einer Halle genutzt (Abbildung 4). Hierfür wurde ein Teil des Biogutes mittels Radlader ausgebreitet. Die verbleibenden 28 Netze wurden darauf verteilt und mit einer weiteren Biogutschicht abgedeckt. Die so gebildete Miete hatte folgende Startdimensionen: 7 x 4,5 x 1,5 m. Die Netze waren wiederum vollständig mit angerottetem Material umgeben. Das Netzplatzierungs- sowie das Entnahmeschema sind Tabelle 14 (Anlage) zu entnehmen. Die Nachrottemiete wurde wöchentlich umgesetzt.

Nach der 4. Woche wurden die Netze sowie die Miete unter und über den Netzen bewässert, da teilweise zu trockene Zonen im Material festgestellt wurden. Die Bewässerung erfolgte individuell auf Basis des Trocknungsgrades des Netzinhaltes und der Netzmasse mit einer Gießkanne für eine gute Verteilung. Der Trocknungsgrad der Netze wurde visuell eingeschätzt (sehr trocken, trocken, mittelfeucht, feucht). Die berechnete definierte Wasserzugabe lag zwischen 6 und 44 L pro Netz. Nach der 5. Woche wurde das Material in einer anderen überdachten Rottehalle aufgesetzt.



Befüllung eines Containers mit Bioabfall



Einbau eines Netzes in einen Container



Platzierung der Netze im Container



Abkippen des Containerinhaltes



Bioabfall mit Netzen nach Hauptrotte



Wiegung und Transport zur Nachrotte



Platzierung der Netze in der Nachrotte



Entnommene Netze am Versuchsende

Abbildung 4: Impressionen vom Netzein- und -ausbau

2.2 Beprobung der Netze

2.2.1 Entnahme und Öffnung der Netze

Die Netze wurden mit Radlader und manuell aus den abgekippten Containerinhalten bzw. der Nachrotte geborgen. Die Netze waren mit einem roten Seil versehen, was ihre Auffindung im Rottegut erleichterte. 4 Netze wurden nach 2 und 4 Wochen Gesamtkompostierungsdauer, 8 nach 3, 5 und 6 Wochen entnommen. Es gab also 2 Termine mit Einfach- und 3 mit Doppelbestimmung. Von den Netzen wurden folgende Parameter bestimmt: Gesamtnetzmasse nach dem Ausbau, teilweise Gesamtnetzmasse nach Walken bzw. Transport zur Entleerungsfläche, Netzmaterialmasse nach Entleerung (Kapitel 2.3.1), sowie Netzzinnentemperatur (Kapitel 2.3.1.2). Nach Netzöffnung wurde der jeweilige Inhalt auf eine Kunststoffolie zur weiteren Untersuchung (Kapitel 2.2.2) entleert.

2.2.2 Entnahmen aus den Netzen

2.2.2.1 BAK-Makropartikel

Von dem auf einer Plane (ca. 5 x 3 m) ausgebreitete Netzinhalt wurde alle großen, gut sichtbaren BAK-Fragmente (Makropartikel) manuell aus dem Rottegut gesammelt (Abbildung 5) bis keine mehr sichtbar waren. Die Fragmente wurden gewogen, über Nacht im Kühlschrank gelagert und danach über eine Woche zur Konservierung für weiterführende Untersuchungen luftgetrocknet.



Entnahme der BAK-Makropartikel



Reduzierung des Rottegutes für eine repräsentative Probe



Abbildung 5: Entnahme von BAK-Makropartikeln und repräsentativen Kompostproben

2.2.2.2 Repräsentative Netzinhaltsproben

Der nach der BAK-Makropartikelentnahme verbliebene Kompost wurde nach BGK (2016: Methode "Verjüngen der Sammelprobe") auf eine Probengröße von 10-20 L reduziert. Das Material wurde mit Hilfe einer Schaufel gemischt, zu einem flachen Quadrat geformt, dieses in vier Segmente unterteilt und zwei gegenüberliegende Segmente entnommen (Abbildung 5). Der Vorgang wurde mit dem verbleibenden Material wiederholt bis die gewünschte Probenmenge erreicht war. Die Proben wurden im Kühlraum gelagert.

2.2.2.3 Sonstige Netzinhaltsproben

Da es in den Netzen teilweise Bereiche gab, die sehr trocken bzw. sehr feucht erschienen, wurden teilweise Rottegutproben entnommen, die sich optisch deutlich unterschieden: besonders trockenes und besonders feuchtes Material.

2.3 Messungen und Analysen

2.3.1 Rottegut

2.3.1.1 Masse, Volumen, Schüttdichte

Masse- und Volumenbestimmungen erfolgten probenabhängig auf unterschiedliche Weise:

- *Bioabfälle und Rottegutkleinmengen:* Massen und Volumina wurden anhand von Stichproben mittels Laborwaage (Fa. Sartorius LC2201S) und Messbecher bestimmt.
- *Chargen aus 20 Beuteln:* Nach dem Verschluss der Beutel wurde das Gesamt-Beutelvolumen der Charge mit Hilfe eines skalierten 90-L-Kübels (Messgenauigkeit ± 10 L) und die Masse mittels Plattformwaage ermittelt (Fa. Kern DE120K10A).
- *Netzinhalte:* Die Gesamtnetzmasse wurde mittels Kranwaage (Fa. Kern HUS600K200) zu verschiedenen Zeitpunkten (nach der Befüllung, bei jedem Umsetz- und beim Entnahmeterrin) gemessen. Zusätzlich erfolgte bei der Entnahme die Bestimmung der Netzmasse sowie der Netzmaterialien mittels Plattformwaage.
- *Rottegut in Containern:* Die Rottegutmassen wurden über die Massen der leeren und der gefüllten Container nach Ein- und Ausbau mittels LKW-Waage durch SWN-Mitarbeiter bestimmt. Das Gesamtinnenraumvolumen wurde von SWN erhalten. Beim Einbau waren die Container vollständig befüllt. Beim Ausbau wurde das reduzierte Rottegutvolumen über den Abstand der Substratoberfläche zur Containerkante bestimmt.
- *Rottegut in Miete:* Das Volumen der Nachrottemiete wurde zu Beginn und am Ende des Versuches mittels Abschätzung der Dimensionen (Länge, Breite, Höhe) näherungsweise ermittelt.

Die Schüttdichte bezeichnet das Verhältnis der Masse der Schüttung zum eingenommenen Schüttvolumen. Sie wurde für die Beutel- sowie die Containerinhalte mittels der Messergebnisse für Massen und Volumen kalkuliert. Für die Netzinhalte wurde sie anhand von Teilmengen der repräsentativen Stichproben (Kapitel 2.2.2.2) bestimmt und für die Nachrottemiete über Messungen an Stichproben.

2.3.1.2 Temperatur und Belüftung

Nach der Netzentnahme wurden die Netzzinnentemperaturen bestimmt. Hierfür kamen verschiedene Lanzen mit Temperatursensoren zum Einsatz, die teilweise von EBL, teilweise von der TUHH zur Verfügung gestellt wurden. Die Temperaturmessung erfolgte, bis sich am Sensor ein stabiler Temperaturwert einstellte. Zudem wurde an einigen Netzen die Oberflächentemperatur mit Hilfe einer Wärmebildkamera (Fa. FLIR) ermittelt.

Die Temperaturen in den Containern wurden kontinuierlich von SWN mit ihren praxisüblichen Einstecksensoren ermittelt. Pro Container wurde ein Sensor seitlich in ins Zentrum der Schmalseite der Container ca. 1,5 m in das Rottegut eingeführt. Während der Nachrotte erfolgte die Messung der Mietentemperatur wöchentlich. Zudem erfolgt an ausgewählten Terminen eine Bestimmung der Oberflächentemperaturen mittels Wärmebildkamera.

Die Hauptrottecontainer wurden aktiv belüftet. Hierfür wurde das betriebsübliche Belüftungssystem von SWN verwendet. Für die Gesamtanlage, bestehend aus mehr als 4 Containern, wird jeweils ein voreingestellter Volumenstrom verwendet, der während des Versuches nicht verändert wurde. Der durchschnittliche Volumenstrom pro Container wurde von SWN rechnerisch ermittelt, indem der Gesamtinputvolumenstrom der Anlage durch die angeschlossene Containeranzahl dividiert wurde und betrug $220\text{m}^3/\text{h}/\text{Container}$. Die Nachrottemieten wurden nicht aktiv belüftet. Eine gewisse Luftzufuhr erfolgte über natürliche Ventilation.

2.3.1.3 Siebfractionen

Von den repräsentativen Stichproben der Netzinhalte wurden Siebfractionen mittels Siebmaschine (Retsch, Typ AS 200 basic B) im Labor hergestellt. Zudem wurde ein exemplarischer Siebversuch mit einem Praxissieb von SWN für eine größere Rottegutmenge durchgeführt.

Siebfraktionierung mit Siebmaschine: Jeweils ca. 100 g einer repräsentativen Probe wurden in Fractionen unterschiedlicher Größe aufgetrennt. Die Siebung erfolgte für 5 min. Es kamen Siebeinsätze mit unterschiedlichen Maschenweiten zum Einsatz womit folgende Siebfractionen erhalten wurden:

- ≥ 16 mm
- $\geq 11,2 - 16$ mm
- $\geq 8 - 11,2$ mm
- $\geq 2 - 8$ mm
- $\geq 1 - 2$ mm
- < 1 mm

Die Siebfractionen wurden direkt nach der Siebung mittels Laborwaage gewogen. Die Siebungen erfolgten als Doppelbestimmung. Von den Siebfractionen mit relevantem BAK-Partikel-Anteil erfolgte eine manuelle Separierung und Zählung der Partikel (Kapitel 2.3.2.2.1.).

Trommelsiebung: Im SWN-Routinebetrieb wird das Rottegut nach zwei Wochen im Container mittels Trommelsieb (Siebmaschenweite 15 mm) in Frischkompost und Reststoffe getrennt. Mit diesem Industriesieb wurde eine orientierende Siebung des Rottegutes aus der Nachrotte von Woche 5 durchgeführt. Es wurden der Siebüberlauf und der Siebdurchgang bestimmt. Die Siebverluste wurden berechnet. Die Siebung erfolgt für ca. 5 Minuten bis kein Siebdurchgang mehr feststellbar war.

2.3.1.4 Wassergehalt

Die Bestimmung des Trockenrückstandes einer Probe erfolgte nach DIN 15934 durch Trocknung bei 105°C. Der Wassergehalt wurde mit dem Trockenrückstand über Differenzbildung zu 100% ermittelt. Die Wassergehalte wurden für repräsentative Proben aus den Netzen (Kapitel 2.2.2.2) und für einige sonstige Proben (Kapitel 2.2.2.3) aus Netzen und Miete ermittelt.

2.3.1.5 Rottegrad

Die Rottegradbestimmung erfolgte über die Ermittlung der Maximaltemperatur im Selbsterhitzungstest nach BGK (2006; Kap IV A1) durch ein externes Labor (UCL Umwelt Control Labor GmbH, Heide). Von allen Netzen aus der Nachrotte wurden Proben zur Analyse eingereicht. In Woche 3 umfasste diese eine Mischprobe aus Proben aller Netze, in Woche 4 wurden jeweils 2 Parallelproben an unterschiedlichen Stellen aus den Netzen genommen und in Wochen 5 und 6 wurde jeweils eine repräsentative Stichprobe (Kapitel 2.2.2.2) verwendet.

2.3.2 BAK-Beutel und BAK-Partikel

2.3.2.1 Originale Beutel

2.3.2.1.1 Optik, Haptik, Masse und Folienstärke

Die Beutel wurden optisch im Hinblick auf Färbung der Folie und des Aufdruckes sowie haptisch verbal beurteilt. Zudem wurde die Beutelleermasse einerseits mittels Wiegung der Einzelbeutel (TUHH) sowie darüber hinaus mittels Wiegung der Beutelrollen mit Division durch die Anzahl der Beutel pro Rolle bestimmt (Fa. PELY). Die Folienstärke wurde mit einem inkrementalen Messtaster (Heidenhain Metro MT 243603-07) gemessen. Pro Beuteltyp wurde 12 Messungen durchgeführt.

2.3.2.1.2 Fläche

Zur Bestimmung der Foliengrundfläche wurden die Beutel in Segmente unterteilt. Auch hier kamen verschiedene Methoden zum Einsatz. Bei Variante 1 (TUHH) wurde ein Beutel in die Segmente Grundkörper, Henkel, Falz, Saum und Zugband unterteilt und die jeweiligen Teilbereiche addiert. Mehrlagige Schichten wurden berücksichtigt. Die Gesamtfläche bezieht sich jeweils auf einlagige Schichten. In Variante 2 (Fa. PELY) wurden vereinfacht die Länge und Breite zuzüglich eines Saumes bzw. abzüglich eines Ausschnittes ermittelt. Mit Hilfe beider Methoden wurde ein gerundetes Mittel für die einlagige Gesamtfolienfläche pro Beuteltyp ermittelt (Tabelle 12, Anlage).

2.3.2.2 BAK-Makro-, Meso- und Mikropartikel nach Kompostierung

2.3.2.2.1 Separierung

Für die einzelnen BAK-Partikeltypen wurden unterschiedliche Methoden verwendet:

Direktauslese aus den Netzinhalten: Die Entnahme von BAK-Makropartikeln wurde in Kapitel 2.2.2.1 beschrieben. Die dort erhaltene Fraktion der „ausgelesenen BAK-Makropartikel“ bezieht sich auf den gut sichtbaren, manuell ausgelesenen Anteil der BAK-Makropartikel. Der erhaltene Anteil entspricht in dieser Ausarbeitung den gesamten BAK-Makropartikeln in einem Netz.

Auslese aus Siebfraktionen: Hier wurde unterschieden in die kleineren und in die größeren Siebfraktionen. Die kleineren entsprechen Mikro- und Mesopartikeln, die größeren Makropartikeln:

- Ca. 5 g von den Siebfraktionen < 1 mm, $\geq 1 - 2$ mm, $\geq 2 - 8$ mm (Kapitel 2.3.1.3) wurden auf einer Petrischale ausgebreitet. Die darin enthaltenen BAK-Partikel wurden manuell aussortiert, wobei eine beleuchtete Lupe und eine Pinzette zum Einsatz kamen. Die aussortierten Partikel wurden gezählt und in 2-mL-Eppendorf-Gefäßen für weitere Analysen gelagert. Partikel bis zu 2 mm wurden als „BAK-Mikropartikel“ bezeichnet, Partikel zwischen 2 und 8 mm als „BAK-Mesopartikel“. Sie wurden als Doppelbestimmung ermittelt.
- Darüber hinaus wurden die Siebfraktionen ≥ 16 mm, $\geq 11,2 - 16$ mm, $\geq 8 - 11,2$ mm (Kapitel 2.3.1.3) als „fraktionierte BAK-Makropartikel“ bezeichnet, jedoch nicht weiterführend separiert, da sie nur vereinzelt auftraten.

2.3.2.2.2 Masse der BAK-Makropartikel

Die Masse der aussortierten BAK-Makropartikel (Kapitel 2.2.2.1) wurde in drei Schritten bestimmt:

- *Vor Ort mittels Plattformwaage:* Die Partikel waren feucht sowie stark verschmutzt.
- *Im Labor mittels Laborwaage nach Lufttrocknung:* Die Trocknung erfolgte bei Raumtemperatur für ca. 1 Woche. Die Partikel enthielten weiterhin deutliche Verschmutzungen.
- *Im Labor mittels Laborwaage nach Separation von Verschmutzungen:* Die Aussortierung erfolgte manuell. Grobe Fremdstoffe waren durch die vorhergehende Trocknung leicht abtrennbar. Weiterhin anhaftende Fremdstoffe wurden, soweit es möglich war, durch Abstreifen von größeren BAK-Partikeln entfernt. Manuell nicht abstreifbare Verschmutzungen waren weiterhin vorhanden.

2.3.2.2.3 Flächenzahl der BAK-Makropartikel

Die luftgetrockneten und von anhaftenden Verschmutzungen befreiten ausgelesenen BAK-Makropartikel eines Netzes wurden auf einer 1 x 1 m großen weißen Fläche zunächst locker ausgebreitet. Bei besonders viele Makropartikeln wurden diese auf zwei entsprechenden Flächen

verteilt. Daraufhin wurden die Partikel möglichst eng und ohne Überlappung zu einem Rechteck zusammengeschoben und fotografiert. Von dem Rechteck wurden die Dimensionen erfasst, die Fläche errechnet und als Flächenzahl angegeben (Abbildung 15).

2.3.2.2.4 Flächenzahl der BAK-Meso- und Mikropartikel

Für die fraktionierten BAK-Mikro- und Mesopartikel wurde die Anzahl der Partikel pro Petrischale auf das Gesamtnetz hochgerechnet. Hierfür wurde der BAK-Anteil der Siebfraktion am Gesamtinhalt herangezogen. Weiterhin wurde eine angenommene fraktionsspezifische Durchschnittsfläche pro Partikel zur Flächenzahlbestimmung benutzt. Die Annahmen für die Durchschnittsflächen wurden wie folgt getroffen:

- BAK-Mesopartikel: $\geq 2 - 8$ mm: Kreis mit einem Durchmesser von 5 mm = 19,6 mm²
- BAK-Mikropartikel $\geq 1 - 2$ mm: Kreis mit einem Durchmesser von 1,5 mm = 1,77 mm²
- BAK-Mikropartikel < 1 mm: Kreis mit einem Durchmesser von 0,5 mm = 0,20 mm²

2.3.2.2.5 Spezifische Flächensumme der BAK-Makro- und Mesopartikel

Von der BGK wird der Parameter „Flächensumme“ genutzt, um Kompostverunreinigungen bezogen auf eine bestimmte Kompostmenge anzugeben. Sie wird in cm² pro L Kompost angegeben und wie folgt definiert: „Aufsichtsflächensumme der ausgelesenen Fremdstoffe > 2 mm“ (BGK, 2006, Kapitel II.3). Hier wurde eine Flächensumme für die Makro- und Mesopartikel bestimmt. Die Bestimmung erfolgte aus den Flächenzahlen von Kapitel 2.3.2.2.3 und 2.3.2.2.4 und den Rottegutrestvolumina (Tabelle 15). Im Unterschied zur BGK wurde sie nicht als „Flächensumme“ sondern als „spezifische Flächensumme“ bezeichnet, da kein Bilderkennungssystem zur Bestimmung der Partikelflächen zum Einsatz kam, sondern vereinfachte Annäherungen auf Basis durchschnittlicher Abmessungen.

3 Ergebnisse

3.1 Charakteristik der leeren BAK-Beutel

Bei den getesteten Beuteln handelte es sich um handelsübliche Bioabfallbeutel. Die versuchsrelevanten Informationen zu den BAK-Beuteln sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Weitere Beuteleigenschaften geben Tabelle 11 und Tabelle 12 (Anlagen).

Alle Beutel zeichnen das Kompostierbarkeitszeichen „Keimling“ mehr oder weniger auffällig aus. Es ist eine eingetragene Marke im Besitz von European Bioplastics (2022) und kann vergeben werden, wenn DIN EN 13432 eingehalten wird. Es besagt unter anderem, dass nach einer Kompostierung von maximal 12 Wochen in einer Siebfraktion >2 mm maximal 10% der BAK-Trockenmasse im Rottegut gefunden werden dürfen. In Deutschland erfolgt die DIN EN 13432-Zertifizierung über DINCERTCO (TÜV, 2021 a,b). Auf allen Beuteln war eine DINCERTCO-Registrierungsnummer angegeben. Von den S-Beuteln war diese jedoch nicht im DINCERTCO-Register (TÜV, 2021a) enthalten, denn für den Versuch wurde eine Nummernfehldruck-Charge geliefert. Das Zertifikat DIN 13432 PLUS, welches besagt, dass das Material bereits nach 6 Wochen abgebaut ist, war im DINCERTCO-Register für B-Material zu finden (TÜV, 2021b).

Tabelle 3: Basisinformationen zu den eingesetzten BAK-Beuteln

Beuteltyp	B	G _a	G _b	R	S
Beutelvolumen	20 L	10 L	30 L	10 L	15 L
Grundmaterial					
DIN EN 13432	+	+	+	+	+
DIN 13432 PLUS	+	-	-	-	-
Marke	Ecovio®	MATER-BI	MATER-BI	Ecovio®	MATER-BI
Hersteller	BASF	NOVAMONT	NOVAMONT	BASF	NOVAMONT
Blend	PBAT/PLA	PBAT/Stärke	PBAT/Stärke	PBAT/PLA	PBAT/Stärke
Beutel					
Dicke der Folie (µm)	20	18	17	21 (20 / 30) ¹	17
Masse (g / Beutel) ^{2,3}	11,0	8,5	12,5	9,0 (8,0 / 1,0) ¹	9,0
Flächensumme (cm ² / Beutel) ³	4600	3900	5800	3600 (3300 / 300) ¹	4200
Dichte der Folie (g/cm ³)	1,20	1,24	1,20	1,21 (1,22 / 1,12) ¹	1,26

¹ Angaben für Beutel / Zugband (Messung Zugbandfoliendicke: PELY); ² gerundet auf 0,5 g; ³ Für Berechnungen verwendete mittlere und gerundete Daten aus Messungen mit zwei Messprinzipien (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, Anlage)

Nur die B- und R-Beutel informierten darüber, dass sie aus einem bio-basierten Material bestehen (Ecovio®). Nach Herstellerangaben waren auch das Grundmaterial (MATER-BI) der G- und S-Beutel bio-basiert. Beide Grundmaterial-Typen waren nach Herstellerangaben Blends, in denen biologisch abbaubares Polybutylenadipat-Terephthalat (PBAT) eine Hauptkomponente ist. Dies kann petro-

basiert sein oder aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Darüber hinaus kam grundmaterial-spezifisch eine weitere Hauptkomponente zum Einsatz:

- Die B- und R-Beutel wurden aus dem Grundmaterial Ecovio® hergestellt, welches aus PBAT in Verbindung mit bio-basierter Poly-Milchsäure (PLA) besteht. Für die PLA-Herstellung (Hersteller: Natureworks, USA) kommt nach Herstellerangaben Mais als Grundstoff zum Einsatz. Der B-Beutel zeichnet das Zertifikat „Biobasiert 50-85%“ mit der Registrierungsnummer 8C056 aus. Dies bestätigt einen bio-basierten Kohlenstoffgehalt von mindestens 50% und einen Organikgehalt von 79,3% (TÜV, 2021c).
- Die G- und S-Beutel wurden aus einer MATER-BI-Folientype hergestellt. Diese besteht nach Herstellerangaben aus einem Blend von biologisch abbaubarem Copolyester (ORIGO-BI) und bio-basierter thermoplastischer Stärke. ORIGO-BI ist der Novamont-Handelsname für PBAT. Es wird zum Teil aus Monomeren von nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Insgesamt beträgt der bio-basierte Kohlenstoff-Anteil des MATER-BI-Granulates nach Herstellerangaben mehr als 50%.

Nach der BioAbfV (2022) müssen biologisch abbaubare Kunststoff-Sammelbeutel überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt sein. Dies war bei allen Beuteln gegeben. Die Charakteristik der Beutel bezüglich der Einfärbung ist Tabelle 12(Anlage) zu entnehmen. Grüne Farbstoffe wurden vor allem über den Druck zugegeben. Die S-Beutel wurden nach Herstellerangaben nicht direkt eingefärbt, sondern enthielten regranulierte Produktionsabfälle von MATER-BI Folien. Die Farbstoffe wurden somit indirekt hinzugegeben, indem der Grundmasse bedruckte Beutelverarbeitungsreste beigemischt wurden. Die damit gefertigten Beutel werden leicht grünlich. Bei den Zugbändern der R-Beutel erfolgte die Einfärbung direkt.

Die Beutel unterschieden sich neben dem Grundmaterial und dem Grünanteil größen- und aufbaubedingt in Masse, Dicke und Fläche. Die Dichte der Foliengrundmaterialien war nach Herstellerangaben nahezu identisch. Der Herstellungsprozess der Folien könnte eventuell einen Einfluss auf die Materialdichte haben. Die Beutelleermassen sowie die Folienflächen (Tabelle 12, Anlage) wurden jeweils mittels zweier verschiedener Methoden bestimmt. Die Ergebnisse lagen nahe beieinander. In Tabelle 3 sind die gerundeten Mittel enthalten, welche für weiterführende Berechnungen verwendet wurden. Die Dicke der Folien variierte zwischen 17 und 20 µm. Die Ecovio®-Folien waren in der Tendenz etwas dicker als die MATER-BI-Folien. Die Masse lag im Durchschnitt bei 10 g und die Flächensumme bei ca. 4400 cm² pro Beutel. Sie variierte jedoch von Beuteltyp zu Beuteltyp, wobei ein wesentliches Kriterium die Beutelfüllvolumina darstellten. Sie lagen zwischen 10 und 30 L (Tabelle 3). Entsprechend war die 30-L-Variante G_b am Material-intensivsten, mit ca. 25% bzw. 30% über dem Durchschnitt.

Die Beutel unterschieden sich neben den Grundmaterialien sowie den größen- und aufbaubedingten Differenzen auch in Optik und Haptik (Tabelle 12, Anlage). Zudem wiesen die Stärke-Blend-Beutel einen leichten Geruch auf und waren weniger flüssigkeitsdicht als die PLA-Blend-Beutel.

3.2 Charakteristik der gefüllten BAK-Beutel und Netze

Die Beutelinhalte bestanden aus einem Gemisch von Bioabfälle A sowie Lebensmittelabfällen (Tabelle 2) im Verhältnis von ca. 2:1. Jeweils 20 der gefüllten Beutel wurden zusammen mit Bioabfällen B (Tabelle 2) in ein Netz eingebracht. Weiterführende Angaben zu den BAK-Beuteln sowie zu den Netzen gibt Tabelle 4. Die spezifische Angaben zu Einbaudaten (Massen, Volumina, Dichten) für alle 32 Netze, jeweils 8 Netze pro BAK-Typ, sind Tabelle 13 (Anlage) zu entnehmen.

In der Praxis können sich mit BAK-Beuteln gesammelte Bioabfälle von typischen Biotonnenabfällen durch einen höheren Küchenabfallanteil unterscheiden. Im Versuch wurde dies durch die

Gemischbildung berücksichtigt. Die Inhalte der Beutel waren nicht identisch. Sie unterschieden sich bezüglich der genauen Mischungsverhältnisse und Charakteristika der Lebensmittelabfälle bzw. Bioabfälle z.B. bezüglich der Wassergehalte und Schüttdichten.

Tabelle 4: Charakteristik der BAK-Beutel-Chargen und der Netze bei Untersuchungsbeginn

BAK-Typ	Masse 20 Beutel		Dichte Beutel	Masse Netze	Dichte Netze	Ø Anteil gefüllte Beutel pro Netz	
	gefüllt	leer	Beutel- inhalte	Netz- inhalte	Netz- inhalte	Masse	Volumen
	(Kg / Netz)	(Kg/Netz)	(Kg /L)	(Kg /Netz)	(Kg /L)	(%)	(%)
B	37,5 ± 3,8	0,22	0,53 ± 0,06	94,9 ± 13,8	0,43 ± 0,04	39,5	31,9
G	37,4 ± 3,1	0,21	0,54 ± 0,04	99,5 ± 9,3	0,45 ± 0,03	37,6	30,7
R	36,1 ± 2,3	0,18	0,51 ± 0,05	95,5 ± 9,4	0,43 ± 0,02	37,8	31,4
S	36,9 ± 2,6	0,18	0,52 ± 0,04	99,5 ± 10,6	0,45 ± 0,04	37,0	31,2
Mittelwert	37,0	0,20	0,53	97,6	0,44	38,0	31,3

Kern et al. (2018) untersuchten ca. 50 BAK-Beutel aus Haushalten und ermittelten eine durchschnittliche Beutelfüllmenge von 1,7 kg Biogut. Der hier verwendete, durchschnittliche Inhalt an Biogut lag bei 1,8 kg bzw. 4,1 L pro Beutel. Die pro Beutel eingefüllte Biogutmasse schwankte in Grenzen. Die Gesamtmassen von 20 gefüllten Beutel pro Netz lagen jedoch recht eng beieinander (Tabelle 4).

Die Netzinhaltsmasse lag im Mittel bei 98 kg mit einem Maximum von 117 kg und einem Minimum von 79 kg (Tabelle 13, Anlage). Die anfänglich hohen Netzinhaltsmassen wurden reduziert, da sich Massen über 100 kg nur schwer handhaben ließen. Das durchschnittliche Abfallvolumen im Netz betrug 222 L mit einer resultierenden Schüttdichte von 0,44 kg/L Biogut (Tabelle 13, Anlage). Der Anteil der gefüllten Beutel im Netz lag massebezogen knapp über einem Drittel und volumenbezogen knapp unter einem Drittel.

Die Gesamt-BAK-Masse von 20 leeren Beuteln (Menge in einem Netz) schwankte aufgrund der unterschiedlichen Beutelcharakteristika zwischen 0,18 und 0,22 kg (Tabelle 4). Sie variierte leicht im Hinblick auf die BAK-Typ. Der Anteil an BAK-Folienmasse betrug ca. 0,5% pro Beutel und ca. 0,2% pro Netz. Die S- und R-Chargen in den Netzen hatten im Mittel mit 0,18 und 0,19% die etwas geringeren BAK-Anteile, die G- und B-Chargen aufgrund der etwas schwereren BAK-Beutel mit 0,21% und 0,23% die etwas Höheren. Jeweils eine Stärke- und eine PLA-Blend-Charge waren den geringeren Beutelmassen bzw. BAK-Anteilen und umgekehrt zuzuordnen. Der mit der BioabV (2022) neu eingeführte Grenzwert für Kunststoffe im Bioabfall vor der Kompostierung beträgt 0,5%. Hier zählen BAK-Beutel jedoch nicht dazu.

3.3 Charakteristik der Rotte

3.3.1 Hauptrottephase in Containern

Pro BAK-Typ wurden jeweils 2 Netze in einem Container deutlich voneinander entfernt eingebaut (Tabelle 14, Anlage). Zonen mit unterschiedlichen Milieubedingungen konnten dadurch besser erfasst werden. Durchschnittlich wurde ca. 11 Mg Rottegut pro Container eingebaut, wobei ca. 0,8 Mg auf die jeweils 8 gefüllten Netze zurückzuführen waren (Tabelle 13, Anlage). Der Masseverlust während der Hauptrotte betrug im Durchschnitt ca. 20% pro Container, wies jedoch containerspezifische

Unterschiede auf (Abbildung 6). Er ist auf den mikrobiellen Abbau organischer Substanz und auf den Verlust von Wasser durch die Belüftung zurückzuführen.

Zur weiterführenden Charakteristik der Kompostierungsprozesse wurde zunächst die Oberfläche der Containerinhalte inspiziert (Abbildung 7). Es zeigten sich Unterschiede im oberflächlichen Bewuchs mit Pilzen, was auf einen etwas unterschiedlichen Kompostierungsverlauf pro Container schließen lässt. Es wurden auch deutliche Inhomogenitäten innerhalb der Container festgestellt. So gab es sehr unterschiedliche Zonen im Hinblick auf die Rottegutfeuchte (Abbildung 8, links). Auch Gradienten bei den direkt nach Containeröffnung gemessenen Oberflächentemperaturen konnten beobachtet werden (Abbildung 8, rechts).

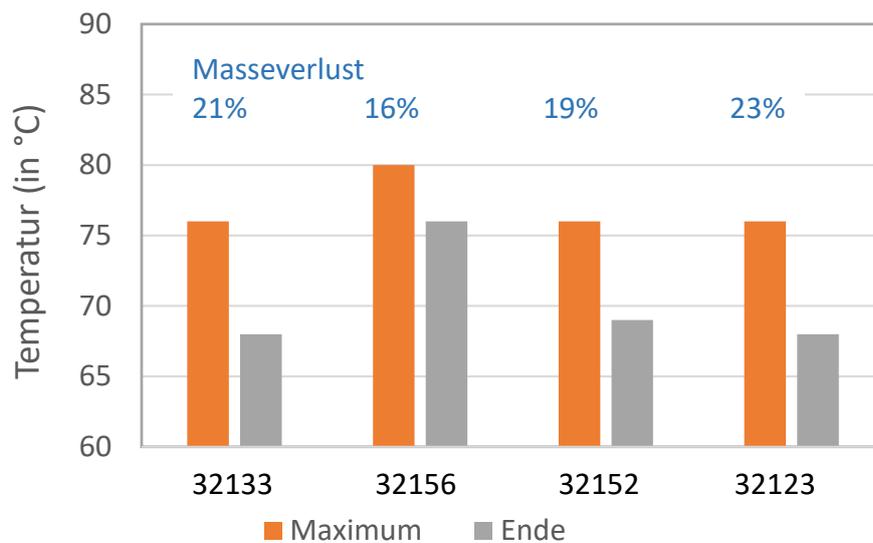


Abbildung 6: Temperaturen und Masseverluste in den Containern in der Hauptrottephase



Abbildung 7: Substratoberfläche in den Containern am Ende der Hauptrottephase

Zur besseren Beschreibung der Vorgänge während der Hauptrotte wurden die punktuell gemessenen Temperaturen im Inneren der Container herangezogen. Die Verläufe der Temperaturen zeigt Abbildung 28 (Anlage). Das Temperaturmaximum (Abbildung 6) wurde bei allen Containern mit Ausnahme von Container 32156 nach 2 Tagen erreicht. Bei diesem Container war auch die Temperatur am Ende der Hauptrottephase noch besonders hoch und der Masseverlust am geringsten.

In allen Containern lagen die Temperaturen zwischenzeitlich über 75°C und am Ende der Hauptrotte noch über 65°C. Die Anforderungen der BioAbfV (2022) bezüglich einer Hygienisierung des Materials wurden erreicht. Die hohen Temperaturen lassen auch auf eine gute Abbauaktivität in den Containern schließen. Die Masseverluste zwischen 16 und 23% (Abbildung 6) sind somit nicht nur auf Wasserausträge zurückzuführen. Es ist auch davon auszugehen, dass der Biogutabbau nicht in allen Zonen der Container gleichmäßig verlief und dass es von Container zu Container gewisse Unterschiede

gab. So waren die Netze im Container 32133 (B2, B4, R6, R8, G3, G4, S1, S3) in einem aktiveren Umgebungsmilieu untergebracht, als die Netze im Container 32156 (B1, B3, R3, R7, G1, G2, S2, S8).



Feuchtegradienten
am Beispiel des Containers 32152



Gradienten der Oberflächentemperatur
am Beispiel des Containers 32133

Abbildung 8: Beispiele für Feuchte- und Temperaturinhomogenitäten in Containern

Üblicherweise verwendet SWN das Rottegut am Ende einer 2-wöchigen Containerphase für die Erzeugung eines vermarktungsfähigen Kompostproduktes (Tabelle 10, Anlage). Hierfür wird der Containerinhalt mit einem Trommelsieb fraktioniert. Die Feinfraktion unter 15 mm wird vermarktet. Im Unterschied zur üblichen Routine bei SWN wurde das den Containern entnommene Rottegut nicht gesiebt, sondern für die Nachrotte verwendet. Die ersten vier Netze (B2, G3, R6, S1) wurden nach dem Ende der Hauptrotte entnommen.

3.3.2 Nachrottephase auf Miete

Die verbleibenden Netze, 7 pro BAK-Typ, wurden in die Nachrottemiete eingebaut. Der Netzeinbau erfolgte wiederum mit deutlicher Entfernung voneinander (Tabelle 14, Anlage), um unterschiedliche Milieuzonen breiter erfassen zu können. Da die Temperaturen am Ende der Hauptrotte noch immer sehr hoch waren, kann davon ausgegangen werden, dass noch ein hoher Anteil an leicht verfügbaren Stoffen im Rottegut vorhanden war.

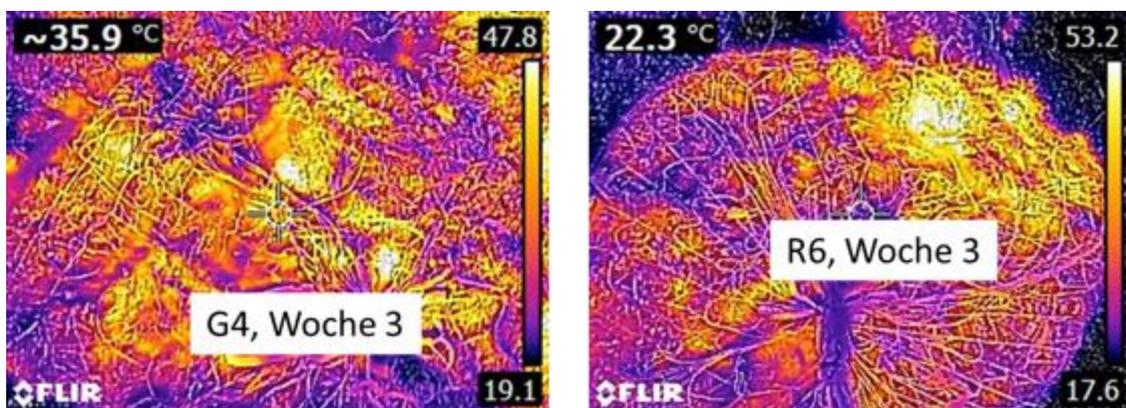


Abbildung 9: Beispiele für Oberflächentemperaturen nach Entnahme von Netzen

Der Temperaturverlauf im Inneren der Nachrottemiete ist exemplarisch für die Anfangsphase in Abbildung 29 (Anlage) dargestellt. Die beiden Messstellen zeigten anfänglich hohe Temperaturen von 72 bzw. 60 °C mit abnehmender Tendenz. Sie sanken bereits nach 3 Tagen um mehr als 15°C. Dies zeigt, dass die Kompostierungsaktivität in der Nachrotte nachließ und auch, dass sie in unterschiedlichen Mietenbereichen unterschiedlich verlief. Während die beiden kontinuierlichen Messstellen (Abbildung 29) eine moderate Temperaturdifferenz von etwas mehr als 10°C anzeigten, waren die Unterschiede im Inneren der Netze deutlich größer. Die während der Umsetzungsvorgänge bei Netzentnahme bestimmten Netzinntemperaturen sind in Tabelle 15 (Anlage) gelistet. In Abbildung 10 (Kapitel 3.4.1) sind sie graphisch dargestellt und werden weiterführend diskutiert. Innerhalb der Netze konnte es punktuelle Kälte- bzw. Hitzeneister geben. Dies zeigt exemplarisch Abbildung 9 für die Netzoberflächentemperaturen, die nach der Netzentnahme gemessen wurden.

Es ist davon auszugehen, dass der unterschiedliche Biogutabbau, der sich bereits in den unterschiedlichen Zonen in den Container andeutete (Kapitel 3.3.1), auch in der Nachrotte fortsetzte. Mit finalen Netzinntemperaturen zwischen 42 und 56°C (Tabelle 15, Anlage) kann geschlossen werden, dass der biologische Rottegutabbau am Ende des Versuches noch nicht abgeschlossen war. Im Vergleich zur Containerphase lief er aber langsamer ab, da keine aktive Belüftung mehr stattfand und da ein Teil der leicht abbaubaren Komponenten bereits verbraucht war. Der Kompostierungsprozess befand sich nicht mehr in der Intensivrottephase, sondern in der Abkühlungsphase. Die Kompoststreife schritt im Vergleich zu den Komposten aus den Containern voran, hohe Rottegrade wurden jedoch zumeist noch nicht erreicht (Tabelle 15, Anlage). Der Vergleich der Netztemperaturen der Netze, die in der Hauptrotte in einem besonders aktiven (B4, G4, R8, S3) bzw. weniger aktiven (B3, G2, R7, S8) untergebracht waren, zeigte das sich dieser Einfluss nicht bis zum Ende der Nachrotte auswirkte.

3.4 Charakteristik der Netze

3.4.1 Temperatur

Der Verlauf der Netzinntemperaturen ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Temperaturen von Woche 2 repräsentieren den Endzustand der Hauptrotte. Sie variierten insgesamt zwischen 52 und 73°C. Bei den Mittelwerten lagen die B- und S-Netze (64, 65°C) geringfügig über denen der G- und R-Netze (61, 62°C). Bis zur Woche 4 änderte sich die Spannweite mit Temperaturen zwischen 18 und 70°C enorm. Bei der Hälfte der Netze lag sie deutlich im thermophilen, bei der anderen im mesophilen Bereich. Einige der „kalten“ Netze wiesen sogar Temperaturen unter 30°C auf (B1, B5, G2, R3, S6, S8).

In Woche 4 wurde das Rottegut zum Angleich der Wassergehalte befeuchtet (Kapitel 3.4.2). In der folgenden Woche lagen die Temperaturen in allen Netzen zwischen 44 und 60°C. Bei allen „kalten“ Netzen war ein Temperaturanstieg zu verzeichnen, bei den „warmen“ ein Temperaturabfall. Bis zum Versuchsende in Woche 6 sank die Temperatur weiter in den Bereich um 42-56°C.

Der Temperaturverlauf bei der Kompostierung wird einerseits durch das Vorhandensein von leicht abbaubarem Rottegut bestimmt, darüber hinaus auch von den Milieubedingungen. Die thermophilen Endtemperaturen lassen bei allen Chargen noch auf einen sehr aktiven Biogutabbau und damit auf das Vorhandensein von leicht abbaubarem Rottegut am Ende der Nachrotte schließen. Der zwischenzeitliche Einbruch der Temperaturen in den mesophilen Bereich bei einem Teil der Netze (zwischen Woche 2 und 4: G2, R3; zwischen Woche 3 und 4: B5, S8) war auf eine zu starke Austrocknung des Substrates zurückzuführen (Kapitel 3.4.2).

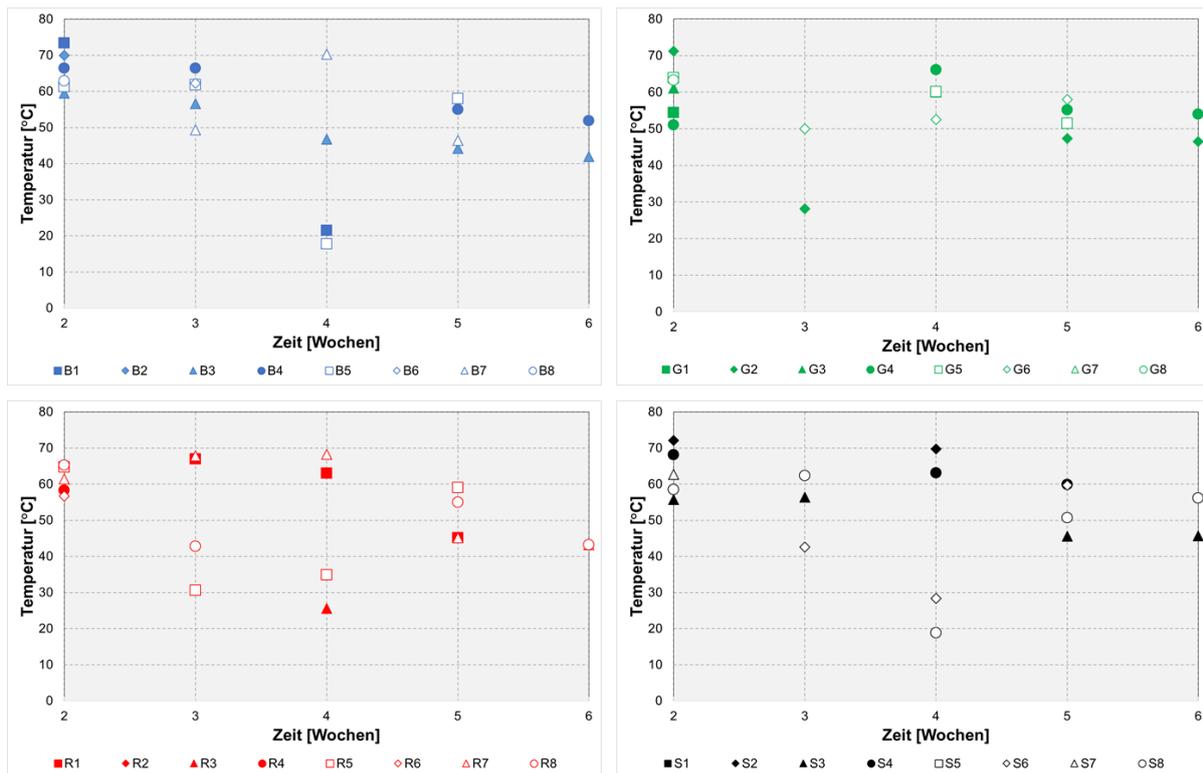


Abbildung 10: Temperaturverläufe in den Netzen während der Nachrotte
(links: Netze mit PLA-Blend-Beuteln, rechts: Netze mit Stärke-Blend-Beuteln)

Die BAK-Materialien in den Netzen hatten keinen Einfluss auf den Temperaturverlauf, da ihr Anteil im Vergleich zum sonstigen Rottegut sehr klein war. Die Temperaturen können jedoch den BAK-Abbau beeinflussen. Prinzipiell erhöhen sich biologische Abbauaktivitäten mit der Temperatur im betrachteten Bereich. Die Mitteltemperaturen aller Netze unterschieden sich nur unwesentlich bei den verschiedenen BAK-Chargen. Bei jedem BAK-Typ waren Netze vorhanden, die dem typischen Temperaturverlauf der Kompostierung folgten und welche, die Temperatureinbrüche durch Austrocknungen aufwiesen (Netze mit Stärke-Blend-Beuteln: G2, S6, S8; Netze mit PLA-Blend-Beuteln: B1, B5, R3, R5). Vom Versuchsaufbau her wurde also eine gute Spannweite im Hinblick auf die Inhomogenität bei der Kompostierung und den Einflussfaktor Temperatur abgedeckt. Keine der BAK-Chargen wies nur besonders günstige bzw. besonders ungünstige Temperaturverläufe auf.

3.4.2 Wassergehalte

Das eingebaute Rottegut hatte einen Wassergehalt im oberen des von BGK (2010) angegebenen Bereiches (50 – 65 %) für Rotteeingangsgemische. Der Wassergehalt in den Beuteln und Netzen ergab sich aus den sehr feuchten Speiseresten und etwas weniger feuchten Bioabfällen A:

- Wassergehalt Speisereste: 72% FM (Mittelwert aus 3 Proben),
- Wassergehalt Bioabfall A: 63% FM (Mittelwert aus 6 Proben).

Der Wassergehalt des Bioabfalls B von SWN um die Netze herum hatte einen Wassergehalt von 47% FM (Mittelwert aus 3 Proben, 44-49% FM).

Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Wassergehalte der Netzinhalte in einem gut für die Kompostierung geeigneten Bereich lagen. Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangssubstanzen, ihrer inhomogenen und teilweise auch sehr grobstückigen Beschaffenheit und der manuellen Mischtechnik

kann auch davon ausgegangen werden, dass es innerhalb der Netze zu Beginn der Kompostierung Zonen mit etwas unterschiedlichen Wassergehalten gab.

Die durchschnittlichen Wassergehalte in den Netzen bei ihrem Ausbau zeigt Abbildung 11 (Einzelwerte: Tabelle 15, Anlage). Bis zur Woche 4 nahmen sie ab und lagen bei 17-34% FM. Innerhalb der Netze gab es Zonen mit deutlich unterschiedlichen Wassergehalten, von sehr trocken über trocken und mittelfeucht bis hin zu feucht. Da der Gesamteindruck in Richtung einer Austrocknung zunahm erfolgte in Woche 4 eine definierte Befeuchtung der Netze, sodass die Wassergehalte in Woche 5 und 6 wieder zwischen 32 und 42% lagen. Sehr niedrige durchschnittliche Ausbauwassergehalte $\leq 25\%$ FM wurden bei folgenden BAK-Chargen jeweils einmal festgestellt: B1 (17% in Woche 4), S7 (17% in Woche 3), G8 (22% in Woche 2), und R3 (25% in Woche 4). Die Austrocknung ist vorwiegend auf die starke Belüftung während der Intensivrotte zurückzuführen, bei der sich Luftkanäle ausbildeten. Darüber hinaus erfolgte ein Wassertransfer aufgrund der höheren Netzinhaltswassergehalte im Vergleich zum umgebenden Material.

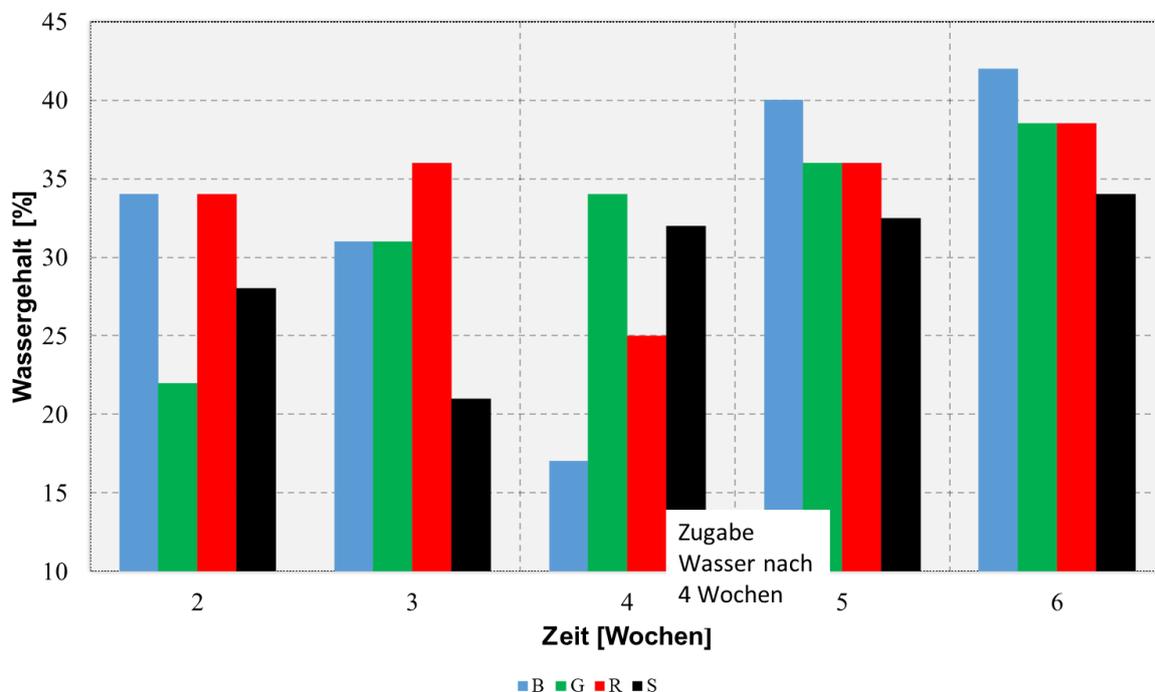


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der Wassergehalte in den ausgebauten Netzen (B, R: Netze mit PLA-Blend-Beuteln; G, S: Netze mit Stärke-Blend-Beuteln)

Laut einer Literaturlauswertung bei Körner (2006) liegt der minimal notwendige Wassergehalt für einen biologischen Abbau bei der Kompostierung zwischen 12 und 25% FM. Darüber hinaus sind Abbauaktivitäten in einem sehr weiten Bereich möglich. Die optimalen Wassergehalte am Start einer Kompostierung sind substratabhängig und können zwischen 45 und 70% FM liegen. Für Komposte liegen die angestrebten Wassergehalte maximal bei 45% FM (BGK, 2017, 2018).

Zu Beginn der Kompostierung können die Wassergehalte in den Netzen dem optimalen Bereich zugeordnet werden. Auch während der Kompostierung lagen sie in der überwiegenden Mehrzahl der Netze im geeigneten Bereich. Nur in vier Netzen, von jedem BAK-Typen jeweils einem, lag der durchschnittliche Ausbauwassergehalt $\leq 25\%$ FM. In diesen Fällen kann davon ausgegangen werden, dass ab einem bestimmten Zeitpunkt kein mikrobieller Abbau, sowohl von Rottegut als auch von BAK-Material, mehr stattfand. Die Wassergehalte der nach 6 Wochen ausgebauten Netze lagen alle in einem für Komposte gut geeigneten Bereich. Vom Versuchsaufbau her wurde also auch bezüglich der

Wassergehalte eine gute Spannweite im Hinblick auf die Inhomogenität bei der Kompostierung in einer Kompostierungsanlage abgedeckt. Keine der BAK-Chargen wies nur besonders gute bzw. besonders schlechte Wassergehaltsverläufe auf.

Die stärkste Austrocknung fand innerhalb der Hauptrotte aufgrund der aktiven Belüftung statt. Im weiteren Verlauf veränderte sie sich hauptsächlich relativ durch den Abbau organischer Substanz und durch die mikrobielle Wasserproduktion. Beides führt tendenziell zu einem geringen Anstieg. Spezielle Effekte die zu einer Reduzierung geführt haben, könnte bei manchen Chargen eine Lage in der Nähe des Hallentores mit Zugluft sein. Zudem lagerte ein Teil der Miete zeitweise auf einen Lochboden, bei dem zu einem Zeitpunkt eine Luftströmung festgestellt wurde.

3.4.3 Massen

Ein Netz enthielt zu Beginn der Kompostierung durchschnittlich 97 kg Biogut, wobei die Anfangsmasse von Netz zu Netz in gewissen Grenzen schwankte. Davon entfielen 36-37 kg auf gefüllte BAK Beutel (Tabelle 13, Anlage). Das Volumenverhältnis gefüllter Beutel zu umgebendem Bioabfall im Netz entsprach ca. 1:2. Durch den Befüllvorgang wurde das Material etwas kompaktiert. Der Masseverlauf der Netzinhalte über die Kompostierung ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Masse der Netzinhalte nach Entnahme der Netze zeigt zudem Tabelle 15 (Anlage).

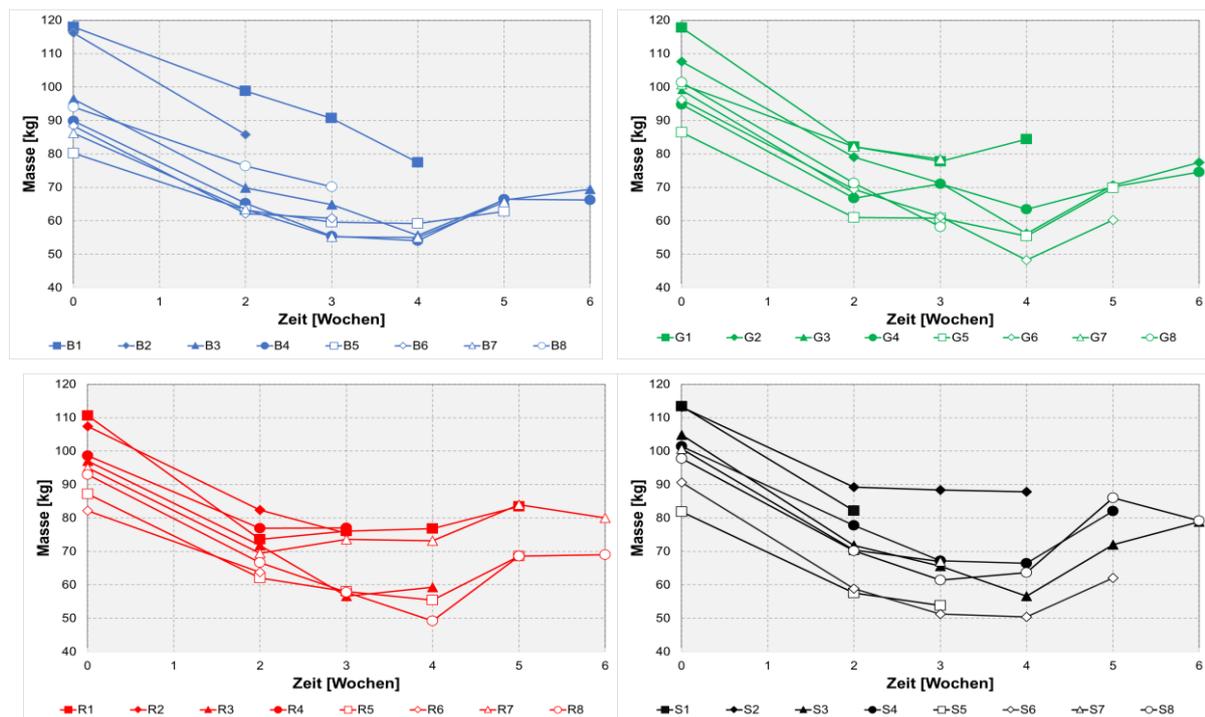


Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf der Gesamtmassen der Netze während der Kompostierung
(Gesamtmasse: Netzinhalt einschließlich Netz)
(links: Netze mit PLA-Blend-Beuteln, rechts: Netze mit Stärke-Blend-Beuteln)

Die stärksten Masseverluste wurden während der Hauptrotte erzielt. Im Vergleich zu den Gesamtmasseverlusten der Containerinhalte (16-23%; Kapitel 3.3.1) lag der Masseverlust bei den nach 2 Wochen entnommenen Netzen mit durchschnittlich 27% etwas höher, was auf den höheren Anteil an Lebensmittelabfällen zurückzuführen ist. Die Variationsbreite von Netz zu Netz variierte zwischen

23 und 33% der Einbaumasse. Bis zur Woche 4 sanken die Masseverluste sehr leicht weiter. Der Anstieg in Woche 5 ist auf die Befeuchtung zurückzuführen. Insgesamt waren die Masseverluste für die unterschiedlichen Netz-Chargen vergleichbar. Im Durchschnitt lagen sie über alle Netze und Zeiten bei 27%. Den niedrigsten Durchschnitt wiesen die R-Netze (25%), den höchsten die G-Netze (29%) auf. Beim Vergleich der Einzelnetze ist die Spannbreite größer. Der niedrigste Ausbaumasseverlust wurde bei Netz R7 mit 16% nach Woche 6 festgestellt und der höchste mit 43% bei Netz G8 nach Woche 3 (Tabelle 15, Anlage).

Der Masseverlust resultiert einerseits aus dem biologischen Abbau von Rottegut und hierbei vor allem aus den Küchenabfällen, gefolgt von wenig verholzten Grünabfällen und zuletzt von holzigem Material. Der Masseverlust durch einen BAK-Abbau ist aufgrund dessen geringer Gesamtmasse im Gemisch (Kapitel 3.2) als vernachlässigbar einzuschätzen. Der Masseverlust resultiert weiterhin aus den Wasserverlusten bei der Kompostierung. Darüber hinaus gingen bei der Netzwegung über die Netzoberfläche kleinere Substratpartikel verloren. Dieser Anteil ist aber als untergeordnet einzuschätzen.

UBA (2015) gibt die Masseverluste bei der Kompostierung von Bioabfällen mit 40 -55% an. Die in dieser Untersuchung ermittelten Werte lagen zumeist darunter. Eine Ausnahme waren das Netz G8, welche nach Ausbau einen Masseverlust über 40% aufwies. Insgesamt lassen die Ergebnisse zu den der Masseverlusten darauf schließen lässt, dass die Abbauprozesse in der 6-wöchigen Kompostierung noch nicht abgeschlossen waren. Darauf deuten auch die noch hohen Temperaturen am Ende der Rotte hin (Kapitel 3.4.1).

3.4.4 Rottegrad

Der Rottegrad soll in erster Linie der Unterscheidung von Frisch- und Fertigkompost dienen und das Abbaugeschehen mit Hilfe von Kennzahlen beschreiben. Die Rottegrade II und III entsprechen Frischkomposten (Temperaturmaxima im Selbsterhitzungstest: 50-60 bzw. 40-50°C) und die Rottegrade IV und V Fertigkomposten (Temperaturmaxima: 30-40 bzw. <30°C). Bei Temperaturmaxima über 60°C im Selbsterhitzungstest ist das Material als Kompostrohstoff kategorisiert (BGK, 2006).

Nach 2-wöchiger Rotte im Container liegt nach Erfahrungen von SWN ein Frischkompost mit Rottegrad II vor. Die gemessenen Rottegrade der Netzinhalte nach Ausbau aus der Nachrottemiete sind in Tabelle 15 (Anlage) zusammengestellt. Die erwartete Tendenz von niedrigen zu hohen Rottegraden konnte zumeist nicht festgestellt werden. Nach 6 Wochen ergaben vier Netze einen Kompostrohstoff, zwei einen Frisch- und weitere zwei einen Fertigkompost.

Ein wesentlicher Grund sind die Inhomogenitäten von Netz zu Netz sowie die Einschränkungen durch die Methode. Laut BGK (2016) führt z.B. zu trockenem oder zu feuchtem Material zu einer Unterschätzung der Selbsterhitzungsfähigkeit und somit zur Überschätzung des Rottegrades. Der Wassergehalt der Probe soll mittels Faustprobe eingestellt und angegeben werden. Dies ist eine sehr gefühlabhängige Methode. Da keine Wassergehaltsangaben vom Analyselabor gemacht wurden, ist zu vermuten, dass alle Wassergehalte als passend eingeschätzt und mit den Originalproben gearbeitet wurde. Deren Wassergehalte variierten jedoch erheblich. Die Proben sind somit schwerlich vergleichbar. Zur Einschätzung des Abbaus sind die Masseverluste (Kapitel 3.4.3) besser geeignet.

3.5 Rottegutkörnung

3.5.1 Siebfractionierung im Labor

Die Siebfractionierung in 6 Korngrößenklassen erfolgt für repräsentative Proben aus den Netzinhalten (Kapitel 2.3.1.3). Die Ergebnisse der Siebanalysen bezüglich der Massenanteile in den einzelnen Siebdurchgängen sind in Abbildung 13 für die verschiedenen Kompostierungszeiten dargestellt. Die Ergebnisse im Detail sind in Tabelle 16 (Anlage) aufgeführt. Das auf den Sieben zurückgehaltene Material enthielt Rottegut und ggf. BAK-Partikel des entsprechenden Größenbereiches. Die optische Einschätzung bei den Siebrückständen von Sieben mit größerer Maschenweite (≥ 8 mm) zeigte, dass dort nur vereinzelt BAK-Partikel enthalten waren. Diese wurden im Hinblick auf BAK-Partikel nicht weiterführend ausgewertet. Sie waren auf übersehene BAK-Makropartikel zurückzuführen, welche im Vergleich zu den manuell aus dem gesamten Netzinhalt ausgelesenen BAK-Makropartikel nicht ins Gewicht fielen. Die Rottegutfraktionen der Korngrößen 2-8 mm, 1-2 mm und <1 mm wurden weiterführend ausgewertet und zur Kalkulation der BAK-Meso- und Mikropartikel pro Netz herangezogen (Kapitel 2.3.2.2.1, 2.3.2.2.4).

In Abbildung 13 ist die Tendenz zu erkennen, dass Proben mit einer längeren Kompostierungszeit einen höheren Anteil an feinerem Material aufwiesen. Abweichungen bei einigen Proben können auf Inhomogenitäten und geringe Probenmengen zurückgeführt werden. Die Ergebnisse bestätigen, dass mit weitergehendem Abbau die verbleibenden organischen Partikel tendenziell kleiner werden.

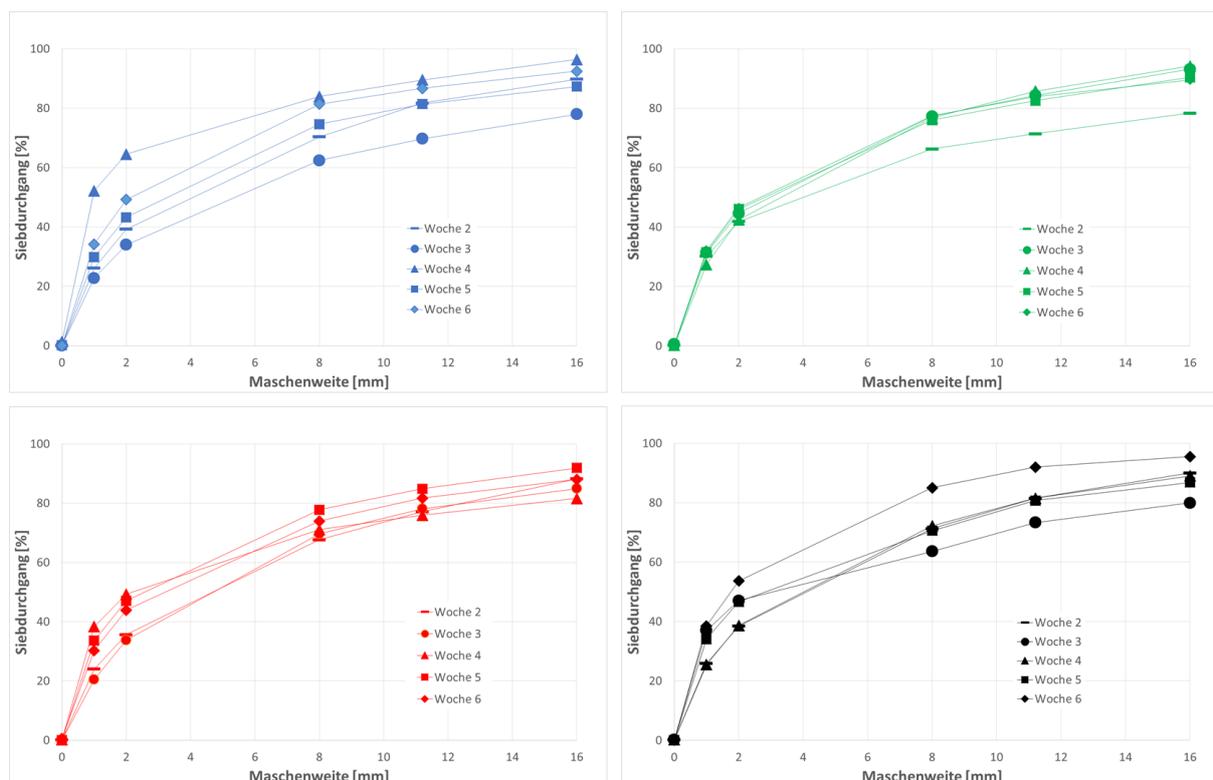


Abbildung 13: Kumulative Siebdurchgänge von Rottegut in verschiedenen Rottewochen
(links: Netze mit PLA-Blend-Beuteln, rechts: Netze mit Stärke-BAK-Beuteln)

In Kompostierungsanlagen wird das Rottegut nach der Kompostierung im Allgemeinen fraktioniert, um grobe Stoffe abzutrennen und Komposte mit unterschiedlichen Korngrößen herzustellen. Bei SWN wird hierfür im Praxisbetrieb eine Trommelsieb (15 mm) verwendet. Die 16-mm-Siebdurchgänge in

den Siebfractionierungsversuchen waren in der Größenordnung vergleichbar mit den Trommelsieb-durchgängen aus dem großtechnischen Siebversuch (Kapitel 3.5.2). Für die einzelnen Netzinhalte lagen sie zwischen 77 und 95% des Rotteutes. Diese Werte können den zu erwartenden Kompostanteilen bei Einsatz der SWN-Fractionierungstechnologie zugeordnet werden.

3.5.2 Trommelsiebung in der Kompostanlage

Zum Vergleich mit den Ergebnissen der Siebfractionierungen (Kapitel 3.5.1) wurde ein orientierender großtechnischer Siebversuch durchgeführt. Rottegut (118 kg) aus der 5. Nachrotteweche wurde mit dem 15-mm-Trommelsieb von SWN (

Abbildung 14, links) fraktioniert. Bei der Befüllung traten durch den versuchsbedingten Batchbetrieb Materialverluste von 13% auf. Diese wurden verrechnet. Der Versuch wies nach Korrektur der Verluste ein Grobanteil von 18% und einen Feinanteil von 82% (Abbildung 14, Mitte). Der Feinanteil liegt damit im Bereich, der bei den Siebfractionierungen (Kapitel 3.5.1) erhalten wurde.



Trommelsieb: Trennt Rottegut in Feinkompost und eine Grobfraction, die auch Kunststofffolien enthält



Kompost <15 mm: Wird in die Landwirtschaft abgegeben und kann Mikroplastik enthalten



BAKs nach 2-wöchiger Kompostierung: Könnten bei Siebung abgetrennt oder zerkleinert werden

Abbildung 14: Impressionen von der Trommelsiebung zur Fraktionierung des Rotteutes (links/Mitte); Manuell separierte Makro-Partikel (rechts)

Die Trommelsiebung dient bei SWN neben der Erzeugung eines Kompostproduktes mit definierter Korngröße auch der Störstoffabscheidung. Der Feinanteil ist der Kompost, welcher an die Landwirtschaft abgegeben wird. Die Grobfraction wird bei SWN zurückgeführt. Wenn allerdings ein hoher Störstoffanteil festgestellt wird, geht sie in die Entsorgung.

Die Fremdstoffe im Ausgangsmaterial, die mit dem Trommelsieb abgetrennt werden sind vor allem nicht abbaubare Plastikbeutel bzw. deren größere Fragmente. Die Abtrennung erfolgt jedoch nicht vollständig, denn die verschiedensten Rottegutbewegungen führen zu einer Teilerkleinerung von Folien. Kleinere Folienfragmente gelangen in die Feinfraktion. Die Verunreinigung von mittelkörnigen Komposten wird bei SWN in den Jahreszeugnissen 2021 wie folgt angegeben (SWN, 2021 c,d):

- Frischkompost: 0,136% TS Fremdstoffe >2 mm, davon 0,015% TS verformbare Kunststoffe,
- Fertigungskompost: 0,057% TS Fremdstoffe >2 mm, davon 0,01% TS verformbare Kunststoffe.

Auch im Falle von BAK-Beuteln würden sich verbliebene Fragmente entsprechend ihrer Größe in zwei Stoffströme aufspalten. Allerdings ist zu erwarten, dass größere BAK-Fragmente wie die manuell ausgelesenen BAK-Makropartikel (Kapitel 2.2.2.1), durch die mechanische Belastung im Trommelsieb in kleinere Fragmente zerfallen, denn durch den Rotteprozess nimmt ihre Festigkeit ab. Das

mechanische Veralten von teilabgebauten BAK-Beuteln sollte weiterführend betrachtet werden, um Schlussfolgerungen auf das Verhalten von BAK-Makropartikeln im Trommelsieb treffen zu können.

3.6 Charakteristik des Abbaus

3.6.1 BAK-Makropartikel

3.6.1.1 Flächenzahl und BAK-Makropartikel-Restfläche

Von den manuell aus den Netzen ausgelesenen BAK-Makropartikeln (Kapitel 2.2.2.1) wurde die Flächenzahl (Kapitel 2.3.2.2.3) bestimmt. Sie ist als Orientierungswert zum Vergleich von unterschiedlichen Chargen zu verstehen. Sie gibt jedoch keine absolute Fläche für die nach der Kompostierung übrig gebliebenen BAK-Folienreste an und sie erlaubt auch keine Berechnung eines Abbaugrades mit Bezug zu den Flächen der Originalbeutel (Tabelle 3).

Für die Bestimmung der Flächenzahl wurden zunächst manuell Verunreinigungen von den ausgebreiteten, luftgetrockneten BAK-Makropartikeln entfernt (Abbildung 15). Die so gereinigten BAK-Makropartikel wurden daraufhin möglichst eng, aber ohne Überlappung zu einem Rechteck zusammengeschoben.



Abbildung 15: Bestimmung der Flächenzahl der aus den Netzen ausgelesenen BAK-Makropartikel
(A – Flächenzahl)

Eine fotografische Dokumentation der für die Bestimmung der Flächenzahlen herangezogenen Flächen geben die Abbildungen 16 bzw. 17 für die BAK-Fragmente von PLA- bzw. Stärke-Blends. Es sind zudem Informationen zum zeitlichen Verlauf der Veränderung sowie zu den Wassergehalten und Temperaturen im Rottegut bei Netzausbau enthalten. Die Flächenzahlen für die ausgelesenen BAK-Makropartikel sind für jedes Netz in Tabelle 15 (Anlage) aufgeführt. Dort sind auch die Ausgangsflächen der BAK-Beutel aufgeführt. Ausgangsflächen und Flächenzahlen sind jedoch aufgrund der unterschiedlichen Dimensionalität (2-D, 3-D) nicht direkt vergleichbar.

Die Fotodokumentationen (Abbildung 16 und 17) zeigen deutliche Unterschiede bezüglich des Abbaus der BAK-Beutel sowohl im Hinblick auf den BAK-Typ als auch auf die zum gleichen Zeitpunkt entnommenen Parallelnetze eines BAK-Typs.

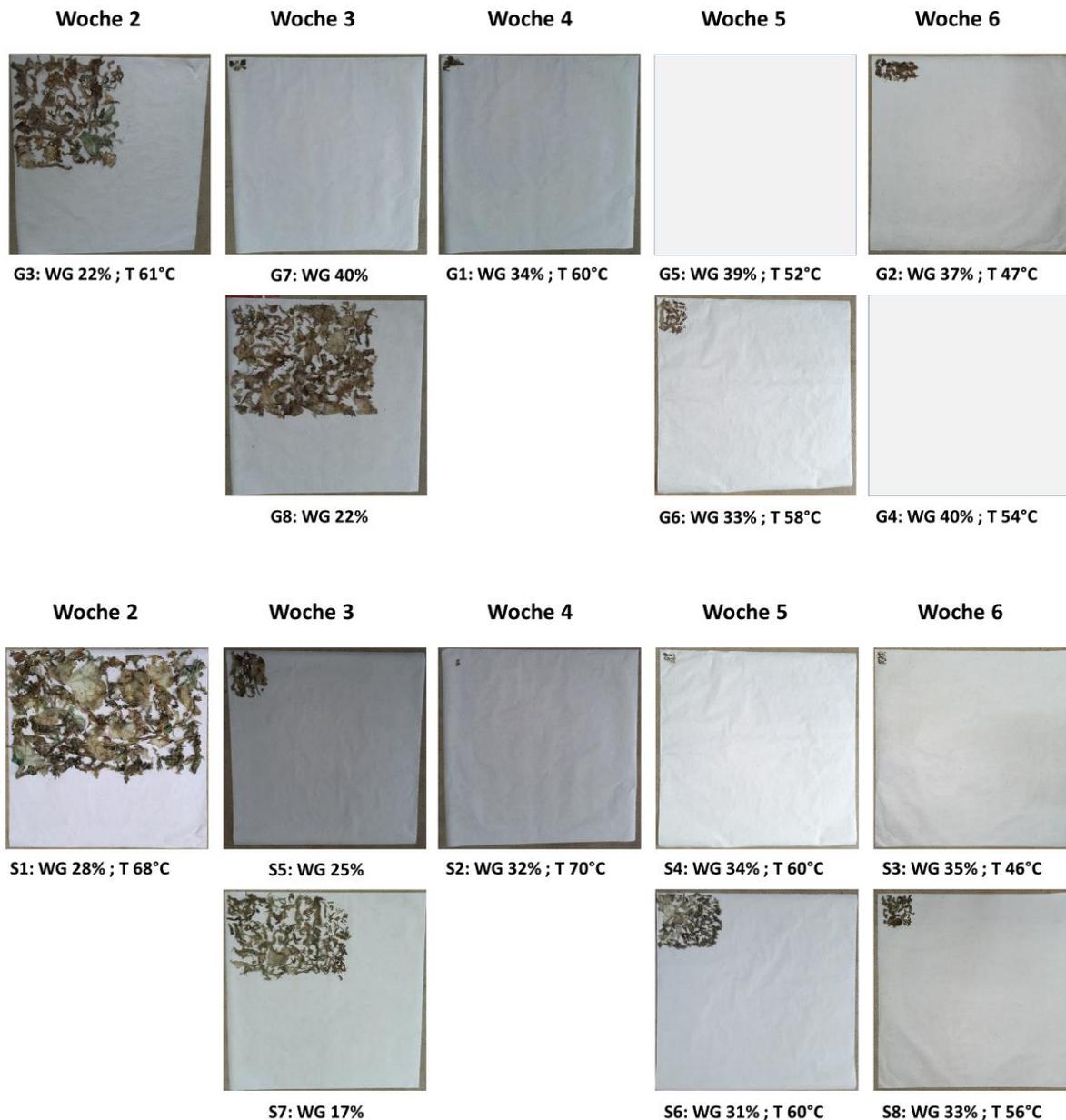


Abbildung 16: Ausgelesene BAK-Makropartikel aus Netzen mit Stärke-Blend-Beuteln (mit Ausbaugezeiten, -wassergehalten und -temperaturen, oben: G-Netze; unten: S-Netze)

Stärke-Blend-Beutel:

BAK-Makropartikelfrei waren nur die G-Netze (G5, G4) nach 5 bzw. 6 Wochen, sehr wenige Partikel waren nach 3 bzw. 4 Wochen (G7, G1) aufzufinden. Die zum gleichen Zeitpunkt ausgebauten Parallelproben unterschieden sich. Im Ergebnis resultierten Netze mit einem niedrigeren Wassergehalt im Rottegut in mehr verbleibenden BAK-Makropartikeln. Das Netz mit dem am schlechtesten abgebauten Material (G8) war mit einem Wassergehalt von 22% extrem trocken. Bei den S-Netzen gab es fast keine BAK-Makropartikel nach der 4, 5 bzw. 6 Woche (S2, S4, S3). Auch hier war bei den

entsprechenden, weniger gut abgebauten Parallelproben der Wassergehalt in den Netzen etwas niedriger. Während die Wassergehalte in den Chargen mit den wenigsten verbleibenden BAK-Makropartikeln bei den S-Netzen bei 34 bzw. 35% betragen, lagen sie bei den G-Netzen mit 39 bzw. 40% etwas höher.

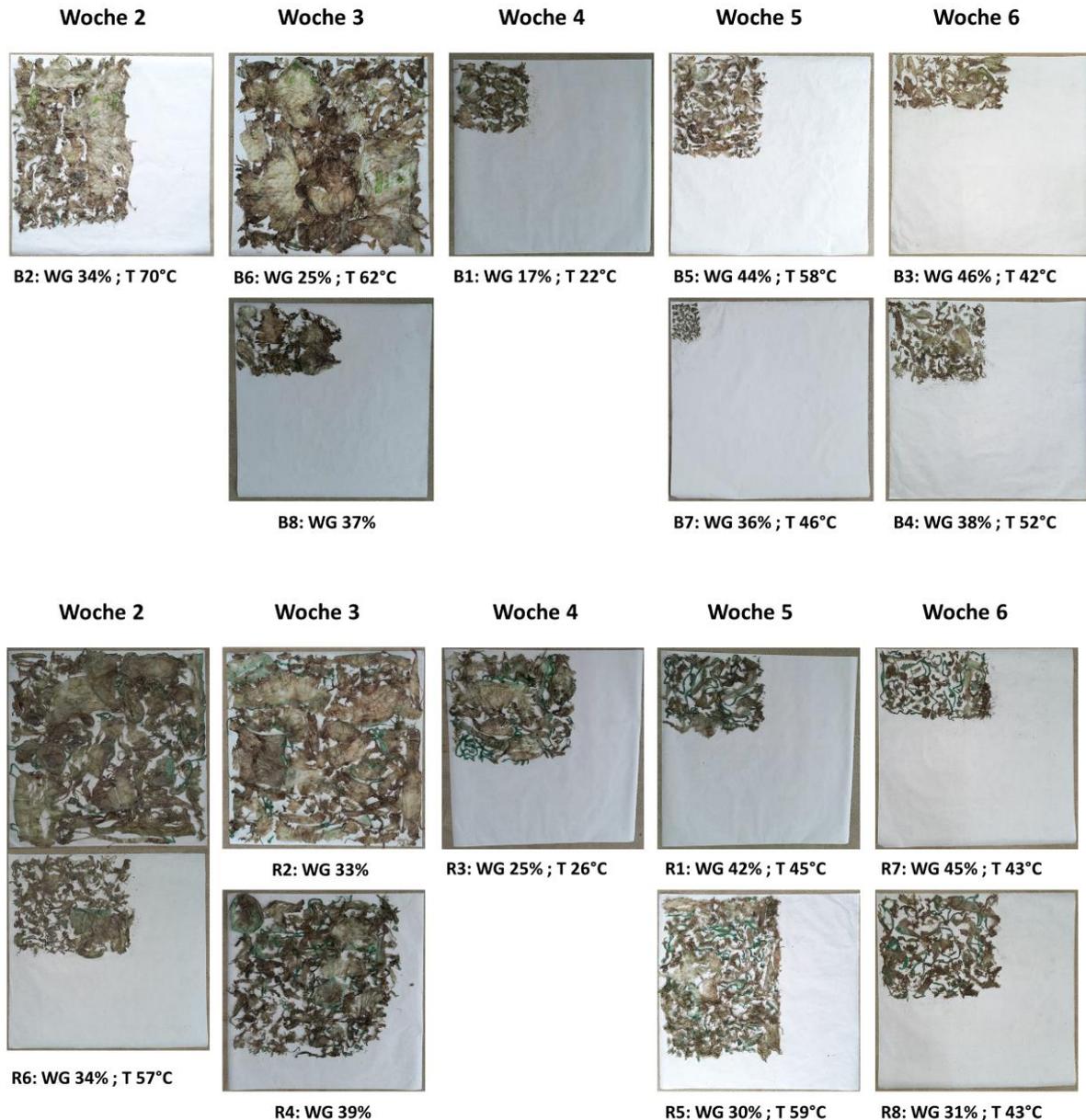


Abbildung 17: Ausgelesene BAK-Makropartikel aus Netzen mit PLA-Blend-Beuteln (mit Ausbauezeiten, -wassergehalten und -temperaturen; oben: B-Netze; unten: R-Netze)

PLA-Blend-Beutel:

Am schlechtesten wurde das BAK-Material aus den R-Netzen abgebaut. In der B-Charge verlief der Abbau etwas besser im Vergleich zur R-Charge, jedoch schlechter im Vergleich zu den beiden Stärke-Blend-Materialien. Von den Wassergehalten unterschieden sich R- und B-Netz-Inhalte nicht weitreichend von denen der G- und S-Netze. Sowohl bei den R- als auch bei den S-Netzen wurde wiederum der Trend beobachtet, dass niedrigere Wassergehalte zu mehr verbleibenden BAK-Makropartikeln führten. Im Unterschied zu den B-Beuteln wiesen die R-Beutel jedoch viele Rückstände

der Zugbänder auf. Dass sie sich im BAK-Material der R-Chargen anreicherten ist in Abbildung 16 zu erkennen (grüne Partikel). Die Zugbänder hatten eine höhere Folienstärke (Tabelle 3) und waren zudem vierlagig.

Eine vergleichende Darstellung der Flächenzahlen für die BAK-Makropartikel aus den Netzen für die Wochen 2 bis 6 zeigt Abbildung 18. Wie zu erwarten nahm die Flächenzahl bei allen Chargen mit der Zeit ab. Der deutlichste BAK-Abbau wurde demnach bis zur Woche 4 erzielt. Die mit der Befeuchtung in Woche 4 realisierte Wassergehaltsanhebung hatte zwar einen positiven Einfluss auf die Aktivität im Rottegut, eine große Veränderung des BAK-Abbaus war jedoch nicht zu verzeichnen.

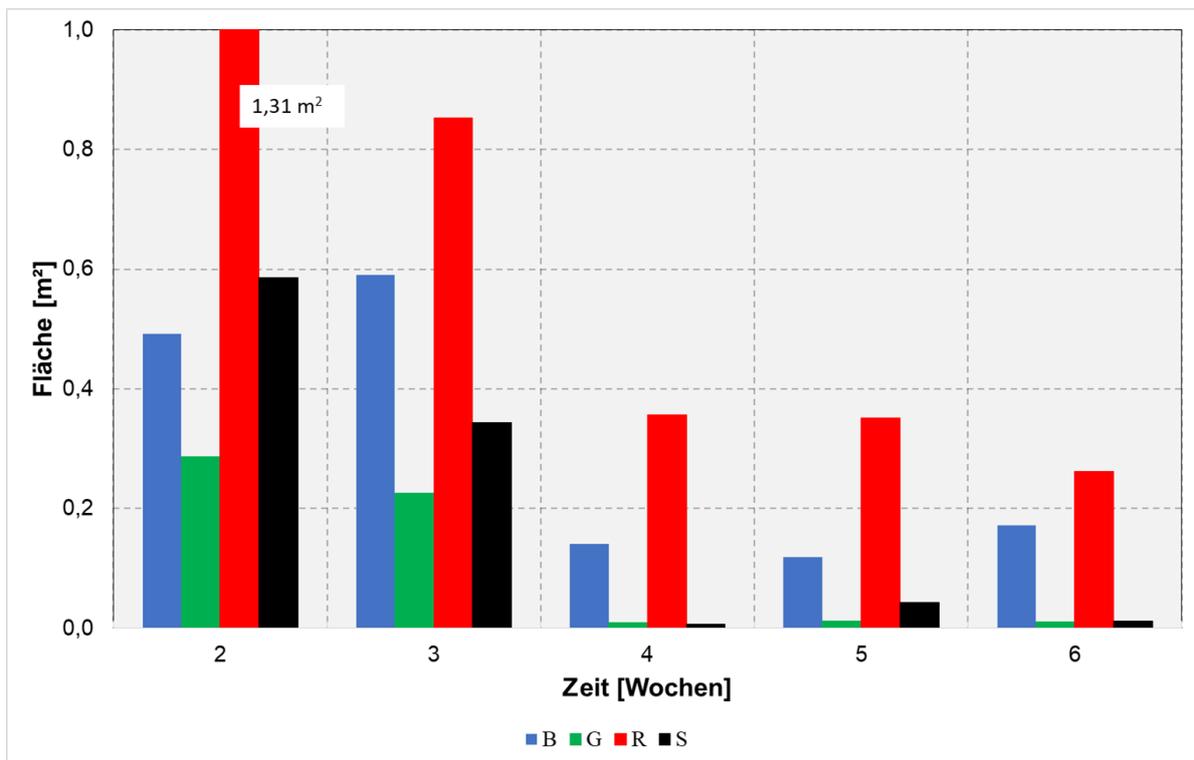


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf der Flächenzahlen der ausgelesenen BAK-Makropartikel (Einfachbestimmungen in Wochen 2 und 4; Mittelwert aus Doppelbestimmungen in Wochen 3, 5 und 6; Tabelle 18, Anlage)

Die in Abbildung 18 dargestellten Flächenzahlen können nicht direkt mit den Ausgangsflächen der Beutel verglichen werden, da bei den originalen Beuteln die zweidimensionalen (2-D) und einlagigen Ausgangsflächen bestimmt wurden. Bei den BAK-Proben aus der Kompostierung gab es auch oft mehrlagige Agglomerate (z.B. Knoten, Zugbänder) sowie eine dreidimensionale (3-D) Verknitterung. Ein weiterer Grund sind Überlappungen und Leerstellen, sowie beim manuellen Auslesen übersehene Fragmente. Diese letztgenannten Gründe werden aber im Vergleich eher als geringere Fehlerquelle gering eingeschätzt.

Zum besseren Vergleich der Chargen wurde dennoch ein Bezug zur Beutel-Ausgangsfläche hergestellt, um den Faktor der unterschiedlichen Beutelgrößen zu berücksichtigen. Die Ausgangsflächen pro Beutel lagen zwischen 0,36 bis 0,58 m² pro Beutel bzw. zwischen 7,2 und 9,7 m² für 20 Beutel pro Netz (Tabelle 12, Anlage). Im Rahmen der BGK-Gütekontrolle (BGK, 2016b) wird die „Aufsichtsfläche“ einer Bilderkennung zur Charakteristik von Fremdstoffen mit Hilfe des Parameters „Flächensumme“ (Kapitel 3.6.3) herangezogen. Analog wurde hier zum Vergleich der Chargen die Kennzahl „Restaufsichtsfläche

der BAK-Makropartikel“ aus den Flächenzahlen der BAK-Makropartikel bezogen auf die Fläche der originalen BAK-Beutelchargen berechnet (Tabelle 18, Anlage). Da die Flächenzahlen der BAK-Makropartikel eine von 3-D auf 2-D vereinfachte Aufsichtsfläche darstellen, ist die reale Restfläche der BAK-Makropartikel größer als die berechnete Restaufsichtsfläche. Der Fehler vergrößert sich hierbei je mehr BAK-Makropartikel im Rottegut verbleiben. Auf dieser Basis kann die auf die BAK-Beutelfläche bezogene reale Restfläche der BAK-Makropartikel wie folgt für die nach 4-6 Wochen entnommenen Netze zusammengefasst werden:

Stärke-Blend-Beutel:

- BAK-Makropartikel-Restflächen der G-Netze: $\geq 0,0-0,2\%$ der BAK-Beutelfläche
- BAK-Makropartikel-Restflächen der S-Netze: $\geq 0,0-1,0\%$ der BAK-Beutelfläche

PLA-Blend-Beutel:

- BAK-Makropartikel-Restflächen der B-Netze: $> 0,3-2,3\%$ der BAK-Beutelfläche
- BAK-Makropartikel-Restflächen der R-Netze: $> 2,8-6,8\%$ der BAK-Beutelfläche

Auch nach Berücksichtigung der initialen BAK-Beutel-Flächen zeigt sich immer noch ein materialabhängiger Trend. Allerdings war der Abstand der BAK-Makropartikel-Restflächen aus den B-Netzen nicht mehr so groß im Vergleich zu den G- und S-Netzen. Die schlechte Abbaubarkeit der R-Netze kristallisierte sich jedoch noch deutlicher heraus.

3.6.1.2 BAK-Makropartikel-Restmasse

Von den manuell aus den Netzen ausgelesenen BAK-Makropartikeln (Kapitel 3.3.2.1) wurden, neben den Flächenzahlen, auch die verbliebenen Restmassen bestimmt. Hierbei kam eine Bestimmungsmethode auf Basis einer Verwiegung der ausgelesenen BAK-Makropartikel zum Einsatz.

Die Partikelmassen nach der Auslese und nach einer Aufbereitung durch Lufttrocknung sowie Reinigung (Kapitel 2.3.2.2) sind in Tabelle 17 (Anlage) aufgeführt. Die BAK-Partikel enthielten nach der mechanischen Reinigung noch Verschmutzungen. Sie wurden daher als „feinverunreinigt“ charakterisiert.

Die Restmasse der luftgetrockneten und feinverunreinigten BAK-Makropartikel wurde auch auf die entsprechenden Ausgangsmassen von 20 BAK-Beuteln pro Netz bezogen (Tabelle 12, Anlage). Der zeitliche Verlauf dieser Kennzahl ist für die verschiedenen BAK-Chargen in Abbildung 19 dargestellt. Die Einzelwerte sind Tabelle 17 (Anlage) zu entnehmen.

Abbildung 19 zeigt, ebenso wie Abbildung 18, dass von den Stärke-Blends (G- und S-Netze) nach 4 Wochen keine oder nur wenige Partikel verblieben. Am Ende der Kompostierung lag die Restmasse der lufttrockenen und feinverunreinigten BAK-Makropartikel bei maximal 6% der initialen BAK-Beutelmasse. Auch bei den PLA-Blend-Beuteln wurden die stärksten Veränderungen wiederum in den ersten 4 Wochen beobachtet. Bei den B-Beuteln flacht die Veränderung nach einem guten anfänglichen Abbau bis erst zum Ende der Kompostierung hin ab.

An den R-Beuteln zeigte sich ein methodisches Problem sehr deutlich. Bei Charge R6 war nach Woche 2 laut Messwert etwa ein Drittel mehr BAK-Material vorhanden als zu Beginn (Tabelle 17, Anlage). Dieser Fehler ist auf besonders starke Verunreinigungen zurückzuführen. Obwohl die BAK-Partikel von groben Verschmutzungen (Abbildung 15) gereinigt wurden, verblieben an den Makropartikeln anhaftende Mikroverschmutzungen. Die manuelle Aufreinigung ist nur bis zu einem gewissen Grad

möglich. Weiterführende Reinigungsmöglichkeiten werden in Kapitel 4 vorgeschlagen. Der Fehler, der durch die Feinverunreinigungen verursacht wird, ist umso größer, je größer die verbleibende BAK-Makropartikelmasse ist. Die realen BAK-Makropartikel-Restmassen fallen also geringer aus und zwar insbesondere bei den R- und den B-Beuteln.

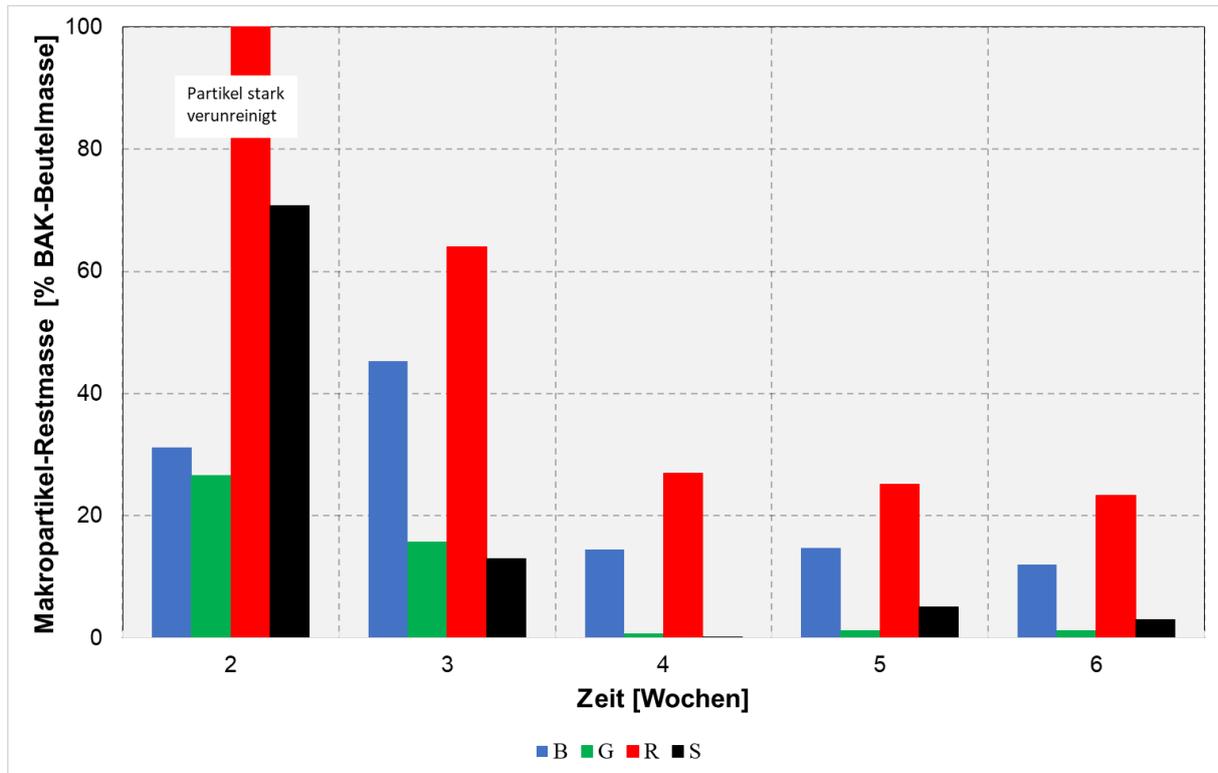


Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf der feinverunreinigten der BAK-Makropartikel-Restmassen (Einfachbestimmungen in Wochen 2 und 4; Mittelwert aus Doppelbestimmungen in Wochen 3, 5 und 6; Tabelle 17, Anlage)

Auf Basis von Tabelle 17 (Anlage) kann die auf die reale BAK-Beutelmasse bezogene Restmasse wie folgt für die nach 4-6 Wochen entnommenen Netze zusammengefasst werden:

PLA-Blend-Beutel:

- BAK-Makropartikel-Restmasse der B-Netze: <4-26% der BAK-Beutelmasse
- BAK-Makropartikel-Restmasse der R-Netze: <17-34% der BAK-Beutelmasse

Stärke-Blend-Beutel:

- BAK-Makropartikel-Restmasse der G-Netze: ≤0-2,5% der BAK-Beutelmasse
- BAK-Makropartikel-Restmasse der S-Netze: ≤0- 9% der BAK-Beutelmasse

3.6.2 BAK-Meso- und Mikropartikel

3.6.2.1 Partikelanzahl und Flächenzahl

Für die ausgelesenen BAK-Meso- (2-8 mm) und Mikropartikel (<1 mm, 1-2 mm) (Kapitel 2.3.1.3) wurden ebenfalls Flächenzahlen (Kapitel 2.3.2.2.4) bestimmt, jedoch anders als für die Makropartikel. Die Ergebnisse der Doppelbestimmungen für die Anzahl der aus repräsentativen Stichproben ausgelesenen BAK-Partikel pro Siebfraction, sind in den Tabelle 19 bis 22 (Anlage) aufgeführt. Die Auslesen in Durchgang 1 und 2 wurden jeweils von unterschiedlichen Personen durchgeführt. Sie lagen eng beieinander. Die Anzahl der ausgelesenen Partikel wurde auf eine einheitliche Rottegut-

Siefractionsmasse (100 g FM) umgerechnet. Die Masse der jeweils berücksichtigten Rottegut-Siefractions sind Tabelle 16 (Anlage) zu entnehmen. Die Abbildung 21 zeigen die so detektierte BAK-Partikelanzahl an Mikro- und Mesopartikeln in den einzelnen Rottegut-Siefractions. Die Partikelanzahl wurde in eine Flächenzahl (Kapitel 2.3.2.2.4) unter Berücksichtigung der Rottegut-Siefractions (Tabelle 16, Anlage) auf ein gesamtes Netz hochgerechnet. Tabelle 24 (Anlage) gibt die resultierenden Flächenzahlen für die BAK-Mikro- und Mesopartikel, die sich nach Netzausbau noch im Netz befunden haben an. Abbildung 20 und Abbildung 21 stellen die Ergebnisse vergleichend für die unterschiedlichen BAK-Chargen dar.

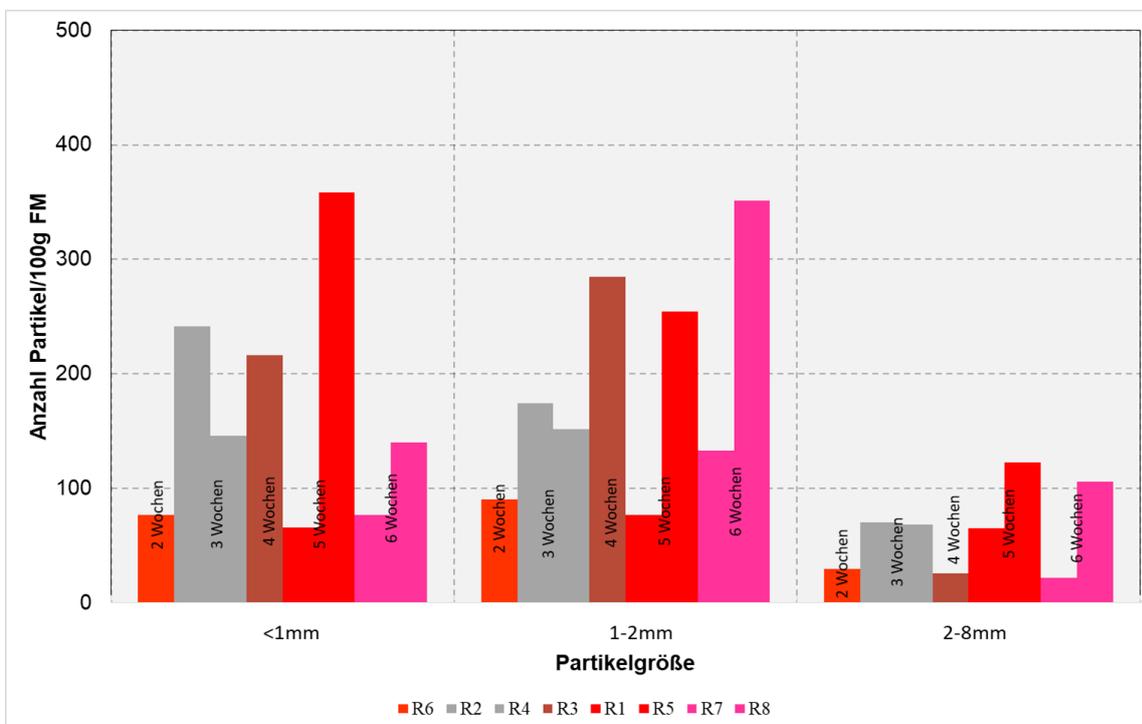
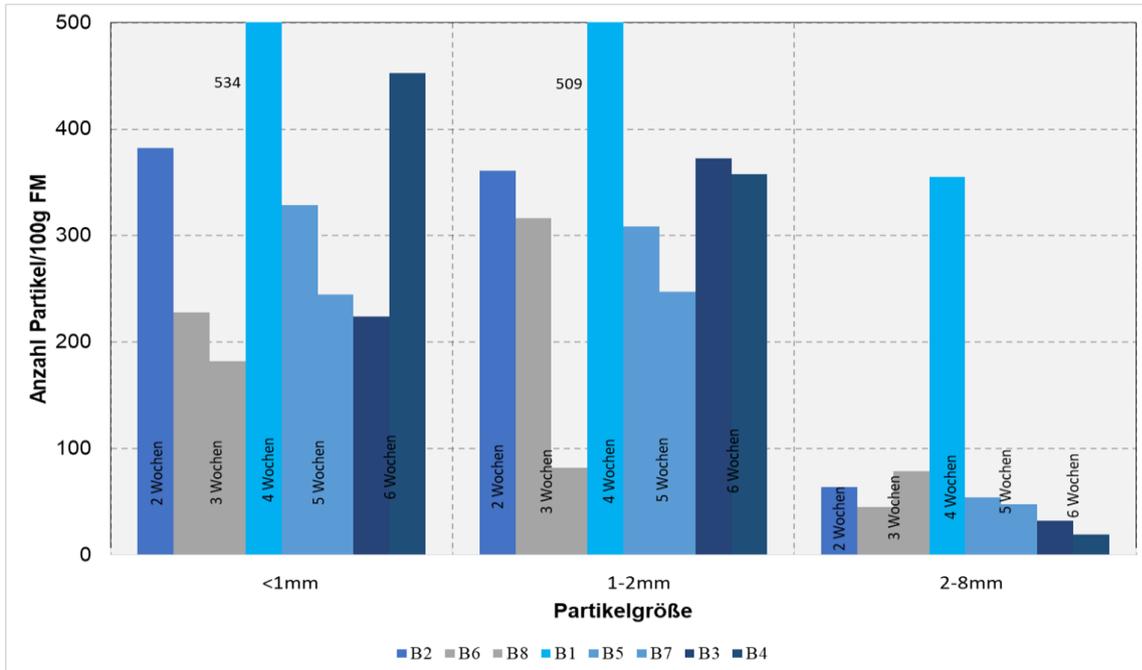


Abbildung 20: Anzahl an PLA-Blend-Mikro- und Mesopartikeln in den Rottegutsiefractions (Einfachbestimmungen in Wochen 2 und 4; Mittelwert aus Doppelbestimmungen in Wochen 3, 5 und 6; Tabelle 17, Anlage)

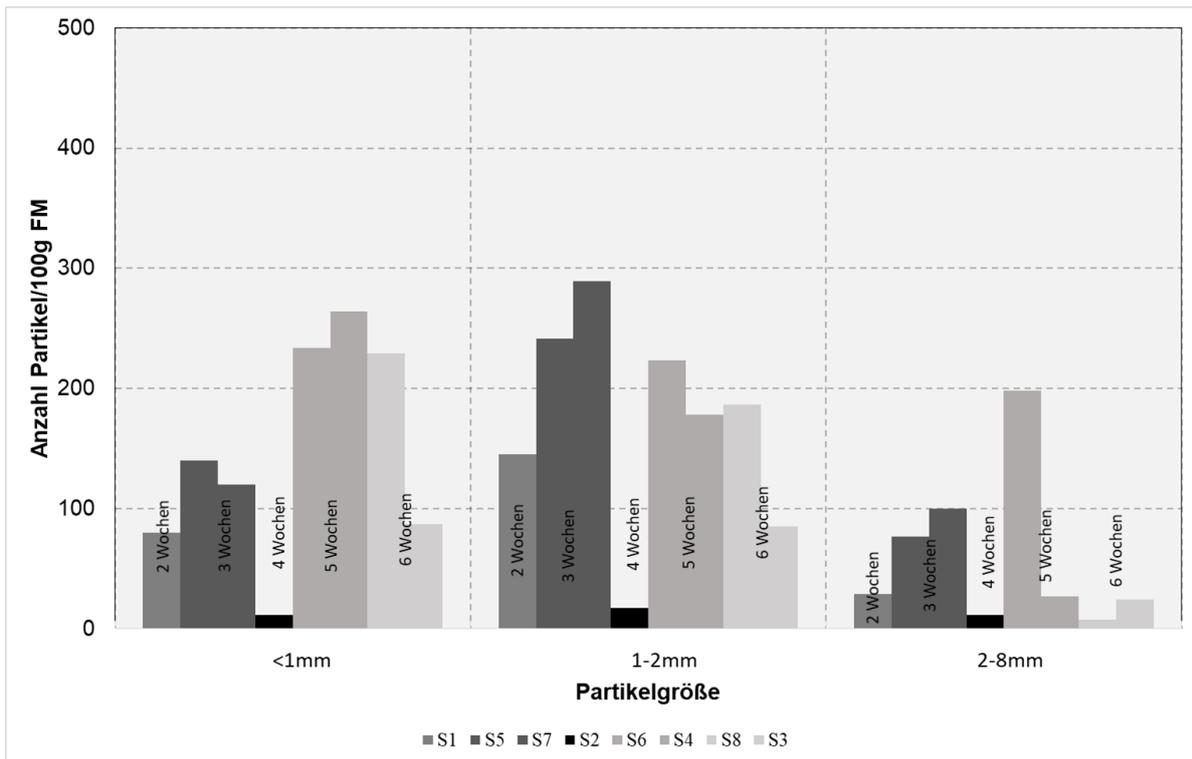
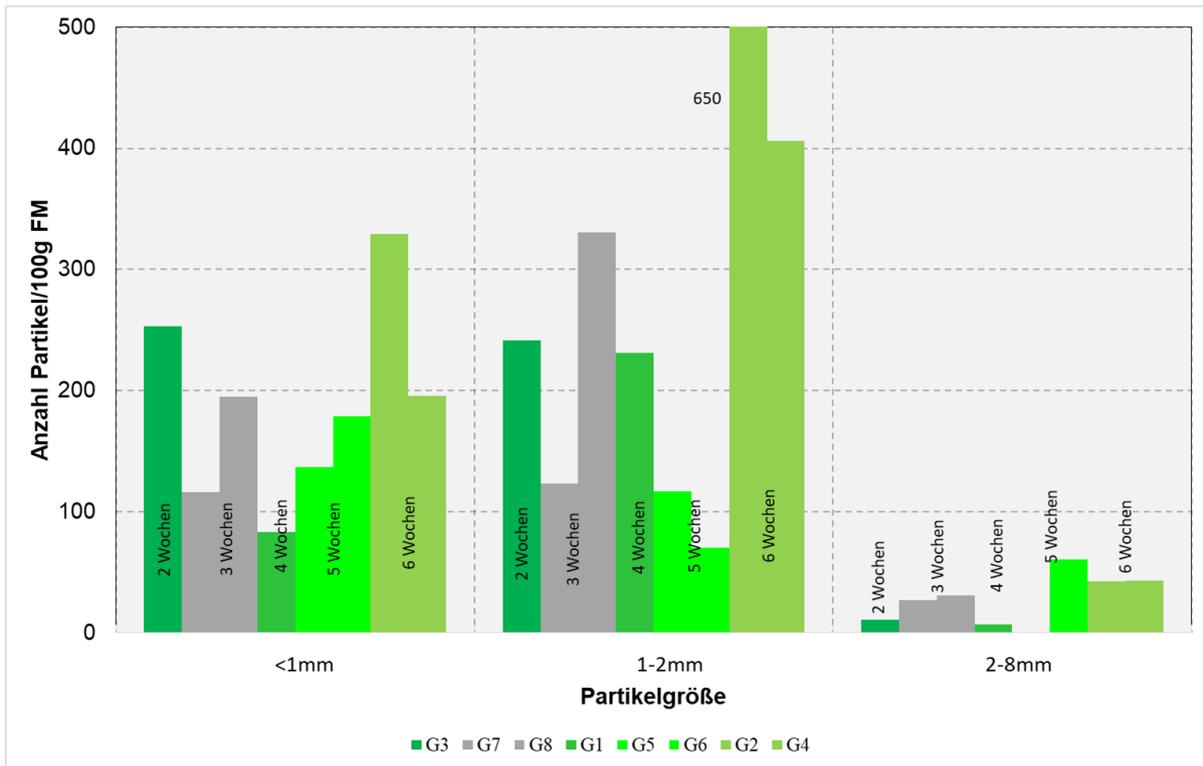


Abbildung 21: Anzahl an Stärke-Blend-Mikro- und Mesopartikeln in den Rottegut-siebfraktionen (Einfachbestimmungen in Wochen 2 und 4; Mittelwert aus Doppelbestimmungen in Wochen 3, 5 und 6; Tabelle 17, Anlage)

Die Anzahl der BAK-Mikropartikel pro 100 g Rottegut-Siebfraktion lag bei den PLA-Blends (B- und R-Netze) zumeist, mit wenigen Ausnahmen, zwischen 100 und 400 und bei den Stärke-Blends (R- und S-Netze) zwischen 50 und 300. Die Anzahl der BAK-Mesopartikel war im Vergleich zu den Mikropartikeln relativ gering. Hier lag die Anzahl pro 100 g selten über 100. Bei Proben, die einen sehr hohen bzw.

niedrigen Gehalt an Partikeln in der 1-2 mm Fraktion aufwiesen war auch tendenziell ein höherer bzw. geringerer Anteil in der <1 mm Fraktion zu erkennen.

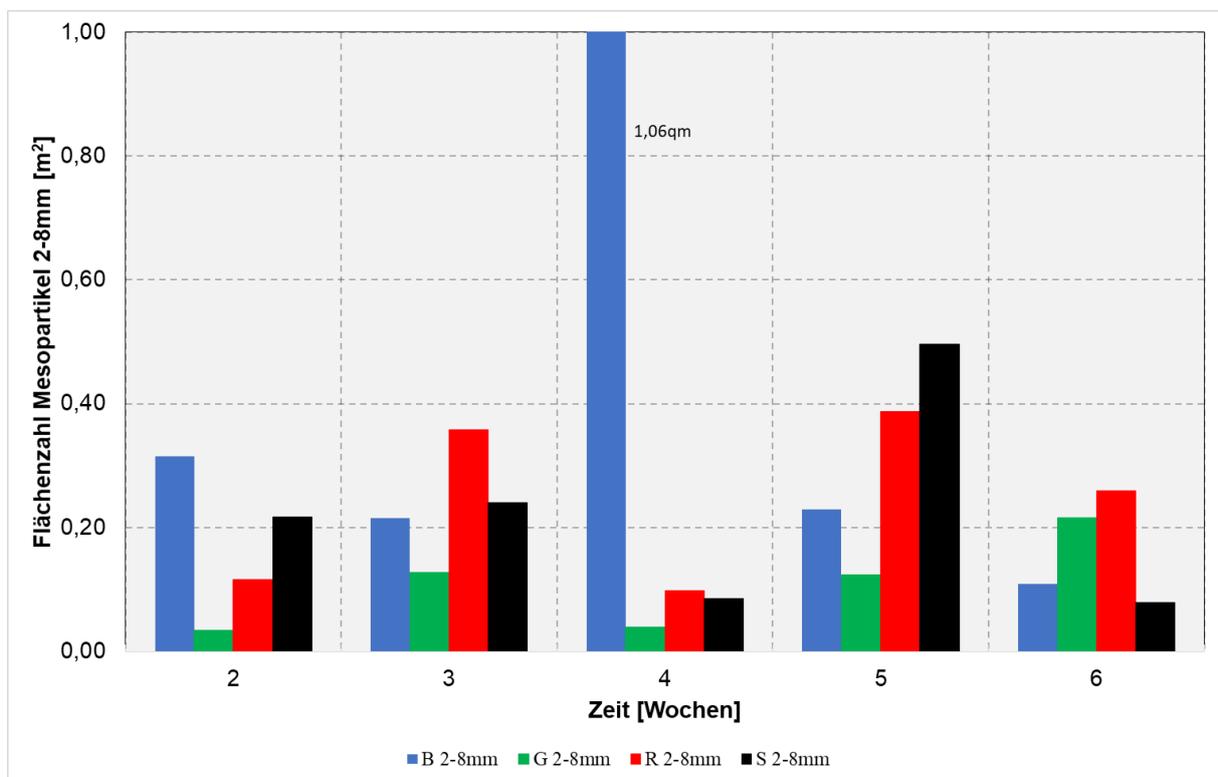
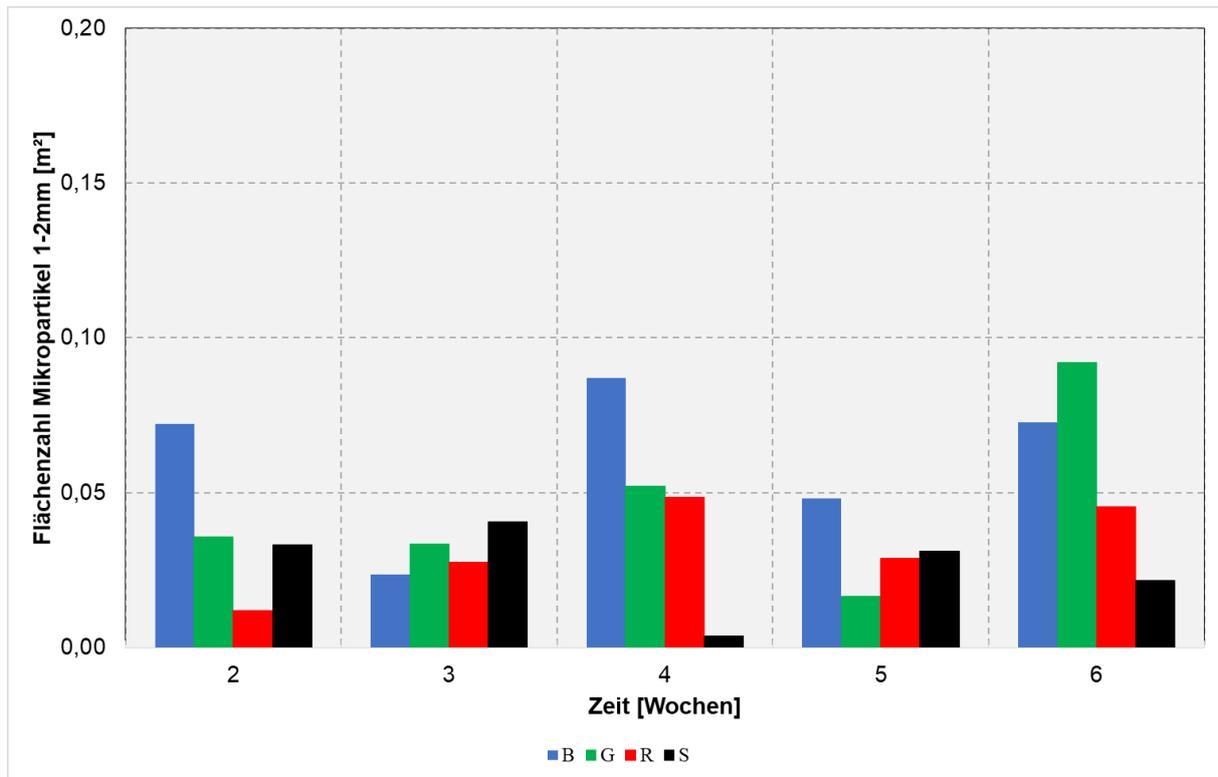


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Flächenzahlen von Mikro- und Mesopartikeln pro Netz (Einfachbestimmungen in Wochen 2 und 4; Mittelwert aus Doppelbestimmungen in Wochen 3, 5 und 6; Tabelle 23, Anlage)

Auffällig waren die Partikel in den Netzen B1 (Ausbau nach 4 Wochen) und G2 (Ausbau nach 6 Wochen). Bei B1 lagen sowohl Mikro- als auch Mesopartikel besonders hoch. Hier könnte der

besonders geringe Ausbauwassergehalt des Rottegutes von 17% FM eine Erklärung bieten. Bei G2 war der Ausbauwassergehalt mit 37% FM unauffällig. Jedoch zeigt Abbildung 12 besonderes hohe Masseverluste der Netzmassen bis Woche 4, die auf Austrocknung zurückgeführt werden können. Die folgende Befeuchtung stellte einen akzeptablen Ausbauwassergehalt ein. Sie wirkte sich jedoch nicht weitergehend auf den BAK-Abbau aus. Die Unterschiede insgesamt können nicht sicher mit Unterschieden bei bestimmten Parametern (Wassergehalt, Temperatur, Behandlungsdauer, Materialtyp) erklärt werden, sondern sie sind vermutlich eher in der Vielfalt an Prozessvariablen begründet.

Bei dem Vergleich der Flächenzahlen (Abbildung 22) lagen im Durchschnitt aller Chargen die Flächenzahlen von Mesopartikeln um das 5-fache über denen der Mikropartikel. Die individuelle Schwankungsbreite war jedoch groß. Der Vergleich der Mikropartikel untereinander ergab ein klares Ergebnis. Hier lagen die Flächenzahlen bei allen Partikeln in der Größenklasse 1-2 mm eindeutig über denen der Größenklasse <1 mm (Tabelle 24, Anlage). Im Durchschnitt betrug die Flächenzahl der sehr kleinen Partikel nur etwa ein Viertel von denen der größeren Mikropartikel. Die Fraktion <1 mm wird als vernachlässigbar klein eingeschätzt und daher im Nachfolgenden nicht weiterführend betrachtet. Eine Unsicherheit besteht jedoch in der Tatsache, dass die manuelle Auslese mittels Lupe und Pinzette bei den sehr kleinen Fraktionen Grenzen hat. Bei Cabrera (2020) lag diese bei 0,5 mm. Ggf. vorhandene kleinere Partikel wurden somit nicht berücksichtigt. Die Flächenzahl-Methode für Mikro- und Mesopartikel insgesamt erlaubt einen guten Vergleich der unterschiedlichen BAK-Chargen. Sie hat aber Grenzen in Bezug auf die genauen BAK-Flächen, die am Ende der Kompostierung zurück bleiben, da die BAK-Partikel im Allgemeinen unförmig sind, in den Berechnungen hier jedoch von einer Kreisform mit definiertem Durchmesser (Kapitel 2.3.2.2.4) ausgegangen wurde. Auf Basis von Tabelle 23 (Anlage) kann die Restfläche an BAK- Mikro- und Mesopartikeln wie folgt für die nach 4-6 Wochen entnommenen Netze zusammengefasst werden:

Stärke-Blend-Beutel:

- (1) BAK-Meso- und Mikropartikel-Restflächen der G-Netze: $\approx 0,2-3,9\%$ der BAK-Beutelfläche
- (2) BAK-Meso- und Mikropartikel-Restflächen der S-Netze: $\approx 0,9-10,7\%$ der BAK-Beutelfläche

PLA-Blend-Beutel:

- (3) BAK Meso- und Mikropartikel-Restflächen der B-Netze: $\approx 2,1-12,9\%$ der BAK-Beutelfläche
- (4) BAK-Meso- und Mikropartikel-Restflächen der R-Netze: $\approx 2,2-7,9\%$ der BAK-Beutelfläche

3.6.2.2 Restmasse

Auf eine direkte Massebestimmung der Partikel wurde aufgrund der Problematik der Verunreinigungen, der sehr geringen Partikelanzahl pro Probe und der Kleinheit der Partikel verzichtet. Eine höhere Genauigkeit versprach hier die Bestimmung über die Flächenzahlen. Im Gegensatz zu der analogen Restmassebestimmung bei den BAK-Makropartikeln (Kapitel 3.6.1.2, Methode 2) können die BAK-Meso- und Mikropartikel nicht als 3-D- sondern als 2-D-Objekte charakterisiert werden. Die Restmasse der BAK-Meso- und Mikropartikel wurde mit Hilfe der Dichten und Dicken der originalen Beuteln (Tabelle 3) aus den Flächenzahlen (Tabelle 24, Anlage) berechnet. Um die unterschiedlichen Startmassen der BAK-Beutel (Tabelle 3) auszugleichen, wurden die Restmassen wiederum auf die BAK-Beutelmasse bezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 26 (Anlage) zusammengestellt.

Beim Vergleich der Restmassen ergab sich naturgemäß der gleiche Trend wie bei den Flächenzahlen, wiederum mit einem deutlichen Schwerpunkt bei den Mesopartikeln. Der durchschnittlich Mittelwert

über alle Netze und Zeiten lag bei den Mikropartikeln bei 0,1% (<1 mm) bzw. 0,3% (1-2 mm) und bei den Mesopartikeln bei 2,9% des initialen BAK-Beutelanteiles (Tabelle 26).

Die nach Netzausbau verbleibenden Mikro- und Mesopartikelmassenanteile sind als Maximalwerte einzuordnen, denn die Materialdichten der originalen BAK-Beutel, die für die Berechnung herangezogen wurden, und die der realen BAK-Restpartikel sind höchstwahrscheinlich nicht identisch. Es muss davon ausgegangen werden, dass bei der Kompostierung Bestandteile der BAK-Folien entfernt werden, wodurch sich die Dichte und damit die Mikro- und Mesopartikelrestmasse reduziert.

Die BAK-Mikro- und Mesopartikel-Restmassen für die nach 4-6 Wochen entnommenen Netze können wie folgt zusammengefasst werden:

Stärke-Blend-Beutel:

- BAK-Meso- und Mikropartikel-Restmasse der G-Netze: <0,2-4,0% der BAK-Beutelmasse
- BAK-Meso- und Mikropartikel-Restmasse der S-Netze: <0,9-10,7% der BAK-Beutelmasse

PLA-Blend-Beutel:

- BAK Meso- und Mikropartikel-Restmasse der B-Netze: <2,1-13,0% der BAK-Beutelmasse
- BAK-Meso- und Mikropartikel-Restmasse der R-Netze: <2,2-7,9% der BAK-Beutelmasse

3.6.3 Spezifische Flächensumme von BAK-Makro- und Mesopartikeln

In der RAL-Gütesicherung von Komposten wird die „Flächensumme“ als Parameter zur Charakteristik von Kompostfremdstoffen angegeben. Als Fremdstoffe werden hierbei alle unerwünschten Stoffe bezeichnet. Dies sind Glas, Kunststoffe, Metalle, Gummi, sowie Knochenpartikel und Verbundstoffe. BAKs gelten ebenfalls als Fremdstoffe, soweit sie als optisch auffällige unverrottete Partikel ausgelesen werden können (BGK, 2016b). Die Bestimmung der Flächensumme nach BGK (2016b) erfolgt als Aufsichtflächensumme von ausgelesenen Fremdstoffen >2 mm. Bis zu 100 mL Kompost werden auf einer Fläche vereinzelt und Fremdstoffe mit einer Pinzette herausgelesen. Die sich in der Aufsicht ergebende Fläche der Fremdstoffe wird mittels eines Bildauswertungssystems erfasst. Laut BioabfV (2022) darf der Anteil an Fremdstoffen, insbesondere Glas, Kunststoff und Metall (>2 mm) 0,5% der Komposttrockenmasse nicht überschreiten. Die Flächensumme ist kein von der BioabfV (2022) geforderter Parameter.

Zur Orientierung, inwieweit BAK-Partikel im Kompost ein Problem für die Kompost-Zertifizierung über den Parameter „Flächensumme“ darstellen können, wurde hier die „spezifische Flächensumme“ bestimmt. Diese unterscheidet sich von der Flächensumme, denn es wurden nur die BAK-Partikel, nicht jedoch andere Fremdstoffarten berücksichtigt. Es kann nicht vollkommen ausgeschlossen werden, dass im Einzelfall konventionelle Kunststoffpartikel mitgezählt wurden. Dieser Fehler wird jedoch als vernachlässigbar eingeschätzt, da konventionelle Kunststofffolien vor Versuchsbeginn zum großen Teil manuell entfernt wurden und da die BAK-Partikel optisch zumeist unterscheidbar waren.

Die spezifischen Flächensummen wurden nur für die BAK-Makropartikel und die BAK-Mesopartikel gebildet, da nur diese im Erfassungsbereich der BGK-Flächensumme mit Partikeln >2 mm liegen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 23 dargestellt. Die Einzelwerte für die spezifischen Flächensummen der BAK-Makropartikel sind Tabelle 18 (Anlage) und der BAK-Mesopartikel Tabelle 23 (Anlage) zu entnehmen. Für die Berechnung wurden die Flächenzahlen der BAK-Mesopartikel in Tabelle 24 (Anlage) und der MAK-Makropartikel in Tabelle 18 (Anlage) herangezogen. Die korrespondierende Rottegutvolumina gibt Tabelle 15 (Anlage) an.

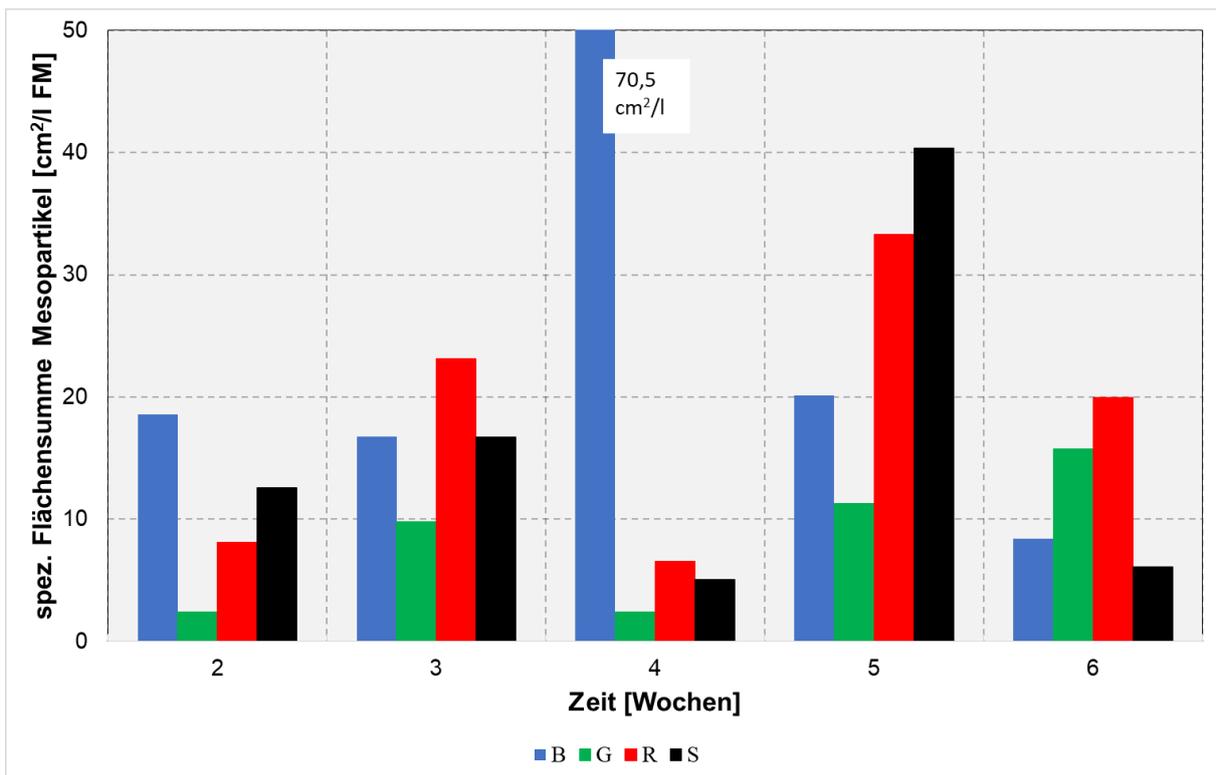
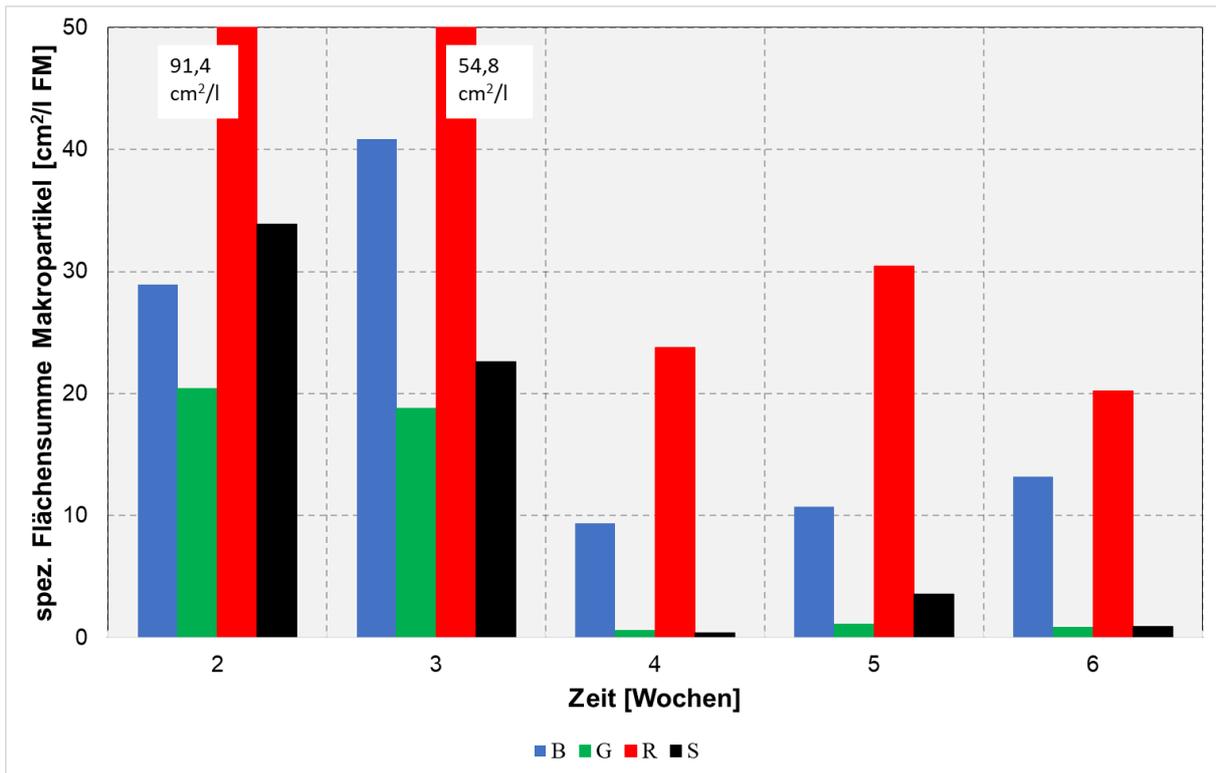


Abbildung 23: Spezifische Flächensummen für BAK-Makro- und BAK-Mesopartikel (Einfachbestimmungen in Wochen 2 und 4; Mittelwert aus Doppelbestimmungen in Wochen 3, 5 und 6; Tabelle 17, Tabelle 23, Anlage)

Der mittels Flächensumme bestimmte Verunreinigungsgrad darf für eine Kompostzertifizierung maximal 15 cm²/L für Frisch- und Fertigungskomposte sowie 10 cm²/L für Substratkomposte betragen (BGK, 2017, 2018). Für die Beurteilung ist zudem die Körnigkeit des Kompostes maßgebend, welche von der BGK (2004) wie folgt kategorisiert wird: Feinkompost – 0-12 mm, Mittelkompost – 0-25 mm,

Grobkompost – 0-40 mm. Je nach Siebschnitt würde ein Teil der BAK-Makropartikel mitgezählt, oder auch nicht. Sofern vernachlässigt wird, dass sich BAK-Makropartikel durch mechanische Beanspruchung auch in Mesopartikel umwandeln können, sollen die spezifischen BAK-Flächensummen vereinfachend für zwei Szenarien betrachtet werden. In beiden wird davon ausgegangen, dass keine Hintergrundbelastung durch weitere Fremdstoffe vorhanden ist und dass der Einsatz als Frisch- oder Fertigungskompost angestrebt wird:

Szenario 1: BAK-Makroplastik wird durch Siebung entfernt:

Es werden nur die spezifischen Flächensummen der BAK-Mesopartikel bewertet (Abbildung 23, unten). Bei den Stärke-Blend-Beuteln könnte der BGK-Grenzwert für die Mehrzahl der Chargen eingehalten werden – bei den G-Beuteln zu allen Zeitpunkten mit Ausnahme von Woche 6 und bei den S-Beuteln an 3 der 5 Zeitpunkte. Bei den PLA-Blend-Beuteln konnten nur vereinzelt Chargen die BGK-Anforderungen erfüllen - bei den B-Beuteln an einem Entnahmezeitpunkt und bei den R-Beuteln an 2 Zeitpunkten.

Szenario 2: BAK-Makroplastik wird nicht durch Siebung entfernt:

In diesem Szenario werden Meso- und Makropartikel zusammen bewertet (Abbildung 23, Summe oben und unten). Keiner der PLA-Blend-Chargen erfüllt die BGK-Anforderungen. Bei den Stärke-Blends werden die Grenzwerte bei den nach Woche 4 und 6 entnommenen S-Netzen und bei den nach Woche 4 und 5 entnommenen G-Netzen eingehalten.

Es ist also prinzipiell möglich, die Anforderungen der BGK bezüglich der Flächensumme auch bei Verwendung von BAK-Abfallsammelbeuteln einzuhalten. Eine fallspezifische Einschätzung kann jedoch nur getroffen werden, wenn neben dem BAK-Beuteltyp und den Rottebedingungen weitere Faktoren berücksichtigt werden:

- der Anteil der Haushalte die BAK-Beutel verwenden
- der Anteil von häuslichen Küchenabfällen zu Grünabfällen und
- die Hintergrundbelastung im Kompost mit weiteren Fremdstoffen

Die BGK-Jahreszeugnisse der SWN-Kompostierungsanlage geben folgende Flächensummen an: 4,2 cm² pro L Frischkompost (SWN, 2021c) und 3,2 cm² pro L Fertigungskompost (SWN, 2021d). Die Ausgangsstoffe der Kompostierung bestanden zu 80% aus häuslichen Bioabfällen und zu 20% aus pflanzlichen Abfällen aus dem Landschafts- und Gartenbau. Die pflanzlichen Abfälle enthalten keine BAK-Beutel. Bei den häuslichen Bioabfällen ist der Anteil der Grünabfälle aus Privatgärten frei von BAK-Beuteln. Inwieweit BAK-Beutel von den Bürgern verwendet wurden ist unbekannt. Ihr Einsatz ist jedoch erfahrungsgemäß als bislang eher sehr gering einzuschätzen. Die angegebenen Flächensummen können exemplarisch als Hintergrundbelastung herangezogen werden. Für jeden Anwendungsfall ist sie jedoch spezifisch zu beurteilen. Die Gesamt-Flächensumme ergibt sich somit aus der Hintergrundbelastung des Komposts mit verschiedenen Fremdstoffen sowie dem Anteil an eingesetzten BAK-Beuteln und den daraus resultierenden BAK-Meso- und Makropartikeln bei der Kompostierung.

3.6.4 Abbaugrade nach Fläche und nach Masse

Die Bestimmung von Abbaugraden erfolgte sowohl auf Basis der BAK-Restflächen als auch auf Basis der BAK-Restmassen. Die jeweiligen verbleibenden kumulativen Restanteile von BAK-Mikro-, Meso- und Makropartikeln bezogen auf die originalen BAK-Beutel wurden bestimmt und damit Abbaugrade nach Fläche und nach Masse jeweils als Differenz zu 100% ermittelt.

(1) Abbaugrade nach Fläche

Der Ausgangspunkt der Abbaugradbestimmung nach Fläche sind die BAK-Restflächen (Restflächen Mikro- und Mesopartikel: Tabelle 23, Anlage; Restaufsichtsflächen Makropartikel: Tabelle 18, Anlage). Ein direkter Vergleich der Restflächen von Mikro- und Mesopartikeln mit den Restaufsichtsflächen von Makropartikeln kann nicht vorgenommen werden, da die Bestimmungsmethoden unterschiedlich waren. Durch die 3-Dimensionalität der Makropartikel kann davon ausgegangen werden, dass die realen Makropartikel-Restflächen größer sind, als die angegebenen Restaufsichtsflächen (Kapitel 3.6.1.1). Bei den Mikro- und Mesopartikeln liegt die wesentliche Unsicherheit in der Annahme kreisförmiger Partikel (Kapitel 3.6.2.1). In der Ergebniszusammenstellung von Tabelle 5 wurden die Unsicherheiten über die Vorzeichen berücksichtigt.

Um zu Näherungswerten für die Abbaugrade nach Fläche zu kommen, wurden trotz der unterschiedlichen Methoden alle Partikelfraktionen gemeinsam betrachtet: Es wurden kumulative Restflächen ermittelt (Tabelle 25, Anlage). Da die Unsicherheit bei den Makropartikeln größer eingeschätzt wird als bei den Mikro- und Mesopartikeln, sind die in Tabelle 5 zusammengefassten kumulativen Restflächen als Minimalwerte zu verstehen.

Tabelle 5: Restflächen von BAK-Mikro-, Meso- und Makropartikeln im Überblick (Spannweiten mit Mittelwert über alle untersuchten Kompostierungszeitpunkte)

Partikeltyp	Restflächen			
	B	G	R	S
	(% BAK-Beutelfläche)			
Mikopartikel (<1 mm)	≈0,1- <u>0,2</u> -0,5	≈0,0-0,1-0,1	≈0,0- <u>0,1</u> -0,3	≈0,0- <u>0,1</u> -0,1
Mikopartikel (1-2 mm)	≈0,1- <u>0,6</u> -0,9	≈0,1-0,5-0,9	≈0,2- <u>0,5</u> -0,8	≈0,2- <u>0,3</u> -0,7
Mesopartikel (2-8 mm)	≈1,0- <u>3,4</u> -11,5	≈0,0- <u>1,3</u> -2,9	≈1,4- <u>3,9</u> -6,9	≈0,4- <u>2,9</u> -10,2
Makropartikel (>8 mm)	>0,3- <u>3,2</u> -10,9	≥0,0- <u>1,0</u> -4,6	>2,8- <u>8,0</u> -18,2	≥0,0- <u>2,1</u> -7,0
Gesamt-Restflächen	>2,8-<u>7,4</u>-14,4	>0,2-<u>2,9</u>-5,9	>5,1-<u>12,4</u>-20,0	>1,0-<u>5,0</u>-10,7

Einzelwerte für: Mikro- und Mesopartikel, Tabelle 23 (Anlage); Makropartikel Tabelle 18 (Anlage)

Kumulative Werte für Mikro-, Meso- und Makropartikel: Tabelle 25 (Anlage)

Die auf Basis der kumulativen Restflächen erhaltenen Abbaugrade nach Fläche sind in Tabelle 25 (Anlage) gelistet. Sie sind zudem in Abbildung 24: Maximale BAK-Abbaugrade nach Fläche für die unterschiedlichen Entnahmezeitpunkte und BAK-Chargen dargestellt. Durch die vorhergehend beschriebenen Unsicherheiten sind die Werte als „maximaler Abbaugrad nach Fläche“ zu verstehen. Die realen Abbaugrade nach Fläche werden kleiner ausfallen, insbesondere bei den niedrigen Werten. Ein Vergleich der Mittelwerte maximalen Abbaugrade nach Fläche zu unterschiedlichen Kompostierungszeitpunkten (Wochen 2 und 3; Wochen 4, 5 und 6) zeigt Abbildung 26.

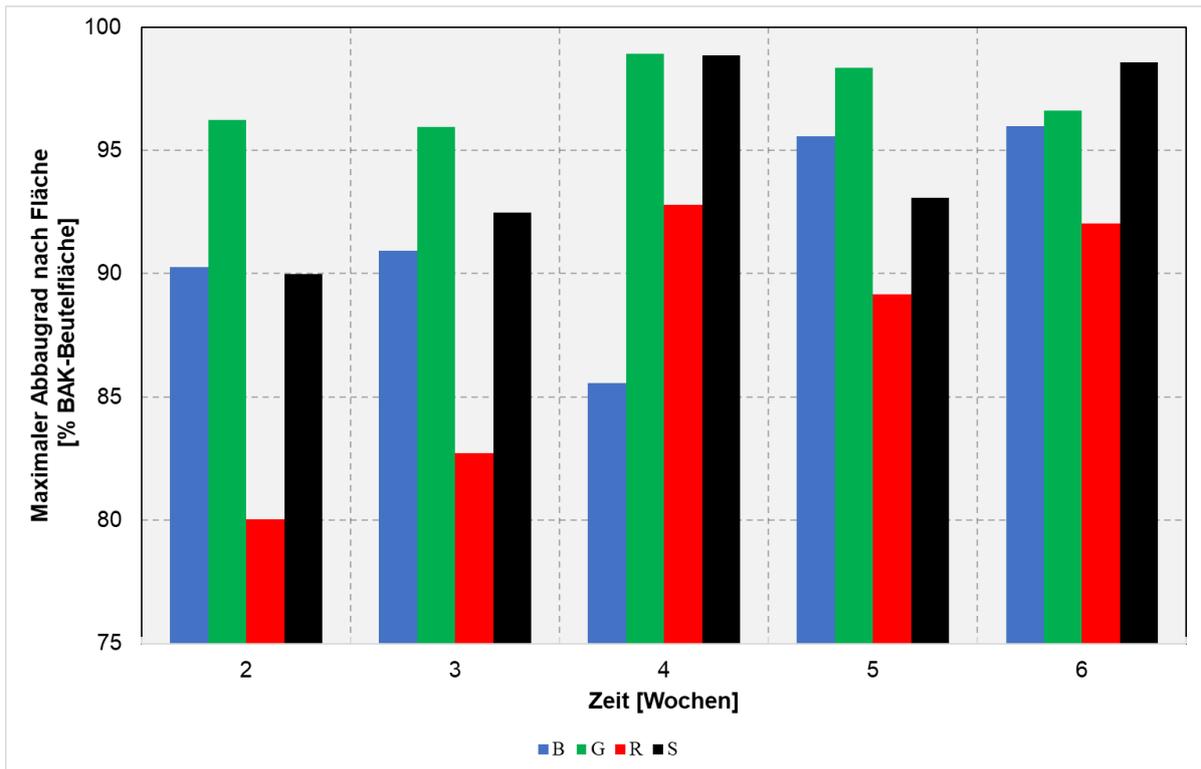


Abbildung 24: Maximale BAK-Abbaugrade nach Fläche nach Charge und Zeit
(Einfachbestimmungen in Wochen 2 und 4; Mittelwert aus Doppelbestimmungen in Wochen 3, 5 und 6, Tabelle 25, Anlage)

(2) Abbaugrade nach Masse

Der Ausgangspunkt der Abbaugradbestimmung nach Masse sind die BAK-Restmassen. BAK-Restmassen wurden direkt auf Basis einer Verwiegung bestimmt (BAK-Makropartikel, Kapitel 3.6.1.2, Tabelle 17, Anlage). Darüber hinaus wurden weitere BAK-Restmassen aus den Restflächen (Mikro- und Mesopartikel, Kapitel 3.6.2.2, Tabelle 23, Anlage) berechnet. Für die Berechnung wurden jeweils die in Tabelle 3 gelisteten Dicken und Dichten der originalen Beutel herangezogen. Die so erhaltenen Restmassen sind in Tabelle 26 (Anlage) bezogen auf den initialen BAK-Beutelmasseanteil gelistet. Bei der Restmasse-Bestimmung auf Basis Verwiegung von BAK-Makropartikeln liegt die Unsicherheit in den Verunreinigungen, die tendenziell zu zu hohen Restmassen führt. Bei den Berechnungen der Mikro- und Mesopartikelmassen gehen die vorhergehend beschriebenen Unsicherheiten der Flächenbestimmungen ein. Zudem gibt es eine zusätzliche Unsicherheit aufgrund der verwendeten Dichte. Diese entstammte den initialen Beuteln. Die Dichte der BAK-Reste dürfte aufgrund von Materialverlusten jedoch geringer ausfallen (Kapitel 3.6.1.2, 3.6.2.1) und damit auch die BAK-Restmasse. Hier wird also von einer Unterschätzung der Restmassen ausgegangen. In der Ergebniszusammenstellung von Tabelle 6 wurden die jeweiligen Unsicherheiten wiederum über die Vorzeichen berücksichtigt.

Um zu Näherungswerten für die Abbaugrade nach Masse zu kommen, wurden die Partikelfractionen wiederum gemeinsam betrachtet. Die so ermittelten kumulativen Restmassen und die daraus resultierenden Abbaugrade sind in Tabelle 25 (Anlage) zusammengestellt. Die in Tabelle 5 angegebenen kumulativen Restflächen sind als Minimalwerte zu verstehen.

Tabelle 6: Restmassen von BAK-Mikro-, Meso- und Makropartikeln bei verschiedenen BAK-Beuteln (Spannweiten mit Mittelwert über alle untersuchten Kompostierungszeitpunkte; mit Angabe, ob es sich um Minimal- oder Maximalwerte handelt)

Partikeltyp	Restmassen			
	B	G	R	S
	(% BAK-Beutelfläche)			
Mikopartikel (<1 mm)	<0,1- <u>0,2</u> -0,5	≤0,0- <u>0,1</u> -0,1	≤0,0- <u>0,1</u> -0,3	≤0,0- <u>0,1</u> -0,1
Mikopartikel (1-2 mm)	<0,1- <u>0,6</u> -0,9	<0,1- <u>0,5</u> -1,0	<0,2- <u>0,5</u> -0,9	≤0,0- <u>0,3</u> -0,7
Mesopartikel (2-8 mm)	<1,0- <u>3,4</u> -11,5	≤0,0- <u>1,3</u> -2,9	<1,4- <u>4,1</u> -7,2	<0,5- <u>2,9</u> -10,2
Makropartikel (>8 mm)	<4- <u>24</u> -72	≤0- <u>8</u> -29	<18- <u>36</u> -72	≤0- <u>14</u> -71
Gesamt-Restmassen	<6,4-<u>28</u>-73,8	<0,3-<u>9,9</u>-30,3	<20,8-<u>40,9</u>-77,9	<1,3-<u>17,4</u>-73,8

Einzelwerte für: Mikro- und Mesopartikel: Tabelle 26 (Anlage); Einzelwerte für: Makropartikel nach Verwiegung, Tabelle 17 (Anlage); Kumulative Werte für Mikro- und Mesopartikel nach Beuteldichte und Makropartikel nach Verwiegung: Tabelle 25 (Anlage)

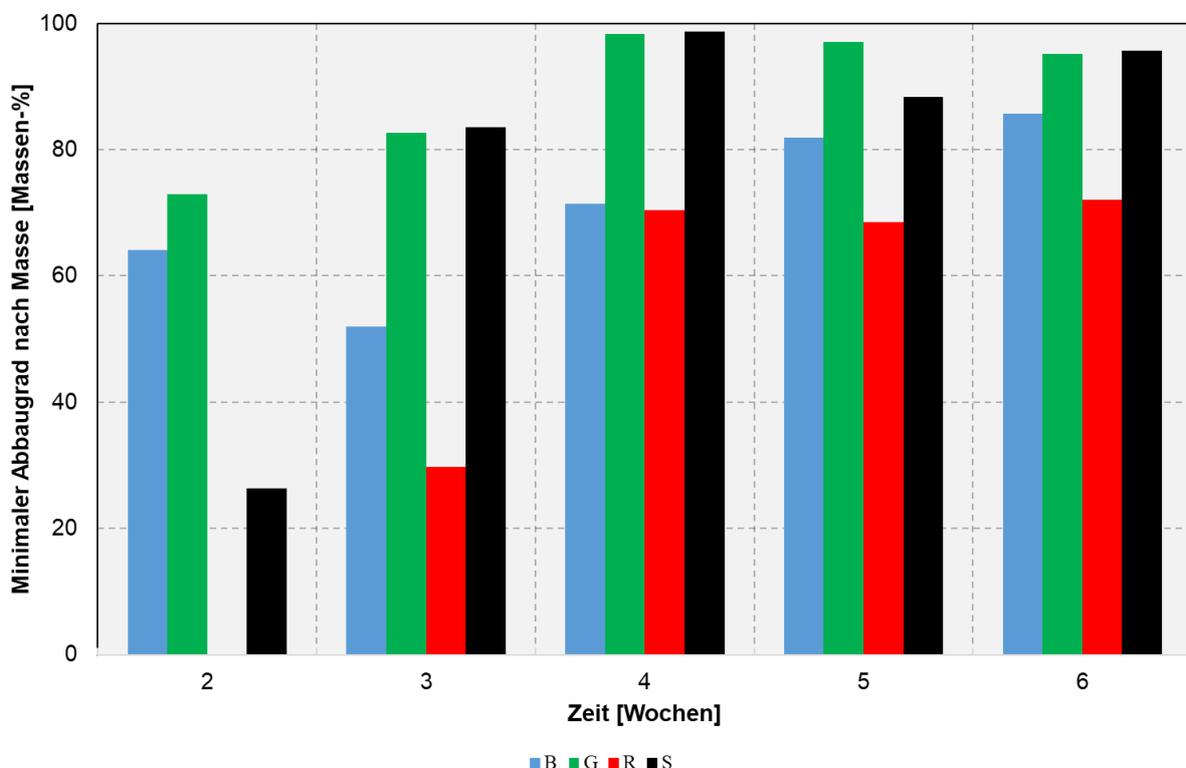


Abbildung 25: Minimale BAK-Abbaugrade nach Masse nach Charge und Zeit (Einfachbestimmungen in Wochen 2 und 4; Mittelwert aus Doppelbestimmungen in Wochen 3, 5 und 6, Tabelle 25, Anlage)

(3) Gesamtbetrachtung Abbaugrad

DIN 13432 zertifiziert einen vollständigen BAK-Abbau nach maximal 12 Wochen, DINplus (2020), nach maximal 6 Wochen, wobei für einen vollständigen Abbau jeweils ein Abbaugrad von 90% definiert wird nur Partikel >2 mm berücksichtigt werden. Die BioAbfv (2022) bezieht sich auf diese Definition. Die DüMV (2021) betrachtet auch Kunststoffe >1 mm als Fremdstoffe. Laut Tabelle 5 und Tabelle 6 waren insbesondere die BAK-Partikel <1 mm, aber auch die zwischen 1 und 2 mm im Vergleich zu Meso- und Makropartikeln relativ unbedeutend. Für die BAK-Abbaugradbetrachtungen gehen diese mit maximal 1% ein, was im Vergleich zu den methodischen Unsicherheiten recht unbedeutend ist. Die Daten zeigen darüber hinaus klar, dass sowohl den Makro- also auch den Mesopartikeln eine große Bedeutung beizumessen ist.

Im Folgenden werden alle BAK-Größenklassen zusammen betrachtet, u.a. auch, da je nach Handling des Materiales, z.B. durch mechanische Beanspruchungen, Makropartikel leicht zu Meso- oder Mikropartikeln gewandelt werden können. Tabelle 7 ist eine Zusammenfassung zu den Abbaugraden auf Basis der Gesamt-Restflächen und der Gesamt-Restmassen aus Tabelle 5 und Tabelle 6.

Tabelle 7: Minimale und Maximale BAK-Abbaugrade für die verschiedenen BAK-Beutel-Chargen (Spannweiten mit Mittelwert über alle untersuchten Kompostierungszeitpunkte)

Partikeltyp	Abbaugrad			
	B	G	R	S
	(% BAK-Beutelfläche)			
Maximaler Abbaugrad Nach Fläche	>85,6- <u>92,6</u> -97,2	>94,1- <u>97,1</u> -99,8	>80,0- <u>87,6</u> -94,9	>89,3- <u>95,0</u> -98,9
Minimaler Abbaugrad nach Masse	<26,2- <u>72,0</u> -93,6	<69,7- <u>90,1</u> -99,7	<22,1- <u>59,1</u> -79,5	<26,2- <u>82,6</u> -98,7

Die minimalen Abbaugrade nach Massen sind deutlich geringer als die auf die Flächen bezogenen maximalen Abbaugrade. Die realen Abbaugrade werden vermutlich dazwischenliegen. Der allgemeine Trend ist bei beiden Methoden ähnlich. Jeweils die R-Serie wies die geringsten Abbaugrade auf.

In Abbildung 26 und Abbildung 27 sind die Zeiträume 2-3 Wochen und 4-6 Wochen sowohl für die minimalen, als auch für die maximalen Abbaugrade dargestellt. Es wurden Mittelwerte über die jeweiligen Zeiträume gebildet. Die Einzelwerte finden sich in Tabelle 25 (Anlage). Mit beiden Methoden wird deutlich, dass der Großteil des Abbaus in der ersten Kompostierungsphase stattfindet. In den Wochen 4-6 schreitet der Abbau noch fort, aber verlangsamt. Die G-Beutel werden jeweils am schnellsten und weitest gehenden abgebaut, der R-Beutel schlechtesten.

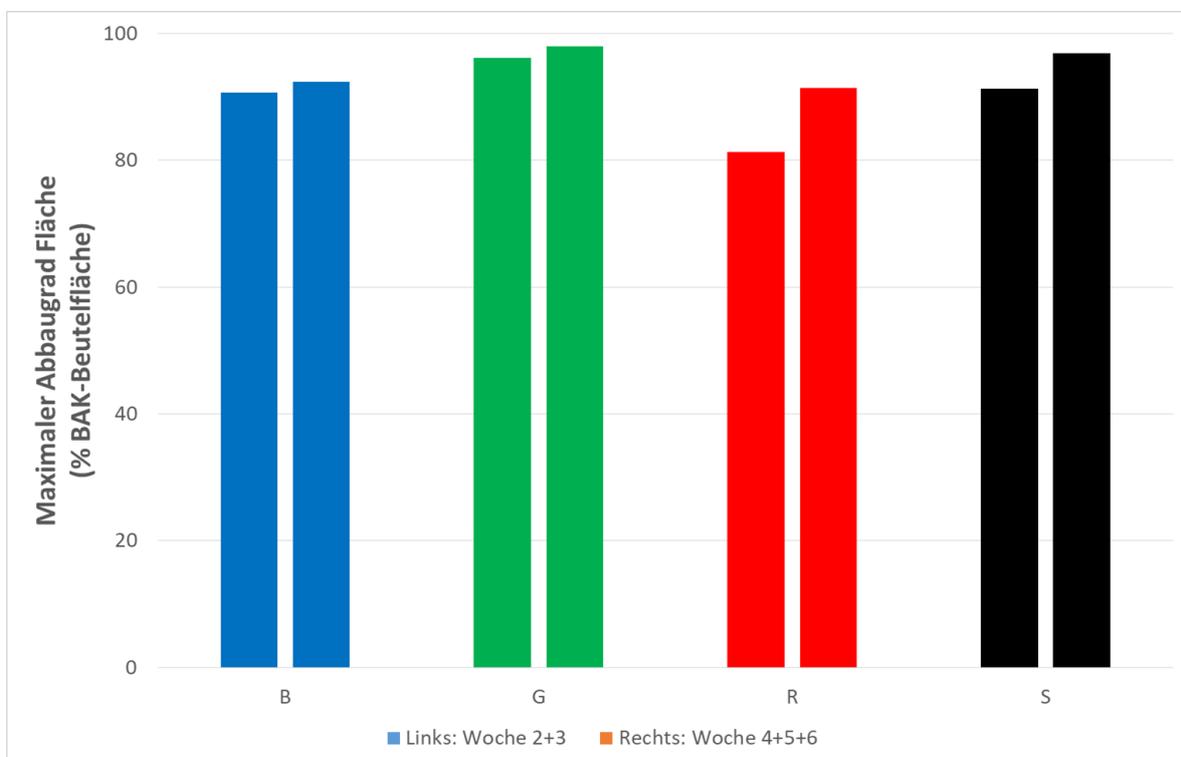


Abbildung 26: Maximale Abbaugrade nach Fläche für verschiedene Phasen der Kompostierung (Mittelwerte der 2 und 3 sowie 4, 5 und 6; Einzelwerte Tabelle 25, Anlage)

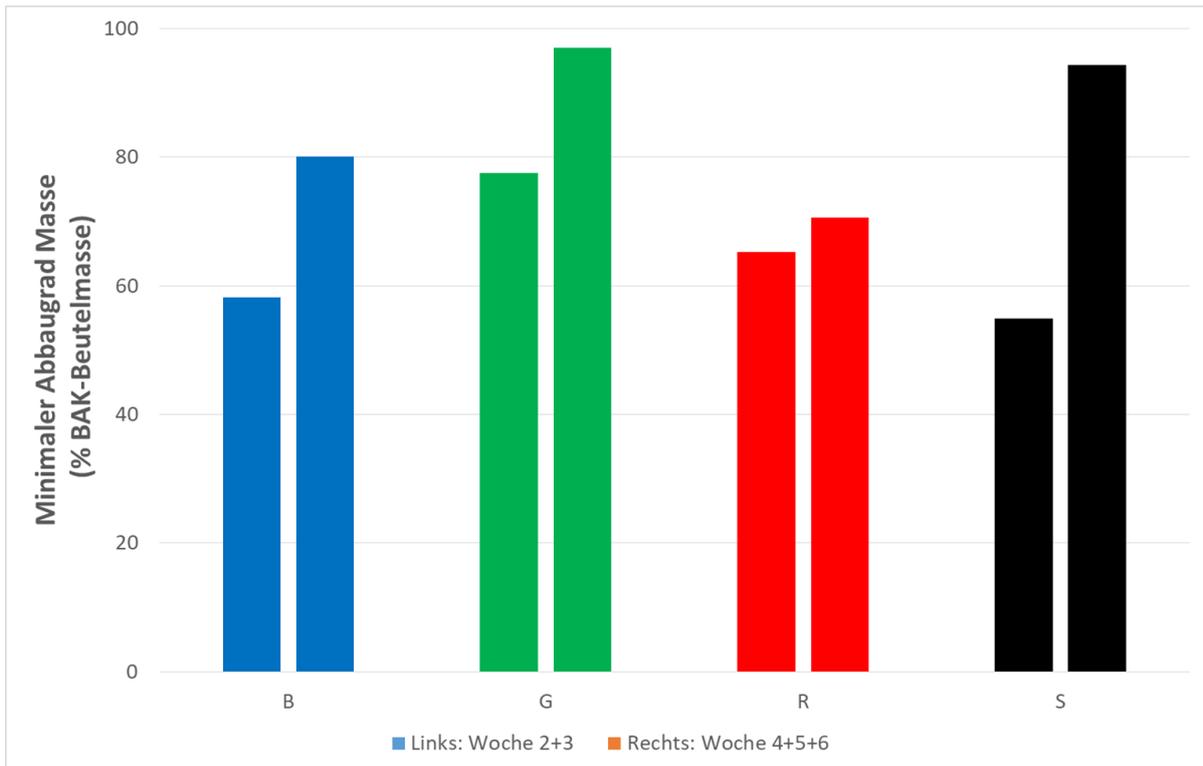


Abbildung 27: Minimale Abbaugrade nach Masse für verschiedene Phasen der Kompostierung (Mittelwerte der 2 und 3 sowie 4, 5 und 6; Einzelwerte Tabelle 25, Anlage)

Um die Erfüllung der Anforderung der DINplus (2020) mit einem Abbaugrad von mindestens 90% bis zu Woche 6 zu prüfen, muss der minimale Abbaugrad nach Masse herangezogen werden, um eine sichere Beurteilung zu ermöglichen. Demnach erfüllen die G- und die S-Beutel, beides Stärke-Blends, die Anforderungen sicher. Die R- und die B-Beutel, beides PLA-Blends, erfüllen die Anforderung vermutlich nicht, denn die minimalen Abbaugrade nach Masse liegen nur bei ca. 70 bzw. 80%. Allerdings liegen die maximalen Abbaugrade nach Fläche knapp über 90%, was daher keine sichere Aussage zulässt.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Abschließend sollen einige Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Arbeiten im Hinblick auf die verwendeten Methoden, den BAK-Abbau bei der Kompostierung sowie die Bedeutung im Hinblick auf verschiedene Regularien gezogen und Vorschläge für weiterführende Arbeiten gegeben werden.

Methoden:

Der Einbau von Netzen mit gefüllten BAK-Beuteln in einen großtechnischen Kompostierungsprozess funktionierte gut. Ob kleinere Maschenweiten für die innere Lage des drei-schichtigen Netzes sinnvoll sind, sollte getestet werden. Einerseits werden Materialverluste mit einem feineren Netz minimiert, andererseits könnte dadurch der Gas- und Wasseraustausch mit dem umgebenden Material behindert werden. Um die Handhabbarkeit zu verbessern, sollten jedoch weniger Beutel pro Netz und etwas kleinere Netze verwendet werden. Zudem sollten pro BAK-Typ und Entnahmetermin jeweils drei Netze eingebaut werden, da die großtechnische Kompostierung mit erheblichen Inhomogenitäten verbunden sein kann.

Von den Kompostierungsbedingungen wurden die wesentlichen betrachtet und als ausreichend erachtet: Kompostierungszeit, Wassergehalt und Temperatur.

- Da der BAK-Hauptabbau vornehmlich in den ersten vier Wochen stattfand sollte diese Phase in weiterführenden Untersuchungen besondere Beachtung finden. Eine erste Beprobung sollte bereits nach 1 Woche durchgeführt werden. Obwohl eine 6-wöchige Kompostierungsdauer ausreichend ist, um die Anforderungen der DINplus (2020) zu prüfen, sollte Chargen gegebenenfalls noch länger kompostiert werden bis keine BAK-Partikel mehr nachweisbar sind bzw. ein Endzustand erreicht ist.
- Eine Austrocknung des Rottegutes führte zu Problemen beim BAK-Abbau. Für einen guten BAK-Abbau sollte darauf geachtet werden, dass geeignete Wassergehalte im gesamten Rottegut eingehalten werden. Der Wassergehalt sollte zu Beginn der Kompostierung zwischen 50 und 65% liegen, was guten allgemeinen Kompostierungsbedingungen entspricht. Am Ende der Kompostierung sollte er maximal 45% betragen, was den Anforderungen für einen guten Kompost entspricht. Inwieweit sich die Wassergehalte in diesem Korridor auswirken, muss weiterführend untersucht werden. Ein Vergleich des BAK-Abbaus bei folgenden Kompostwassergehalten bietet sich an: 30- 35, 35-40, 40- 45%.
- Typische Temperaturverläufe von Kompostierungsanlagen mit dem Ziel einer Hygienisierung zeigten sich mit einem BAK-Abbau kompatibel. Auch wenn die Hygienisierungstemperaturen an Einzelmessstellen eine Kompostierungsanlage eingehalten werden, können die Temperaturen an verschiedenen Stellen im Rottegut sehr unterschiedlich ausfallen. Extrem abfallende Temperaturen wiesen auf Austrocknungen hin. In weiterführenden Untersuchungen sollte pro Netz ein kontinuierlicher Temperatur-Logger eingebaut werden, um Inhomogenitäten im Rottegut zu ermitteln und auch um den Einfluss der Temperaturen auf den BAK-Abbau weiterführend zu betrachten.

Aussagen über den BAK-Abbau wurden über einen minimalen Abbaugrad nach Masse und einen maximalen Abbaugrad nach Fläche ermittelt. Der reale Abbaugrad wird dazwischenliegen. Insbesondere bei geringeren Abbaugraden können beide Werte weit auseinanderliegen. Auch wenn beide Methoden eine Verfolgung des Abbaus ermöglichen, sind absolute quantitative Aussagen

schwierig. Folgende Möglichkeiten zur Verbesserung der Aussagekraft der BAK-Abbaugrade in Bezug zum Ausgangsmaterial sollten weiterführend untersucht werden:

- Reinigung der luftgetrockneten, feinverschmutzten BAK-Makropartikel: Möglichkeiten, die zur Detektion von Mikroplastik in Umweltproben vorgeschlagen werden sind Reinigungen mit Wasser, Ultraschall, Ethanol und H₂O₂ (Cabrera, 2020). Die Methoden sollten für BAKs angepasst und verglichen werden. Hierdurch kann die Aussagekraft des minimalen Abbaugrades nach Masse verbessert werden.
- Bestimmung der Dimensionen von luftgetrockneten, feinverschmutzten BAK-Makropartikeln: Aus größeren BAK-Partikeln werden nach Länge und Breite bzw. Durchmesser definierte Partikel hergestellt. Von diesen wird Fläche, Masse und Partikeldicke und damit die Foliendichte der BAK-Reste bestimmt. Hierdurch kann die Aussagekraft des maximalen Abbaugrades nach Fläche verbessert werden.
- Bestimmung verbesserter Durchschnittsdurchmesser für BAK-Mikro- und Mesopartikel: Eine Auswahl von Mikro- und Mesopartikeln wird mit einem Bildauswertesystem untersucht. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Flächenabschätzung auf Basis von mittleren Durchmessern (Mittelwert oberes und unteres Sieb einer Siebfraction) kann zur Festlegung einer verbesserten Durchmesserberechnung führen. Hierdurch kann die Aussagekraft des maximalen Abbaugrades nach Fläche verbessert werden.

BAK-Abbau:

Für den BAK-Abbau in großtechnischen Kompostierungsanlagen zeigten der BAK-Typ, der Wassergehalt des Rottegutes sowie die Phase im Kompostierungsprozess eine besondere Bedeutung.

- Wassergehalt: Ein geringerer BAK-Abbaugrad ist bei niedrigeren Wassergehalten zu erwarten. Die Netze mit Wassergehalten unter 20% zeigten tendenziell einen geringen Abbau. Jedoch war auch bei Netzen mit 25% WG teilweise ein guter Abbau möglich. Die besten BAK-Abbau-Ergebnisse wurden bei Wassergehalten nahe 40% beobachtet. Inwieweit sich darüberhinausgehende Wassergehalte auswirken kann mit den durchgeführten Untersuchungen nicht beantwortet werden. Eine Befeuchtung während des Prozesses zur Behebung von Austrocknungen war nicht notwendigerweise zielführend, eventuell sogar kontraproduktiv. Obwohl nach der Befeuchtung alle Wassergehalte im geeigneten Bereich lagen und die Temperaturen teilweise wieder über 50°C anstiegen, nahm der BAK-Abbau nicht mehr deutlich zu. Die plötzliche Abkühlung in Kombination mit einer höheren Feuchte könnte die etablierte Mikroorganismen-Biozönose gestört haben.
- Rottephase: Der Rottegut-Abbau war in den ersten drei Wochen am intensivsten. Dies korrelierte mit dem intensivsten BAK-Abbau. In den verbleibenden 3 Wochen setzte sich der BAK-Abbau fort, jedoch nur geringfügig. Die Temperaturen waren in der Intensivrotte tendenziell höher (ca. 70°C in den Containern, ca. 50-60°C in der Nachrotte). Eventuell könnten die etwas niedrigeren Temperaturen am Ende für den langsameren Abbau verantwortlich sein. Da jedoch nach der Befeuchtung in einigen Fällen die Temperaturen wieder deutlich stiegen und dennoch kein deutlich verbesserter BAK-Abbau bemerkt wurde, ist dies nicht sicher.
- BAK-Typ: Tendenziell zeigten die Stärke-Blends einen schnelleren Abbau als die PLA-Blends. Der Unterschied wird vom Grundstoff (Ecovio bzw. Matere-Bi), eventuellen Zusatzstoffen, aber auch von der Folienstärke abhängen. So lagen die Folienstärken der Stärke-Blend-Beutel bei 17-18 µm und die der PLA-Blend-Beutel bei 20 µm. Die R-Beutel hatten zudem Zugbänder mit einer Folienstärke von 30 µm, welche zudem doppellagig waren. Die tendenziell geringe Abbaubarkeit der R-Beutel, ist vermutlich insbesondere auf die Zugbänder zurückzuführen.

Gegen Ende der Kompostierung reicherten sich diese an. Das häufigere Auffinden von Zugbändern lässt auf einen entscheidenden Einfluss der Materialdicke bzw. einer Mehrlagigkeit schließen.

Regularien:

Zur Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten von BAK-Beuteln in Kompostierungsanlagen müssen verschiedene Regularien berücksichtigt werden. Diese betrifft die BAK-Abbaufähigkeit nach DIN 13432 bzw. DINplus (2020), auf welche in der BioAbfV (2022) zurückgegriffen wird. Darüber wird der mögliche massebezogene Maximalanteil an Fremdstoffen einschließlich Kunststoffpartikeln in Komposten in der BioAbfV (2022) und in der DüMV (2021) geregelt. Als weitergehenden Fremdstoffparameter gibt zudem die von der Bundesgütegemeinschaft Kompost durchgeführte RAL-Gütesicherung Flächensumme an Fremdstoffpartikeln bezogen auf ein bestimmtes Kompostvolumen an. Folgende Eckpunkte aus den Regularien wurden betrachtet:

- Partikelgröße: Die DüMV (2021) schreibt die Erfassung von Fremdstoffen ab 1 mm vor, die BioAbfV (2022) ab 2 mm. Der BAK-Mikro-, Meso- und Makropartikelanalyse ergab, dass quantitativ vor allem die Mesopartikel (2-8 mm) und die Makropartikel (>8 mm) relevant waren. Mikropartikel (1-2 mm, <1 mm) wurden auch untersucht. Sie traten auf, jedoch in deutlich geringeren Anteilen.
- Kompostierungsdauer: Die DIN 13432 gibt einen Maximalzeitraum von 12 Wochen, die DINplus (2020) von 6 Wochen bis zu einem vollständigen BAK-Abbau an. Von den untersuchten Beuteln wies nur der B-Beutel ein DINplus-Zertifikat auf, alle jedoch das DIN 13432 Zertifikat. Im Untersuchungszeitraum bis 6 Wochen wurden von den Stärke-Blend-Beuteln (S, G) einige Chargen vollständig oder nahezu vollständig abgebaut, nicht jedoch von den PLA-Blend-Beuteln (R, S). Die reale Kompostierungsdauer in großtechnischen Kompostierungsanlagen liegt oftmals deutlich unter den geforderten 6 Wochen. So wird in der untersuchten Kompostierungsanlage Kompost bereits nach 2-wöchiger Kompostierung vermarktet.
- Abbaubarkeit: Die DINplus (2020) geht von einem vollständigen Abbau bis 6 Wochen aus, wenn der Abbaugrad mindestens 90% beträgt. Dabei werden nur Partikel >2mm berücksichtigt. In den Untersuchungen hielten die Stärke-Blend-Beutel diese Anforderungen ein. Obwohl bei den meisten PLA-Blend-Chargen der Abbaugrad nach Fläche über 90% war, muss davon ausgegangen werden, dass ihr realer Abbaugrad teilweise unter 90% liegen wird. Bei den Beuteln mit Zugband lag der minimale Abbaugrad nach Masse zwischen 58 und 80%, bei denen ohne Zugband zwischen 71 und 94%.

Ausblick

Neben dieser Studie gibt es weitere, die sich mit dem BAK-Abbau bei der Kompostierung befassen, teilweise mit ähnlichen, teilweise mit anderen Ergebnissen. Andere Studien verwenden andere Untersuchungsansätze und sind somit nicht direkt vergleichbar. Dies betrifft z.B. den aktiven bzw. passiven Eintrag von BAK-Folien, die Größe der untersuchten BAK-Partikel und unterschiedliche Kompostierungssysteme und -zeiten. Darüber hinaus gibt es Studien, die sich mit unterschiedlichen Sammelsystemen für Bioabfälle befassen. Neben BAK-Beuteln sind z.B. Papierbeutel möglich oder aber Beutelfreie Systeme mit Vorsortiergefäßen. Eine vergleichende Beurteilung der Studien, auch im Hinblick auf die Zielstellungen kann weiterführende Erkenntnisse zur Sinnhaftigkeit des Einsatzes von BAK-Beuteln bei der Sammlung von Bioabfällen bringen.

5 Danksagung

Die experimentellen Arbeiten wurden vom VERBUND (Verbund für kompostierbare Produkte e.V.) finanziell und praktisch unterstützt. Die Kompostierungen wurden in der Kompostierungsanlage von SWN (Stadtwerke Neumünster) durchgeführt und die Netze bei EBL (Entsorgungsbetriebe Lübeck) vorbereitet. Die analytischen Arbeiten erfolgten im Labor der TUHH (Institutes für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz der Technischen Universität Hamburg). Den beteiligten Mitarbeitern dieser Institutionen danken wir herzlich, auch für die sehr wertvollen Diskussionen im Rahmen der Durchführung und Auswertung der Experimente. Die Auswertung der Ergebnisse des Versuches wurde im Rahmen folgender Projekte verwirklicht: Calls for Transfer C4T531 (Hamburg Innovation), DECISIVE (EU H2020 n°689229) und SOILCOM (EU Interreg North Sea Region Programm). Für diese Möglichkeit sind wir sehr dankbar.

Unser besonderer Dank geht an M. Viramontes Espinosa und P. E. Borges von der TUHH, die im Rahmen ihrer Projekt- bzw. ihrer Masterarbeit intensiv an dem Vorhaben gearbeitet und im hohen Maße zum Gelingen beigetragen haben.

6 Literaturverzeichnis

BioAbfV, 2022: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. April 2013 (BGBl. I S. 658), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 28. April 2022 (BGBl. I S. 700) geändert worden ist, <https://www.gesetze-im-internet.de/bioabfv/> (letzter Zugriff: 05/2022)

BGK 2004: Kompost für den Garten- und Landschaftsbau: Grundlagen der guten fachlichen Praxis. https://www.kompost.de/fileadmin/docs/shop/Anwendungsempfehlungen/602_bgk_galabau.pdf (letzter Zugriff: 06/2022)

BGK 2010: Hygiene-Baumusterprüfsystem (HBPS): Kompostierungsanlagen, Vergärungsanlagen. 4. ergänzte und überarbeitete Auflage, März 2010 (letzter Zugriff: 05/2022)

BGK, 2006a: Kapitel I., Unterkapitel A1.4.2 des Methodenbuchs Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.: 1.Lfg 9/2006

BGK, 2006b: Kapitel II., Unterkapitel C – Unerwünschte, artfremde Partikel. des Methodenbuchs Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.: 1.Lfg 9/2006

BGK, 2006: Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 5. Auflage, Selbstverlag, Köln; ISBN-3-939790-00-01

BGK, 2017: Qualitätsanforderungen für Fertigkompost. https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Guetesicherung/Dokumente_Kompost/Dok. 251-006-1_Qualitaetskrit. K.pdf (letzter Zugriff: 05/2022)

BGK (2018): Qualitätsanforderungen für Substratkompost. https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Guetesicherung/Dokumente_Kompost/Dok. 251-006-3_Qualitaetskrit. SK.pdf (letzter Zugriff: 05/2022)

BGK (2021): Schwellen und Grenzwerte. https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Guetesicherung/Dokumente_Holz-und_Pflanzenaschen/Dok. 252-006-4_Schwellen_und_Grenzwerte.pdf (letzter Zugriff: 05/2022)

Cabrera, R. (2020): Compost quality and impacts of its application. Masterarbeit. Technische Universität Hamburg (letzter Zugriff: 05/2022)

DIN EN 13432, 2000: Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau- Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen. Deutsche Fassung EN 13432:2000. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin (letzter Zugriff: 05/2022)

DINplus, 2020: Zertifizierungsprogramm Bioabfall-Beutel aus kompostierbaren Werkstoffen. DIN CERTCO, Berlin. <https://www.dincertco.de/din-certco/de/main-navigation/products-and-services/certification-of-products/environmental-field/dinplus-bioabfall-beutel/> (letzter Zugriff: 05/2022)

DüMV (2021): https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/4.html (letzter Zugriff: 05/2022)

EUROPEAN BIOPLASTICS (2022): https://docs.european-bioplastics.org/2016/publications/EUBP_Guidelines_Seedling_logo.pdf (letzter Zugriff: 05/2022)

Körner, I. (2009): Stickstoffhaushalt bei der Kompostierung: Bilanzen, Gehalte, Umsetzungs- und Austragsprozesse. Habilitationsschrift, Technische Universität Hamburg. In: Hamburger Berichte 33, Stegmann, R. (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, Deutschland, ISBN: 978-3-9812867-0-0, 320 Seiten, <https://d-nb.info/104845438X/34> (letzter Zugriff: 05/2022)

Kern, M., Siepenkothen, H.-J. Turk, T. (2018): Erfassung von haushaltsstämmigen Bioabfällen und Qualität des Bioguts - Auswertung von Biogut-Sortieranalysen. https://www.mikroplastikfrei.at/wp-content/uploads/2020/06/2018-11-MuA-Kern-Studie-trennverhalten_BRD.pdf (letzter Zugriff: 05/2022)

SWN (2021a): Analyseergebnisse 2021 Komposte. Zur Verfügung gestellt durch SWN
SWN (2021b): Biokompostierungsanlage. <https://www.stadtwerke-neumuenster.de/wertstoffzentrum/biokompostierungsanlage> (letzter Zugriff: 05/2022)

SWN (2021c): Jahreszeugnis 2021- Frischkompost (mittelkörnig). Zur Verfügung gestellt durch SWN

SWN (2021d): Jahreszeugnis 2021- Fertigungskompost (mittelkörnig). Zur Verfügung gestellt durch SWN

TÜV (2021a): TÜV Rheinland – DINCERTCO - Zertifikate und Registrierungen. 13432. In: <https://www.dincertco.tuv.com/search?locale=de&q=13432> (letzter Zugriff 11/2021)

TÜV (2021b): TÜV Rheinland – DINCERTCO - Zertifikate und Registrierungen. 13432 PLUS. In: <https://www.dincertco.tuv.com/search?locale=de&q=13432+PLUS> (letzter Zugriff: 05/2022)

TÜV (2021c): TÜV Rheinland – DINCERTCO - Zertifikate und Registrierungen. Registration number 8C056. In: <https://www.dincertco.tuv.com/registrations/60148967?locale=en> (letzter Zugriff: 05/2022)

UBA (2015): Kompostierung organischer Abfälle – Bioabfallkompostierung. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiNuNvxir70AhXovKQKHWCEDQAQFnoECAUQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.cleaner-production.de%2Fimages%2FBestPractice%2Fdata_de%2FCOM.pdf&usg=AOvVaw2MoSAly0cW8ZdGnxTDM6bN (letzter Zugriff: 05/2022)

7 Anlagen – Tabellen

Tabelle 8: Überblick über den Ablauf des Kompostierungsversuches

Datum	Netzeinbau (Anzahl Netze)	Netzausbau (Anzahl / Netznummern)	Spezielle Aktivitäten
Ausführung bei: EBL, Lübeck			
27.04.2021	-	-	○ Befüllung Beutel und Netze
28.04.2021	-	-	○ Befüllung Beutel und Netze
Ausführung bei: SWN, Neumünster			
29.04.2021	32	-	○ Befüllen der 4 Container
12.05.2021	-	4 / B2, G3, R6, S1	○ Entleerung der 4 Container ○ Ausbau der Netze ○ Einbau von 28 Netzen in Nachrottemiete
19.05.2021	-	8 / B6, B8, G7, G8 R2, R4, S5, S7	○ Ausbau der Netze ○ Umschichten der Miete mit Einbau der verbleibenden Netze
26.05.2021	-	4 / B1, G1, R3, S2	○ Ausbau der Netze ○ Durchwalken der verbleibenden Netze ○ Umschichten der Miete mit Einbau der verbleibenden Netze ○ definiertes Befeuchten der Netze und der Miete, um teilweise ausgetrocknete Zonen zu reaktivieren
02.06.2021	-	8 / B5, B7, G5, G6 R1, R5, S4, S6	○ Ausbau der Netze ○ Umsetzen der Miete in eine andere Rottehalle mit ähnlichen Bedingungen
09.06.2021	-	8 / B3, B4, G2, G4 R7, R8, S3, S8	○ Ausbau der Netze ○ Beendigung des Versuches

Tabelle 9: Charakteristik der zur Netzkonstruktion eingesetzten Materialien

Netztyp	Maschen- weite (mm x mm)	Stärke (mm)	Material / Farbe	Länge x Breite (m x m)	Funktion
Vogelschutznetz	13 x 13	0,2	Polypropylen/ schwarz	2 x 2	Vermeidung von größeren Materialverlusten aus den Säcken
Industriernetz 1	50 x 50	1,2	Polypropylen/ schwarz	2 x 2	Reißfestes Netz zum Zusammenhalten der Säcke
Industriernetz 2 „Fußballtornetz“	100 x 100	2,0	Polypropylen weiß	2 x 2	Netz zum Einhängen in die Container
Nylonschnüre 1	-	4,5	Nylon	-	Verbindung von Industriernetz 1 und 2
Nylonschnüre 2	-	5,0	Nylon	-	Verschluss der Säcke

Tabelle 10: Charakteristik der Containerkompostierungsanlage von SWN in Neumünster

Element	Kurzbeschreibung	Quellen
Allgemeines		
Kapazität	29 900 Mg/a	1
Baumuster	1.3 ML Container (Container, zeltartige Rotteboxen); letztgenannte nicht weiterführend betrachtet, da nicht versuchsrelevant)	1, 2
Güteüberwachung	1.4 Seit 01.01.1998; BGK-Nummer 1049, RAL Gütezeichen 251	1
Input: kommunale Grün- und Küchenabfälle		
Bioabfall	aus den Kreisen Segeberg und Plön sowie aus der Stadt Neumünster, nach Anlieferung gemischt und geschreddert, 80% aus Biotonne; 20% Garten- und Parkabfälle	2, 4, 5
Rottesystem: Belüftete Container ohne Nachrotte		
Container	20 m ³ , (Außendimensionen 6 x 2,5 x 2,5 m)	3
Ein- und Austrag	Mit Radlader / durch Abkippen jeweils in einer Halle	3
Temperatur	Kontinuierliche Messung und Dokumentation mittels Sensor im Reaktorinneren, hygienisiert bei mindestens 65° C nach einer Woche	3, 2
Belüftung	Containeranschluss an aktives Belüftungssystem, Luftdurchströmung über Lochboden von unten nach oben, verbrauchte, geruchbelastete Luft mittels Biofilter gereinigt	2, 3
Rottedauer	Im Normalfall 2 Wochen, ggf. bis zu 4 Wochen	3, 2
Störstoffe	Abtrennung mit 15 mm Siebtrommel nach der Rotte	3
Überwachung	Regelmäßige Prozessüberwachung: RAL geprüft und nicht beanstandet	1
Kompost: Gütegesicherter Kompost		
Kompost	Im Allgemeinen als Frischkompost vermarktet, laut Zertifikat oft als Fertigungskompost eingestuft	2, 1, 3
Qualitätssicherung	Nach BGK Prüfung, u.a. Störstoffe im Kompost: verformbare Kunststoffe (Folien), sonstige Fremdstoffe (ohne Folien), Glas, Steine (Anteil an der Trockensubstanz) sowie Flächensumme Fremdstoffe	4, 5
Absatz	99% in Landwirtschaft	2

1: SWN (2021a), 2: SWN (2021b), 3 persönliche Information durch SWN, 4 SWN (2021c), 5 (2021d)

Tabelle 11: Herstellerinformationen auf den BAK-Beuteln
(Weitere Informationen sind in Tabelle 3, Seite 26, enthalten)

Code	B	G1	G2	R	S
DIN Register-Nr. (TÜV, 2021a)	8C056 / 7P0257	7P0094	7P0094	7P0111	7P07135 ¹
Weitere Zertifikate	DIN geprüft – biobasiert 50-85% (8C056)	TÜV Austria Home, Home OK compost	TÜV Austria Home, Home OK compost	-	-
Logos zu Materialien	Ecovio®	MATER-BI	MATER-BI	Ecovio®	-
Weitere Logos	Nachwachsende Rohstoffe, Feuchtigkeitsbarriere, Biologisch abbaubar	-	-	-	-
Weitere Texte	Eigenschafts- und Anwendungshinweise ²	Warnhinweis ³	Warnhinweis ³	Eigenschafts- und Anwendungshinweise ⁴	Warnhinweis ⁵
Sprachen	DE, UK, FR, NL	DE	DE, UK, NO, FI, IT, FR, ES, NL	DE	DE

¹ Nummer nicht im Register enthalten (TÜV 2021a), da Fehldruckcharge verwendet wurde.

² „Dieser vollständig kompostierbare Bioabfallbeutel (DIN EN 13432) besteht überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen und entspricht der aktuellen Bioabfallverordnung. Die Beutel bitte trocken lagern und vor direkter Sonneneinstrahlung schützen.“

³ „Bioabfallbeutel sind kein Spielzeug. Von Kindern fernhalten. Nicht über den Kopf stülpen. Erstickungsgefahr.“

⁴ „Dieser Zugbandbeutel besteht überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen und ist gemäß DIN EN 13432 industriell vollständig kompostierbar. Flüssigkeitsdicht und reißfest für die hygienische Entsorgung aller organischen Abfälle in der Biotonne. Beachten Sie die örtliche Abfallsatzung zur Verwendung kompostierbarer Bio-Müllbeutel. Bitte keine heißen Abfälle oder Flüssigkeiten einfüllen. Beutel trocken lagern und vor direkter Sonneneinstrahlung schützen.“
„Kompostierbar, überwiegend bio-basiert und flüssigkeitsdicht“

⁵ „Achtung Gefahr. Dieser dichte Beutel kann zur Erstickung führen, wenn er über den Kopf gestülpt wird. Von Kindern fernhalten.“

Tabelle 12: Beurteilungen und Messungen an den Beuteln
(Weitere Informationen sind in Tabelle 3, Seite 26, enthalten)

Code	B	G _a	G _b	R	S
Optik und Haptik					
Färbung der Beutelfolie	Milchig, transparent weiß, ohne Grünan-teile	Milchig, schwach transparent weiß, ohne Grünan-teile	Milchig, schwach transparent weiß, ohne Grünan-teile	Voll transparent im Grün-ton des Aufdruckes	Milchig transparent im Grün-ton des Aufdruckes
Grün-ton des Aufdruckes	Hell-grün	Dunkel-grün	Dunkel-grün	Hell-grün	Dunkel-grün
Grün-ton des Zugbandes	-	-	-	Dunkel-grün, nicht transparent	-
Haptik	Weich, geschmei-dig	Etwas starr, leicht knisternd	Etwas starr, leicht knisternd	Etwas starr, stärker knisternd	Weich, geschmei-dig
Druckfarbe ¹	+	++	++	++++	+++
Beutelmassen					
Beutel pro Rolle (Anzahl)	50	26	10	12	15
Masse (g/Beutel); TUHH-Messung ³	10,9	8,4	12,2	9,1 ²	9,0
Masse (g/Beutel); PELY-Messung ⁴	11,0	8,9	12,5	8,8	9,0
Beutelflächen					
Breite Grundkörper (cm/ Beutel)	43,5	23,5	26,6	34,5 (32,2)	23,5
Länge Grundkörper (cm/ Beutel)	49,8	36,7	57,0	42,2	40,7
Breite der Henkel (cm/ zwei Henkel)	-	10,5 ⁵	-	-	10,0
Länge der Henkel (cm/ Henkel)	-	13,0	-	-	13,2
Breite der Falzen (cm/ zwei Falzen)	-	20,0	22,0	-	20,0
Breite Zugband (cm/ zwei Lagen)	-	-	-	4,1	-
Breite Saum (cm)	-	-	-	6,0	-
Fläche Grundkörper (cm ²)	4332,6	1724,9	3032,4	2911,8	1912,9
Fläche Henkel (cm ²)	-	567,0	-	-	528,0
Fläche Falz (cm ²)	-	1468,0	2508,0	-	1628,0
Fläche Zugband (cm ²)	-	-	-	282,9	-
Fläche Saum (cm ²)	-	-	-	414,0	-
Flächensumme (cm ² / Beutel); TUHH-Messung	4333	3760	5540	3609 ⁶	4069
Flächensumme (cm ² / Beutel); PELY-Messung	4942	3986	5814	2718	4351
Berechnungsparameter für 20 Beutel pro Netz					
Masse je 20 Beutel (g / Netz)	218,7	206,5		182,1	179,4
Flächensumme je 20 Beutel (m² / Netz)	9,2	7,8	11,6	7,2	8,4
		9,7			

¹ optische Beurteilung: + sehr gering, ++ gering, +++ mäßig +++++ etwas mehr

² davon: 1,01 g Zugband, 8,09 g Beutel

³ Messung auf Basis der Beuteleinzelmassen

⁴ Messung auf Basis der Rollenmasse und der Beutelan-zahl pro Rolle

⁵ Die Breite der Henkel ist variabel: 9,7 cm im schmalsten Teil und 11,3 cm im breitesten

⁶ Zugband berücksichtigt

Tabelle 13: Charakteristik der Chargen mit befüllten BAK-Beuteln und der Netze vor der Rotte

Charge	Charge von 20 Beuteln				Netzinhalt mit 20 Beuteln und Bioabfall A				
	Masse (kg)		Volumen (L)	Dichte (Kg/L)	Masse (kg)		Masse (kg)	Volumen (L)	Dichte (Kg/L)
	Gefüllte Beutel	Leere Beutel	Gefüllte Beutel	Beutelinhalt	Abfall um Beutel	Inhalt mit Netz	Inhalt ohne Netz	Gefüllte Netze	Netzinhalt
B1	42,56	0,22	70	0,60	78,2	118,0	116,4	250	0,47
B2	44,10	0,22	70	0,63	75,9	116,2	115,3	250	0,46
B3	36,24	0,22	70	0,52	63,0	96,4	95,7	200	0,48
B4	33,86	0,22	70	0,48	58,9	89,8	89,1	220	0,41
B5	36,10	0,22	70	0,51	46,7	80,2	79,3	205	0,39
B6	37,04	0,22	70	0,53	54,0	88,5	87,7	235	0,38
B7	34,29	0,22	75	0,45	53,1	86,2	85,3	205	0,42
B8	35,86	0,22	65	0,55	60,0	91,0	90,3	205	0,46
<i>Mittel</i>	<i>37,51</i>	<i>0,22</i>	<i>70</i>	<i>0,53</i>	<i>61,2</i>	<i>96,1</i>	<i>94,9</i>	<i>221</i>	<i>0,43</i>
G1	42,16	0,21	70	0,60	77,8	117,8	116,8	250	0,47
G2	42,38	0,21	80	0,53	68,0	107,6	106,7	260	0,41
G3	35,42	0,21	70	0,50	68,6	99,0	98,2	215	0,46
G4	36,50	0,21	70	0,52	60,9	94,8	92,9	225	0,42
G5	35,06	0,21	70	0,50	53,4	86,4	85,5	220	0,39
G6	36,02	0,21	60	0,60	62,2	96,2	95,4	200	0,48
G7	35,62	0,21	65	0,54	67,2	100,8	100,0	215	0,47
G8	35,80	0,21	70	0,51	67,4	101,4	100,4	225	0,45
<i>Mittel</i>	<i>37,37</i>	<i>0,21</i>	<i>69</i>	<i>0,54</i>	<i>65,7</i>	<i>100,5</i>	<i>99,5</i>	<i>226</i>	<i>0,45</i>
R1	37,94	0,18	70	0,54	76,3	110,6	109,6	250	0,44
R2	39,88	0,18	70	0,57	71,2	107,4	106,6	240	0,45
R3	37,10	0,18	70	0,53	64,6	97,0	96,1	225	0,43
R4	37,31	0,18	70	0,53	54,3	98,6	97,9	220	0,45
R5	34,20	0,18	70	0,49	55,4	87,2	86,3	215	0,41
R6	34,54	0,18	65	0,53	50,3	82,2	81,3	210	0,39
R7	33,20	0,18	80	0,41	64,2	95,0	94,4	225	0,42
R8	35,00	0,18	70	0,50	60,2	93,0	92,2	220	0,42
<i>Mittel</i>	<i>36,15</i>	<i>0,18</i>	<i>71</i>	<i>0,51</i>	<i>63,3</i>	<i>96,4</i>	<i>95,5</i>	<i>226</i>	<i>0,43</i>
S1	39,68	0,18	70	0,56	76,4	113,4	112,6	250	0,45
S2	42,08	0,18	70	0,60	74,3	113,2	112,2	240	0,47
S3	34,96	0,18	75	0,46	73,3	104,8	103,8	235	0,45
S4	35,30	0,18	70	0,50	68,1	101,4	100,2	220	0,46
S5	36,04	0,18	70	0,51	47,7	81,8	81,1	220	0,37
S6	35,30	0,18	70	0,50	57,7	90,6	89,7	220	0,41
S7	35,30	0,18	70	0,50	67,4	100,6	99,7	210	0,48
S8	36,22	0,18	65	0,55	63,3	97,8	97,0	205	0,48
<i>Mittel</i>	<i>36,86</i>	<i>0,18</i>	<i>70</i>	<i>0,52</i>	<i>66,1</i>	<i>100,5</i>	<i>99,5</i>	<i>225</i>	<i>0,45</i>
Gesamtmittelwerte									
	36,97	0,20	70	0,53	64,1	98,4	97,4	222	0,44

Tabelle 14: Platzierung der Netze in den Containern zur Hauptrotte und in der Miete zur Nachrotte

Hauptrotte

Container 32133		Container 32156		Container 32152		Container 32123	
S1	B4	S8	B1	S6	B6	S7	B5
G3	R8	G2	R3	G6	R2	G8	R5
B2	S3	B3	S2	B7	S5	B8	S4
R6	G4	R7	G1	R1	G7	R4	G5
Entnahme Woche 2				Zur Nachrotte			

Nachrotte

Miete						
S7	B6	B1	B5	S6	S8	B4
G8	R2	R3	R5	G6	G2	R8
B8	S5	S2	S4	B7	B3	S3
R4	G7	G1	G5	R1	R7	G4
Entnahme Woche 3		Entnahme Woche 4		Entnahme Woche 5		Entnahme Woche 6

Tabelle 15: Charakteristik der entnommenen Netze

Woche	Netz	Masse Ende Inhalt ohne Netz (kg)	Masse- verlust (%)	Volumen (L)	Dichte (-)	Wasser- gehalt (%)	Tem- peratur (°C)	Rotte- grad (-)
2	B2	84,2	27,0	170	0,50	34,0	70	-
3	B6	59,9	31,7	150	0,40	25,2	62	-
3	B8	69,5	23,0	120	0,58	36,6	-	-
4	B1	76,7	34,1	150	0,51	17,2	22	I
5	B5	61,9	21,9	110	0,56	44,1	58	I
5	B7	64,8	24,0	120	0,54	36,2	46	III
6	B3	68,5	28,4	130	0,53	45,7	42	I
6	B4	65,5	26,5	130	0,50	37,8	52	I
Spannbreite		<u>60-69-84</u>	<u>22-27-34</u>	<u>110-135-170</u>	<u>0,4-0,5-0,6</u>	<u>17-35-46</u>	<u>22-50-70</u>	<u>I - III</u>
2	G3	67,4	31,4	140	0,48	22,4	61	-
3	G7	77,5	22,5	135	0,57	39,5	-	-
3	G8	57,4	42,8	120	0,48	21,9	-	-
4	G1	82,5	29,4	165	0,50	34,1	60	I / III
5	G5	68,9	19,4	110	0,63	39,3	52	III
5	G6	59,4	37,7	110	0,54	33,1	58	I
6	G2	77,6	27,3	130	0,60	37,2	47	V
6	G4	73,6	20,8	140	0,53	40,4	54	I
Spannbreite		<u>57-71-83</u>	<u>19-29-43</u>	<u>110-131-165</u>	<u>0,5-0,5-0,6</u>	<u>22-34-40</u>	<u>47-55-61</u>	<u>I - V</u>
2	R6	62,8	22,8	143	0,44	34,4	57	-
3	R2	74,6	30,0	160	0,47	32,9	-	-
3	R4	76,1	22,3	150	0,51	39,2	-	-
4	R3	58,6	39,0	150	0,39	24,9	26	V
5	R1	82,5	24,7	130	0,63	41,7	45	I
5	R5	67,7	21,6	110	0,62	29,7	59	V
6	R7	79,4	15,9	130	0,61	44,7	43	II
6	R8	68,2	26,0	130	0,52	31,5	43	I
Spannbreite		<u>59-71-83</u>	<u>16-25-39</u>	<u>110-138-160</u>	<u>0,4-0,5-0,6</u>	<u>25-35-45</u>	<u>26-46-59</u>	<u>I - V</u>
2	S1	81,4	27,7	173	0,47	28,2	68	-
3	S5	52,8	34,9	160	0,33	25,1	-	-
3	S7	66	33,8	140	0,47	16,9	-	-
4	S2	86,6	22,8	166	0,52	31,8	70	-
5	S4	81,3	18,8	145	0,56	34,2	60	V
5	S6	61,1	31,9	120	0,51	31,0	60	IV
6	S3	77,9	25,0	130	0,60	34,5	46	V
6	S8	78,4	19,2	130	0,60	33,2	56	III
Spannbreite		<u>53-73-87</u>	<u>19-27-35</u>	<u>120-145-173</u>	<u>0,3-0,5-0,6</u>	<u>17-29-35</u>	<u>46-60-70</u>	<u>III - V</u>
Spannbreite		<u>53-71-87</u>	<u>16-27-43</u>	<u>110-137-173</u>	<u>0,3-0,5-0,6</u>	<u>17-33-46</u>	<u>22-53-70</u>	<u>I - V</u>

Mittelwerte wurden unterstrichen.

Tabelle 16: Ergebnisse der Siebfractionierungen
(Mittelwerte aus Doppelbestimmungen)

Woche	Netz	Siebdurchgang					Diff.
		16mm	11,2mm	8mm	2mm	1mm	
		(% Rottegutfrischmasse)					
2	B2	89,74	81,67	70,35	39,21	26,08	0,06
3	B5	76,78	69,25	62,83	32,88	21,19	0,11
3	B6	79,12	70,13	61,97	35,05	24,29	0,05
4	B1	96,43	89,51	83,92	64,53	52,14	1,39
5	B7	93,81	86,13	80,73	47,96	32,96	0,06
5	B8	80,71	76,66	68,53	38,48	26,74	0,25
6	B3	90,35	86,64	82,45	53,00	39,00	0,11
6	B4	94,59	86,67	80,22	45,37	29,32	0,04
2	G3	78,32	71,38	66,27	41,83	30,18	0,14
3	G7	90,05	81,34	74,34	32,51	18,07	1,06
3	G8	96,23	87,23	80,26	56,86	44,61	0,08
4	G1	94,20	85,77	76,79	42,42	27,37	0,17
5	G5	87,47	76,36	69,25	39,24	25,50	0,07
5	G6	93,35	88,68	82,70	52,84	37,62	0,09
6	G2	88,48	82,16	75,76	48,01	34,62	0,39
6	G4	90,66	85,60	79,27	44,93	29,69	0,04
2	R6	88,16	77,09	67,67	35,64	24,01	0,12
3	R2	79,12	71,91	61,65	27,81	15,53	0,00
3	R4	90,69	84,32	77,53	39,78	25,39	0,07
4	R3	81,56	75,93	71,09	49,28	38,32	0,16
5	R1	89,31	80,34	71,28	36,67	23,30	0,11
5	R5	94,49	89,41	84,26	57,36	43,84	0,02
6	R7	95,69	88,26	76,82	37,58	21,68	0,06
6	R8	80,27	75,17	71,13	50,25	38,77	1,11
2	S1	90,00	81,47	71,28	38,42	25,86	0,16
3	S5	62,84	55,08	40,91	29,39	23,10	0,22
3	S7	96,92	91,49	86,28	64,59	50,86	0,07
4	S2	89,03	81,51	72,17	38,60	25,44	0,14
5	S4	94,30	92,31	88,33	58,02	41,73	0,04
5	S6	79,25	69,06	52,74	35,27	26,32	0,10
6	S3	97,09	93,77	87,70	55,97	40,27	0,07
6	S8	93,92	90,22	82,35	51,29	36,73	0,04

Tabelle 17: Restmassen der BAK-Makropartikel nach verschiedenen Aufbereitungsschritten

Woche	Netz	Masse feucht, grob- verunreinigt	Masse lufttrocken, grob- verunreinigt (g/Netz)	Masse lufttrocken, fein- verunreinigt	Restmasse lufttrocken feinverunreinigt (% BAK-Beutelmasse)	
2	B2	-	238,7	68,3	31,2	31,2
3	B6	559,1	323,8	157,0	71,8	45,4
	B8	143,2	90,0	41,5	19,0	
4	B1	96,5	45,9	31,7	14,5	14,5
5	B5	270,9	79,5	56,2	25,7	14,8
	B7	28,0	14,2	8,4	3,8	
6	B3	70,7	27,5	22,4	10,2	12,1
	B4	88,2	41,3	30,3	13,9	
<i>Spannbreite</i>		<i>28-<u>180</u>-559</i>	<i>14-<u>117</u>-323</i>	<i>8-<u>52</u>-157</i>	<i>4-<u>24</u>-72</i>	
2	G3	-	139,5	55,0	26,6	26,6
3	G7	38,5	7,8	5,0	2,4	15,6
	G8	155,7	97,5	59,7	28,9	
4	G1	10,7	1,2	1,3	0,6	0,6
5	G5	10,4	0,3	0,0	0,0	1,2
	G6	42,6	23,4	5,1	2,5	
6	G2	27,9	14,0	4,9	2,4	1,2
	G4	9,5	0,0	0,0	0,0	
<i>Spannbreite</i>		<i>9-<u>42</u>-156</i>	<i>0-<u>35</u>-139</i>	<i>0-<u>26</u>-60</i>	<i>0-<u>8</u>-29</i>	
2	R6	-	661,7	280,8	154,2	154,2
3	R2	558,3	328,3	132,0	72,5	64,1
	R4	385,0	189,0	101,1	55,6	
4	R3	132,5	82,9	49,2	27,0	27,0
5	R1	129,9	54,6	30,4	16,7	25,2
	R5	238,8	86,9	61,4	33,7	
6	R7	144,5	48,2	33,2	18,2	23,3
	R8	168,2	71,2	51,8	28,4	
<i>Spannbreite</i>		<i>130-<u>251</u>-558</i>	<i>48-<u>123</u>-328</i>	<i>30-<u>66</u>-132</i>	<i>18-<u>36</u>-72</i>	
2	S1	-	315,0	126,9	70,8	70,8
3	S5	26,9	10,6	5,0	2,8	13,0
	S7	219,3	130,8	41,5	23,1	
4	S2	5,9	0,4	0,4	0,2	0,2
5	S4	17,3	4,0	2,0	1,1	5,2
	S6	108,9	27,8	16,4	9,2	
6	S3	9,8	1,2	0,0	0,0	3,0
	S8	48,9	28,8	10,8	6,0	
<i>Spannbreite</i>		<i>6-<u>62</u>-219</i>	<i>0-<u>65</u>-315</i>	<i>0-<u>25</u>-127</i>	<i>0-<u>14</u>-71</i>	
Gesamt-Spannbreite		6-<u>134</u>-559	0-<u>85</u>-328	0-<u>42</u>-157	0-<u>21</u>-72	

Als Ausreißer betrachtet (ggf. besonders starke Verunreinigung). In den Auswertungen nicht berücksichtigt.
Mittelwerte wurden unterstrichen.

Tabelle 18: Flächenzahlen, Restaufsichtsflächen, spezifische Flächensummen der Makropartikel

Woche	Netz	Flächenzahl (m ² /Netz)	Restaufsichtsfläche (% BAK-Beutelfläche)	Spezifische Flächensumme (cm ² /L FM)
2	B2	0,492	0,492	5,3
3	B6	1,000		10,9
	B8	0,180	<u>0,590</u>	2,0
4	B1	0,141	0,141	1,5
5	B5	0,211		2,3
	B7	0,027	<u>0,119</u>	0,3
6	B3	0,151		1,6
	B4	0,192	<u>0,172</u>	2,1
B-Spannbreite		0,03-<u>0,30</u>-1,00	0,3-<u>3,2</u>-10,9	2,3-<u>21,0</u>-66,7
2	G3	0,286	0,286	2,9
3	G7	0,005		0,1
	G8	0,446	<u>0,226</u>	4,6
4	G1	0,010	0,010	0,1
5	G5	0,000		0,0
	G6	0,024	<u>0,012</u>	0,2
6	G2	0,022		0,2
	G4	0,000	<u>0,011</u>	0,0
G-Spannbreite		0,00-<u>0,10</u>-0,45	0,0-<u>1,0</u>-4,6	0,0-<u>7,8</u>-37,2
2	R6	1,307	1,307	18,2
3	R2	1,000		13,9
	R4	0,706	<u>0,853</u>	9,8
4	R3	0,357	0,357	5,0
5	R1	0,213		3,0
	R5	0,490	<u>0,352</u>	6,8
6	R7	0,203		2,8
	R8	0,322	<u>0,263</u>	4,5
R-Spannbreite		0,20-<u>0,57</u>-1,31	2,8-<u>8,0</u>-18,2	15,6-<u>40,8</u>-91,4
2	S1	0,586	0,586	7,0
3	S5	0,418		5,0
	S7	0,268	<u>0,343</u>	3,2
4	S2	0,007	0,007	0,1
5	S4	0,002		0,0
	S6	0,084	<u>0,043</u>	1,0
6	S3	0,002		0,0
	S8	0,022	<u>0,012</u>	0,3
S-Spannbreite		0,00-<u>0,17</u>-0,59	0,0-<u>2,1</u>-7,0	0,1-<u>11,1</u>-33,9
Spannbreite		0,00-<u>0,29</u>-1,31	0,0-<u>3,5</u>-18,2	0,0-<u>20,2</u>-91,4

Mittelwerte wurden unterstrichen.

Tabelle 19: Anzahl der BAK-Meso- und Mikropartikel für B-Netze

Kompostierungszeit Netz Maschenweite [mm]	2 Wochen			3 Wochen						4 Wochen		
	B2			B6			B8			B1		
	<1 mm	1-2mm	2-8mm	<1 mm	1-2mm	2-8mm	<1 mm	1-2mm	2-8mm	<1 mm	1-2mm	2-8mm
Durchgang 1												
Probenmasse (g)	4,65	3,21	9,43	3,52	2,42	3,10	3,55	5,24	9,38	4,27	2,61	3,14
Anzahl Partikel	19	11	2	8	9	2	9	5	5	19	7	6
Anzahl Partikel/100g	408,6	342,7	21,2	227,3	371,9	64,6	253,5	95,4	53,3	444,8	267,8	190,9
Durchgang 2												
Probenmasse (g)	4,78	3,17	2,80	4,80	3,06	3,86	2,70	2,93	3,86	3,84	2,80	3,46
Anzahl Partikel	17	12	3	11	8	1	3	2	4	24	21	18
Anzahl Partikel/100g	355,9	379,0	107,0	229,2	261,2	25,9	110,9	68,4	103,7	624,2	749,8	519,6
Mittelwert												
Anzahl Part. in 100g	382	361	64	228	317	45	182	82	79	534	509	355

Kompostierungszeit Netz Maschenweite	5 Wochen						6 Wochen					
	B5			B7			B3			B4		
	<1 mm	1-2mm	2-8mm	<1 mm	1-2mm	2-8mm	<1 mm	1-2mm	2-8mm	<1 mm	1-2mm	2-8mm
Durchgang 1												
Probenmasse (g)	3,93	3,19	7,92	4,76	3,47	4,20	4,16	3,47	4,68	5,33	3,72	5,10
Anzahl Partikel	11	12	5	16	8	4	8	9	3	18	8	2
Anzahl Partikel/100g	279,9	376,2	63,1	336,1	230,5	95,3	192,3	259,4	64,1	337,7	215,1	39,2
Durchgang 2												
Probenmasse (g)	4,50	4,98	6,57	3,92	2,27	4,58	3,13	2,89	3,92	3,70	3,20	4,90
Anzahl Partikel	17	12	3	6	6	0	8	14	0	21	16	0
Anzahl Partikel/100g	377,4	240,8	45,6	153,2	264,1	0,0	255,3	485,2	0,0	567,1	500,4	0,0
Mittelwert												
Anzahl Part. in 100g	329	308	54	245	247	48	224	372	32	452	358	20

Tabelle 20: Anzahl der BAK-Meso- und Mikropartikel für G-Netze

Kompostierungszeit Netz Maschenweite [mm]	2 Wochen			3 Wochen						4 Wochen		
	G3			G7			G8			G1		
	<1 mm	1-2mm	2-8mm	<1 mm	1-2mm	2-8mm	<1 mm	1-2mm	2-8mm	<1 mm	1-2mm	2-8mm
Durchgang 1												
Probenmasse (g)	3,57	2,18	4,61	3,96	4,55	6,91	5,76	2,63	8,15	4,82	4,04	7,20
Anzahl Partikel	6	4	1	4	5	2	8	12	5	8	10	1
Anzahl Partikel/100g	168,1	183,5	21,7	101,0	109,9	29,0	138,9	456,3	61,4	166,0	247,7	13,9
Durchgang 2												
Probenmasse (g)	3,55	2,67	3,38	3,79	2,92	3,89	3,19	2,43	3,91	3,42	2,80	3,30
Anzahl Partikel	12	8	0	5	4	1	8	5	0	0	6	0
Anzahl Partikel/100g	338,2	299,8	0,0	132,1	137,0	25,7	250,5	205,5	0,0	0,0	214,7	0,0
Mittelwert												
Anzahl Part. in 100g	253	242	11	117	123	27	195	331	31	83	231	7

Kompostierungszeit Netz Maschenweite [mm]	5 Wochen						6 Wochen					
	G5			G6			G2			G4		
	<1 mm	1-2mm	2-8mm	<1 mm	1-2mm	2-8mm	<1 mm	1-2mm	2-8mm	<1 mm	1-2mm	2-8mm
Durchgang 1												
Probenmasse (g)	3,45	3,18	7,57	4,00	3,44	4,92	3,76	2,87	3,75	4,37	3,94	5,98
Anzahl Partikel	2	2	0	11	4	6	11	8	0	6	6	0
Anzahl Partikel/100g	58,0	62,9	0,0	275,0	116,3	121,9	292,6	278,7	0,0	137,3	152,3	0,0
Durchgang 2												
Probenmasse (g)	5,57	4,68	4,73	6,05	4,13	5,13	4,37	2,45	3,55	4,33	2,88	3,45
Anzahl Partikel	12	8	0	5	1	0	16	25	3	11	19	3
Anzahl Partikel/100g	215,3	170,9	0,0	82,7	24,2	0,0	366,4	1022,0	84,6	254,0	659,8	87,0
Mittelwert												
Anzahl Part. in 100g	137	117	0	179	70	61	329	650	42	196	406	43

Tabelle 21: Anzahl der BAK-Meso- und Mikropartikel für R-Netze

Kompostierungszeit Netz Maschenweite [mm]	2 Wochen			3 Wochen						4 Wochen		
	R6			R2			R4			R3		
	1mm	2mm	8mm	1mm	2mm	8mm	1mm	2mm	8mm	1mm	2mm	8mm
Durchgang 1												
Probenmasse (g)	3,99	3,75	4,82	3,35	3,77	4,63	4,33	3,61	7,28	4,99	2,09	3,00
Anzahl Partikel	4	3	0	11	6	4	4	8	10	11	6	1
Anzahl Partikel/100g	100,3	80,0	0,0	328,4	159,2	86,5	92,4	221,4	137,4	220,4	287,7	33,3
Durchgang 2												
Probenmasse (g)	3,77	2,97	3,37	3,25	3,17	3,72	3,51	3,63	4,06	4,24	2,48	5,29
Anzahl Partikel	2	3	2	5	6	2	7	3	0	9	7	1
Anzahl Partikel/100g	53,1	101,0	59,4	154,0	189,4	53,8	199,4	82,5	0,0	212,1	282,3	18,9
Mittelwert												
Anzahl Part. in 100g	77	90	30	241	174	70	146	152	69	216	285	26

Kompostierungszeit Netz Maschenweite [mm]	5 Wochen						6 Wochen					
	R1			R5			R7			R8		
	1mm	2mm	8mm	1mm	2mm	8mm	1mm	2mm	8mm	1mm	2mm	8mm
Durchgang 1												
Probenmasse (g)	4,55	3,71	5,08	3,98	3,62	4,67	4,10	4,48	4,47	4,39	2,30	3,86
Anzahl Partikel	4	3	4	11	6	5	4	8	1	11	6	5
Anzahl Partikel/100g	87,9	80,9	78,7	276,4	165,7	107,2	97,6	178,6	22,3	250,6	260,9	129,4
Durchgang 2												
Probenmasse (g)	4,52	4,15	3,91	3,64	4,37	5,77	3,55	3,42	4,75	3,39	2,72	2,43
Anzahl Partikel	2	3	2	16	15	8	2	3	1	1	12	2
Anzahl Partikel/100g	44,2	72,2	51,1	440,1	342,9	138,7	56,3	87,6	21,1	29,5	441,6	82,4
Mittelwert												
Mittel Anzahl Part. in 100g	66	77	65	358	254	123	77	133	22	140	351	106

Tabelle 22: Anzahl der BAK-Meso- und Mikropartikel für S-Netze

Kompostierungszeit Netz Maschenweite [mm]	2 Wochen			3 Wochen						4 Wochen		
	S1			S5			S7			S2		
	1mm	2mm	8mm	1mm	2mm	8mm	1mm	2mm	8mm	1mm	2mm	8mm
Durchgang 1												
Probenmasse (g)	3,80	3,22	3,44	3,56	1,89	6,90	6,78	2,47	6,43	3,61	2,68	5,88
Anzahl Partikel	2	6	2	8	6	4	11	6	4	0	0	0
Anzahl Partikel/100g	52,6	186,3	58,2	224,7	317,5	58,0	162,2	242,9	62,2	0,0	0,0	0,0
Durchgang 2												
Probenmasse (g)	2,80	1,92	2,37	3,64	3,02	2,08	3,86	2,98	3,63	4,22	2,92	4,34
Anzahl Partikel	3	2	0	2	5	2	3	10	5	1	1	1
Anzahl Partikel/100g	107,2	104,3	0,0	55,0	165,8	96,1	77,7	335,2	137,7	23,7	34,3	23,0
Mittelwert												
Anzahl Part. in 100g	80	145	29	140	242	77	120	289	100	12	17	12

Kompostierungszeit Netz Maschenweite [mm]	5 Wochen						6 Wochen					
	S6			S4			S8			S3		
	1mm	2mm	8mm	1mm	2mm	8mm	1mm	2mm	8mm	1mm	2mm	8mm
Durchgang 1												
Probenmasse (g)	2,52	3,10	2,77	5,00	5,16	5,55	4,48	4,07	6,35	4,17	2,89	6,48
Anzahl Partikel	10	12	11	3	5	3	16	10	1	6	4	2
Anzahl Partikel/100g	396,8	387,1	396,4	60,0	96,9	54,1	357,1	245,7	15,7	143,9	138,4	30,8
Durchgang 2												
Probenmasse (g)	4,22	3,37	3,85	3,42	3,47	5,20	2,96	3,92	3,20	3,29	3,16	5,52
Anzahl Partikel	3	2	0	16	9	0	3	5	0	1	1	1
Anzahl Partikel/100g	71,0	59,3	0,0	468,2	259,6	0,0	101,5	127,4	0,0	30,4	31,6	18,1
Mittelwert												
Anzahl Part. in 100g	234	223	198	264	178	27	229	187	8	87	85	24

Tabelle 23: Restflächen der BAK-Mikro- und Mesopartikel nach Netzausbau

Woche	Netz	Restflächen				Spezifische
		Mikro- partikel (<1mm)	Mikro- partikel (1-2 mm)	Meso- partikel (2-8 mm)	Summe Mikro- und Mesopartikel	Flächensumme
		(% BAK-Beutelfläche)				Mesopartikel (cm ² /L)
2	B2	0,2	0,8	3,4	4,4	18,6
3	B6	0,1	0,4	1,5	2,0	9,4
	B8	0,1	0,1	3,1	3,3	24,1
4	B1	0,5	0,9	11,5	12,9	70,5
5	B5	0,1	0,6	3,0	3,7	25,1
	B7	0,1	0,4	2,0	2,5	15,1
6	B3	0,1	0,7	1,4	2,2	9,7
	B4	0,2	0,9	1,0	2,1	7,1
B-Spannbreite		0,1-<u>0,2</u>-0,5	0,1-<u>0,6</u>-0,9	1,0-<u>3,4</u>-11,5	2,0-<u>4,2</u>-12,9	7,1-<u>22,4</u>-70,5
2	G3	0,1	0,4	0,3	0,8	2,4
3	G7	0,0	0,3	1,8	2,1	13,0
	G8	0,1	0,4	0,8	1,3	6,6
4	G1	0,0	0,5	0,4	1,0	2,4
5	G5	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0
	G6	0,1	0,1	2,6	2,8	22,6
6	G2	0,1	1,0	1,5	2,6	11,4
	G4	0,1	0,9	2,9	3,9	20,2
G-Spannbreite		0,0-<u>0,1</u>-0,1	0,1-<u>0,5</u>-0,9	0,0-<u>1,3</u>-2,9	0,2-<u>1,9</u>-3,9	0,0-<u>9,8</u>-22,6
2	R6	0,0	0,2	1,6	1,8	8,1
3	R2	0,1	0,4	4,9	5,4	22,0
	R4	0,1	0,4	5,1	5,5	24,3
4	R3	0,2	0,7	1,4	2,2	6,5
	R1	0,0	0,2	3,9	4,0	21,4
5	R5	0,3	0,6	6,9	7,9	45,2
	R7	0,0	0,4	1,8	2,2	9,9
6	R8	0,1	0,8	5,4	6,4	30,1
R-Spannbreite		0,0-<u>0,1</u>-0,3	0,2-<u>0,5</u>-0,8	1,4-<u>3,9</u>-6,9	1,8-<u>4,7</u>-7,9	6,5-<u>20,9</u>-45,2
2	S1	0,1	0,4	2,6	3,0	12,6
3	S5	0,1	0,2	1,2	1,5	6,4
	S7	0,1	0,7	4,5	5,3	27,0
4	S2	0,0	0,0	1,0	1,1	5,1
5	S4	0,1	0,4	1,6	2,1	9,0
	S6	0,1	0,4	10,2	10,7	71,7
6	S3	0,1	0,2	1,4	1,7	9,3
	S8	0,1	0,3	0,4	0,9	2,9
S-Spannbreite		0,0-<u>0,1</u>-0,1	0,2-<u>0,3</u>-0,7	0,4-<u>2,9</u>-10,2	0,9-<u>3,3</u>-10,7	2,9-<u>18,0</u>-71,7
Spannbreite		0,0-<u>0,1</u>-0,3	0,1-<u>0,5</u>-0,9	0,0-<u>2,9</u>-11,5	0,2-<u>3,5</u>-12,9	0,0-<u>17,8</u>-71,7

Mittelwerte wurden unterstrichen

Tabelle 24: Flächenzahlen BAK-Mikro-, Meso- und Makropartikel nach Ausbau
(Flächenzahlen Mikro- und Mesopartikel bzw. Makropartikel nicht direkt vergleichbar: unterschiedliche Methoden)

Partikeltyp		Mikropartikel <1mm		Mikropartikel 1-2mm		Mesopartikel 2-8mm		Makropartikel >8mm	
Woche	Netz	Einzelwert	Mittelwert	Einzelwert	Mittelwert	Einzelwert	Mittelwert	Einzelwert	Mittelwert
(m ² / Netz)									
2	<u>B2</u>	0,017	<u>0,017</u>	0,072	<u>0,072</u>	0,315	<u>0,315</u>	0,492	<u>0,492</u>
3	<u>B6</u>	0,007	<u>0,007</u>	0,036	<u>0,024</u>	0,140	<u>0,215</u>	1,000	<u>0,590</u>
	<u>B8</u>	0,007	<u>0,007</u>	0,012	<u>0,012</u>	0,289	<u>0,215</u>	0,180	<u>0,180</u>
4	<u>B1</u>	0,043	<u>0,043</u>	0,087	<u>0,087</u>	1,058	<u>1,058</u>	0,141	<u>0,141</u>
5	<u>B5</u>	0,011	<u>0,011</u>	0,056	<u>0,048</u>	0,276	<u>0,229</u>	0,211	<u>0,119</u>
	<u>B7</u>	0,011	<u>0,011</u>	0,040	<u>0,040</u>	0,181	<u>0,181</u>	0,027	<u>0,027</u>
6	<u>B3</u>	0,012	<u>0,016</u>	0,064	<u>0,073</u>	0,126	<u>0,109</u>	0,151	<u>0,172</u>
	<u>B4</u>	0,020	<u>0,016</u>	0,082	<u>0,073</u>	0,092	<u>0,109</u>	0,192	<u>0,192</u>
<i>B-Spannweite</i>		<i>0,0-0,0-0,0</i>		<i>0,0-0,1-0,1</i>		<i>0,1-0,3-1,1</i>		<i>0,0-0,3-1,0</i>	
2	<u>G3</u>	0,011	<u>0,011</u>	0,036	<u>0,036</u>	0,034	<u>0,034</u>	0,286	<u>0,286</u>
3	<u>G7</u>	0,003	<u>0,006</u>	0,025	<u>0,033</u>	0,176	<u>0,127</u>	0,005	<u>0,226</u>
	<u>G8</u>	0,010	<u>0,010</u>	0,042	<u>0,042</u>	0,079	<u>0,079</u>	0,446	<u>0,446</u>
4	<u>G1</u>	0,004	<u>0,004</u>	0,052	<u>0,052</u>	0,040	<u>0,040</u>	0,010	<u>0,010</u>
5	<u>G5</u>	0,004	<u>0,007</u>	0,019	<u>0,017</u>	0,000	<u>0,124</u>	0,000	<u>0,012</u>
	<u>G6</u>	0,011	<u>0,011</u>	0,014	<u>0,014</u>	0,248	<u>0,248</u>	0,024	<u>0,024</u>
6	<u>G2</u>	0,013	<u>0,011</u>	0,095	<u>0,092</u>	0,148	<u>0,215</u>	0,022	<u>0,011</u>
	<u>G4</u>	0,009	<u>0,009</u>	0,089	<u>0,089</u>	0,283	<u>0,283</u>	0,000	<u>0,000</u>
<i>G-Spannweite</i>		<i>0,0-0,0-0,0</i>		<i>0,0-0,0-0,1</i>		<i>0,0-0,1-0,3</i>		<i>0,0-0,1-0,4</i>	
2	<u>R6</u>	0,002	<u>0,002</u>	0,012	<u>0,012</u>	0,116	<u>0,116</u>	1,307	<u>1,307</u>
3	<u>R2</u>	0,006	<u>0,006</u>	0,029	<u>0,028</u>	0,352	<u>0,358</u>	1,000	<u>0,853</u>
	<u>R4</u>	0,006	<u>0,006</u>	0,026	<u>0,026</u>	0,365	<u>0,365</u>	0,706	<u>0,706</u>
4	<u>R3</u>	0,015	<u>0,015</u>	0,049	<u>0,049</u>	0,098	<u>0,098</u>	0,357	<u>0,357</u>
5	<u>R1</u>	0,002	<u>0,012</u>	0,012	<u>0,029</u>	0,278	<u>0,388</u>	0,213	<u>0,352</u>
	<u>R5</u>	0,023	<u>0,023</u>	0,046	<u>0,046</u>	0,497	<u>0,497</u>	0,490	<u>0,490</u>
6	<u>R7</u>	0,003	<u>0,007</u>	0,030	<u>0,045</u>	0,128	<u>0,260</u>	0,203	<u>0,263</u>
	<u>R8</u>	0,010	<u>0,010</u>	0,061	<u>0,061</u>	0,391	<u>0,391</u>	0,322	<u>0,322</u>
<i>R-Spannweite</i>		<i>0,0-0,0-0,0</i>		<i>0,0-0,0-0,1</i>		<i>0,1-0,3-0,4</i>		<i>0,2-0,6-1,3</i>	
2	<u>S1</u>	0,004	<u>0,004</u>	0,033	<u>0,033</u>	0,217	<u>0,217</u>	0,586	<u>0,586</u>
3	<u>S5</u>	0,005	<u>0,008</u>	0,021	<u>0,041</u>	0,103	<u>0,240</u>	0,418	<u>0,343</u>
	<u>S7</u>	0,011	<u>0,011</u>	0,060	<u>0,060</u>	0,378	<u>0,378</u>	0,268	<u>0,268</u>
4	<u>S2</u>	0,000	<u>0,000</u>	0,004	<u>0,004</u>	0,085	<u>0,085</u>	0,007	<u>0,007</u>
5	<u>S4</u>	0,012	<u>0,011</u>	0,033	<u>0,031</u>	0,131	<u>0,495</u>	0,002	<u>0,043</u>
	<u>S6</u>	0,009	<u>0,009</u>	0,030	<u>0,030</u>	0,860	<u>0,860</u>	0,084	<u>0,084</u>
6	<u>S3</u>	0,005	<u>0,008</u>	0,014	<u>0,022</u>	0,121	<u>0,079</u>	0,002	<u>0,012</u>
	<u>S8</u>	0,011	<u>0,011</u>	0,029	<u>0,029</u>	0,038	<u>0,038</u>	0,022	<u>0,022</u>
<i>S-Spannweite</i>		<i>0,0-0,0-0,0</i>		<i>0,0-0,0-0,1</i>		<i>0,0-0,2-0,9</i>		<i>0,0-0,2-0,6</i>	
Spannweite		0,0-0,0-0,0		0,0-0,0-0,1		0,0-0,2-1,1		0,0-0,1-1,3	

Mittelwerte wurden unterstrichen.

Tabelle 25: Kumulative Restflächen- und Restmassen sowie Abbaugrade nach Fläche und Masse
(Summen Mikro-, Meso- und Makropartikel; bezogen auf Ausgangsflächen und -massen von 20 Beuteln pro Netz)

Woche	Netz	Gesamt-Partikel: Fläche			Gesamt-Partikel: Masse		
		Summe Flächenzahl Ausbau	Rest-Fläche	Flächen- Abbaugrad	Summe Masse	Rest-Masse	Masse- Abbaugrad
		(m ² / Netz)	(% BAK-Beutelfläche)		(g / Netz)	(% BAK-Beutelmasse)	
2	B2	0,90	9,7	90,3	78,0	35,7	64,3
3	B6	1,18	12,9	87,1	161,4	73,8	26,2
	B8	0,49	5,3	94,7	48,9	22,4	77,6
4	B1	1,33	14,4	85,6	60,2	27,5	72,5
5	B5	0,56	6,0	94,0	64,5	29,5	70,5
	B7	0,26	2,8	97,2	14,0	6,4	93,6
6	B3	0,35	3,8	96,2	27,2	12,5	87,5
	B4	0,39	4,2	95,8	35,0	16,0	84,0
B-Spannweite:		0,3- <u>0,68</u> -1,3	3,8- <u>7,4</u> -14,4	87- <u>92,6</u> -97	14- <u>61,1</u> -161	6,4- <u>28,0</u> -74	26- <u>72,0</u> -94
2	G3	0,37	3,8	96,2	56,8	27,5	72,5
3	G7	0,21	2,2	97,8	9,6	4,6	95,4
	G8	0,58	5,9	94,1	62,6	30,3	69,7
4	G1	0,11	1,1	98,9	3,4	1,7	98,3
5	G5	0,02	0,2	99,8	0,5	0,3	99,7
	G6	0,30	3,1	96,9	11,2	5,4	94,6
6	G2	0,28	2,9	97,1	10,6	5,1	94,9
	G4	0,38	3,9	96,1	8,5	4,1	95,9
G-Spannweite:		0,0- <u>0,28</u> -0,6	0,2- <u>2,9</u> -5,9	94- <u>97,1</u> -100	0,5- <u>20,4</u> -63	0,3- <u>9,9</u> -30	73- <u>90,1</u> -100
2	R6	1,44	20,0	80,0	284,1	156,0	-56,0
3	R2	1,39	19,3	80,7	141,8	77,9	22,1
	R4	1,10	15,3	84,7	111,2	61,1	38,9
4	R3	0,52	7,2	92,8	53,3	29,3	70,7
5	R1	0,50	7,0	93,0	37,8	20,8	79,2
	R5	1,06	14,7	85,3	75,8	41,6	58,4
6	R7	0,36	5,1	94,9	37,3	20,5	79,5
	R8	0,78	10,9	89,1	63,6	34,9	65,1
R-Spannweite: (*)		0,4- <u>0,89</u> -1,4	5,1- <u>12,4</u> -20	80- <u>87,6</u> -95	38- <u>74,4</u> -142	21- <u>40,9</u> -78	22- <u>59,1</u> -80
2	S1	0,84	10,0	90,0	132,4	73,8	26,2
3	S5	0,55	5,9	94,1	7,7	4,3	95,7
	S7	0,72	7,8	92,2	51,1	28,5	71,5
4	S2	0,10	1,0	99,0	2,3	1,3	98,7
5	S4	0,18	1,9	98,1	5,8	3,2	96,8
	S6	0,98	10,7	89,3	35,7	19,9	80,1
6	S3	0,14	1,5	98,5	3,0	1,7	98,3
	S8	0,10	1,1	98,9	12,5	6,9	93,1
S-Spannweite:		0,1- <u>0,45</u> -1,0	1,0- <u>5,0</u> -11	89- <u>95,0</u> -99	2,3- <u>31,3</u> -132	1,3- <u>17,4</u> -74	26- <u>82,6</u> -99
Gesamt-Spannweite:		0,0- <u>0,58</u> -1,4	0,2- <u>6,9</u> -20	80- <u>93,1</u> -100	0,5- <u>46,8</u> -142	0,3- <u>24,0</u> -78	26- <u>76,0</u> -100

Mittelwerte wurden unterstrichen. (*): Massen-Mittelwerte ohne R6

Tabelle 26: Restmasseanteile an BAK-Mikro- und Mesopartikeln

Partikeltyp		Mikropartikel <1 mm		Mikropartikel 1-2 mm		Mesopartikel 2-8 mm	
Woche	Netz	Einzelwert	Mittelwert	Einzelwert	Mittelwert	Einzelwert	Mittelwert
(% BAK-Beutelmasse)							
2	<u>B2</u>	0,2	0,2	0,8	0,8	3,4	3,4
3	<u>B6</u>	0,1	0,1	0,4	0,3	1,5	2,3
	<u>B8</u>	0,1		0,1		3,2	
4	<u>B1</u>	0,5	0,5	0,9	0,9	11,5	11,5
5	<u>B5</u>	0,1	0,1	0,6	0,5	3,0	2,5
	<u>B7</u>	0,1		0,4		2,0	
6	<u>B3</u>	0,1	0,2	0,7	0,8	1,4	1,2
	<u>B4</u>	0,2		0,9		1,0	
<i>B-Spannweite</i>		<i>0,1-<u>0,2</u>-0,5</i>		<i>0,1-<u>0,6</u>-0,9</i>		<i>1,0-<u>3,4</u>-11,5</i>	
2	<u>G3</u>	0,1	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4
3	<u>G7</u>	0,0	0,1	0,3	0,0	1,8	0,1
	<u>G8</u>	0,1		0,4		0,8	
4	<u>G1</u>	0,0	0,0	0,5	0,5	0,4	0,4
5	<u>G5</u>	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1
	<u>G6</u>	0,1		0,1		2,6	
6	<u>G2</u>	0,1	0,1	1,0	0,1	1,5	0,2
	<u>G4</u>	0,1		0,9		2,9	
<i>G-Spannweite</i>		<i>0,0-<u>0,1</u>-0,1</i>		<i>0,1-<u>0,5</u>-1,0</i>		<i>0,0-1,3-2,9</i>	
2	<u>R6</u>	0,0	0,0	0,2	0,2	1,6	1,6
3	<u>R2</u>	0,1	0,1	0,4	0,4	4,9	5,0
	<u>R4</u>	0,1		0,4		5,1	
4	<u>R3</u>	0,2	0,2	0,7	0,7	1,4	1,4
5	<u>R1</u>	0,0	0,2	0,2	0,4	3,9	5,4
	<u>R5</u>	0,3		0,7		6,9	
6	<u>R7</u>	0,0	0,1	0,4	0,7	1,8	3,6
	<u>R8</u>	0,1		0,9		5,5	
<i>R-Spannweite</i>		<i>0,0-<u>0,1</u>-0,3</i>		<i>0,2-<u>0,5</u>-0,9</i>		<i>1,4-<u>3,9</u>-6,9</i>	
2	<u>S1</u>	0,0	0,0	0,4	0,4	2,6	2,6
3	<u>S5</u>	0,1	0,1	0,2	0,5	1,2	2,9
	<u>S7</u>	0,1		0,7		4,5	
4	<u>S2</u>	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0
5	<u>S4</u>	0,1	0,1	0,4	0,4	1,6	5,9
	<u>S6</u>	0,1		0,4		10,2	
6	<u>S3</u>	0,1	0,1	0,2	0,3	1,4	0,9
	<u>S8</u>	0,1		0,3		0,5	
<i>S-Spannweite</i>		<i>0,0-<u>0,1</u>-0,1</i>		<i>0,0-<u>0,3</u>-0,7</i>		<i>0,5-<u>2,9</u>-10,2</i>	
<i>Spannweite</i>		<i>0,0-<u>0,1</u>-0,5</i>		<i>0,0-<u>0,3</u>-1,0</i>		<i>0,0-<u>2,9</u>-11,5</i>	

Mittelwerte wurden unterstrichen.

8 Anlagen – Abbildungen

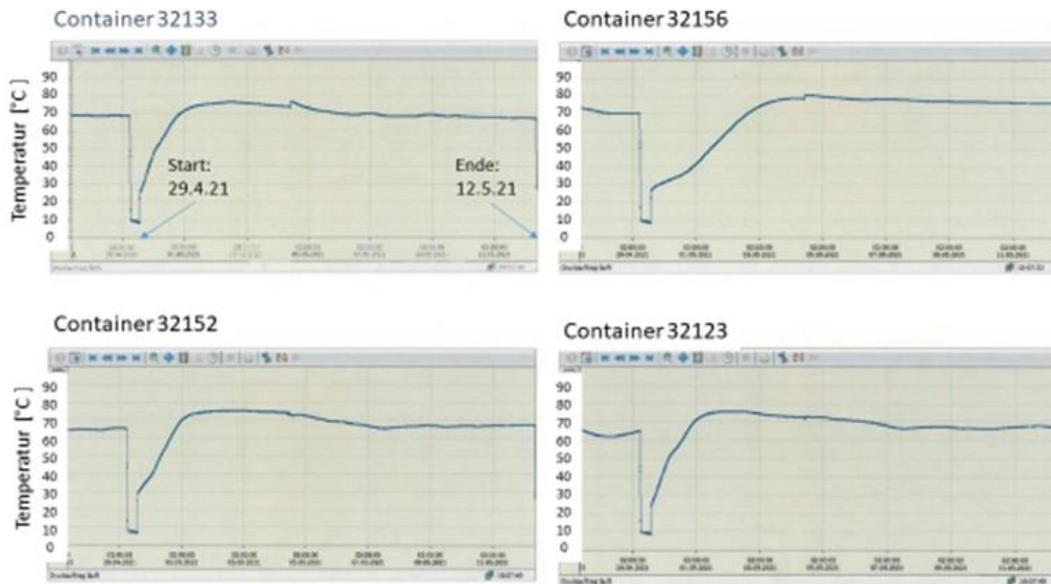


Abbildung 28: Temperaturverläufe in den Containern während der Hauptrottephase

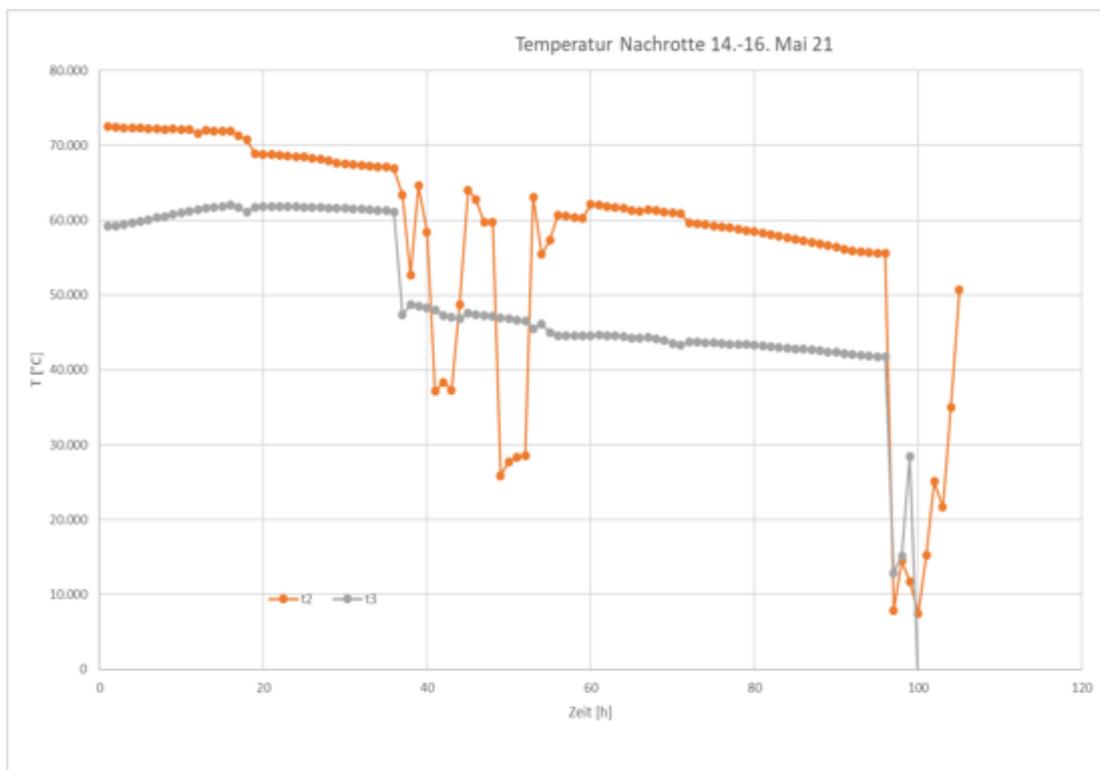


Abbildung 29: Exemplarischer Temperaturverlauf in der Nachrottemiete
Die starken Schwankungen an einigen Versuchstagen waren auf Störungen im Mess-System zurückzuführen.