

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing./DI) der Studienrichtung „Industrieller Umweltschutz, Entsorgungstechnik und Recycling“ an der Montanuniversität Leoben.

Charakterisierung von Abfällen aus dem Handelskettenbereich

erstellt für

Saubermacher Dienstleistungs AG

Vorgelegt von:

Martha Barth, BSc

m0335224

Betreuer:

Univ.-Prof. DI Dr. mont. Roland Pomberger

DI Dr. mont. Gernot Kreindl

Leoben, 09.06.2014

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich all jenen herzlich danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt dem Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, insbesondere meinen Betreuern Herrn Dr. mont. Kreindl sowie Herrn Prof. Pomberger für die Betreuung der Diplomarbeit und die angeregten Diskussionen und Hilfestellungen.

Ebenso danke ich der Firma Saubermacher für das Bereitstellen dieses interessanten Themas der Masterarbeit. Im Besonderen danke ich Herrn Ing. Kazda für die Hilfsbereitschaft welche er mir entgegenbrachte. Danken möchte ich außerdem jenen Mitarbeitern der Firma Saubermacher, die mich im Rahmen meiner Sortiersuche tatkräftig unterstützten sowie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Labors für Umwelt- und Prozessanalytik für ihre Unterstützung bei der Laboranalytik.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mich unterstützten und mir mein Studium ermöglichten.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinem Freund, der mich immer wieder ermutigte und mit vielen hilfreichen Tipps zur Diplomarbeit beigetragen hat.

Schließlich sollen auch meine Studienkollegen und Freunde nicht unerwähnt bleibe, die mir neue Motivation für meine Arbeit gegeben haben.

Kurzfassung

Charakterisierung von Abfällen aus dem Handelskettenbereich

In Österreich werden hausmüllähnliche Gewerbeabfälle je nach der gesetzlichen Lage jedes Bundeslandes entweder gemeinsam mit der kommunalen Systemmüllabfuhr oder getrennt behandelt. Tatsache ist, dass kaum Datenmaterial zur umfassenden stofflichen und chemisch-physikalischen Charakterisierung von Restmüll und Biomüll einzelner Branchen existiert. So wurde im Rahmen einer Untersuchung jener Teilstrom des Rest- und Biomülls, welcher im Handelskettenbereich anfällt, stofflich und chemisch-physikalisch analysiert. Dabei wurde eine repräsentative Anzahl an Rest- bzw. Biomülltonnen aus Supermärkten der Stadt Wien und dem direkten Einzugsgebiet ausgewählt und zwei Sortieranalysen inklusive Probenahmen zur Laboranalytik durchgeführt. Diese Sortierungen zeigen, dass der untersuchte Restmüll zu mehr als der Hälfte aus biogenen Fraktionen besteht. Im untersuchten Biomüll wurde 70 % biogenes Material ohne jegliche Verpackung vorgefunden und 23 % bestanden aus überlagerten Lebensmitteln. Der restliche Anteil ist den Fraktionen „trockene Wertstoffe“ und „Sortierrest“ zuzuordnen. Aus den Laborergebnissen ist zu entnehmen, dass der untersuchte Abfall sehr feucht und energiearm ist. Somit kann festgehalten werden, dass die Restmüll- und Biomülltonnen aus dem Handelskettenbereich nicht mit jenen aus Haushalten vergleichbar sind. Mit Hilfe einer Grobbilanzierung der Klimaschutzpotentiale wird abschließend eine vergleichende Betrachtung der aeroben, anaeroben und thermischen Behandlungsmöglichkeiten der gegenständlichen Abfälle aus den Supermärkten durchgeführt.

Abstract

Characterization of waste materials originating from supermarkets

In Austria, commercial and industrial waste are collected and treated either along with household waste or separately, according to the legal framework in each state. However, there is a lack of detailed information about the composition of residual and organic waste streams from different industrial sectors. In order to fill this gap, the residual and organic waste bins from several supermarkets in the city of Vienna and its nearby suburbs have been sorted and analysed twice to quantify the potential of compostable materials. As a result, it is found that more than the half of the sorted residual waste contained indeed compostable material. In the sorted organic waste, the “only organic matter” fraction accounts for approximately 70 % and that of the “wrapped organic matter” for approximately 23 %. The remaining portion consists of “dry resources” and “sorting residue”. Laboratory analyses show that the objective waste has a high moisture and low energy content. Additionally, sorting analyses show that the residual and organic residues from supermarkets have different composition from those originated in private households. Finally, a rough balance study of climate change potentials comparing aerobic, anaerobic and thermal treatment of the subject waste from the supermarkets is carried out.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	8
1.1 Problemstellung	8
1.2 Zielsetzung	8
2 RECHTLICHE UND NORMATIVE GRUNDLAGEN.....	10
2.1 Rechtliche Grundlagen	10
2.1.1 Regelungen auf EU-Ebene.....	11
2.1.1.1 Abfallrahmenrichtlinie.....	11
2.1.1.2 EU-Deponierichtlinie	12
2.1.2 Regelungen in Österreich.....	12
2.1.2.1 Abfallwirtschaftsgesetz.....	13
2.1.2.2 Verordnung über die getrennte Sammlung biogener Abfälle	15
2.1.2.3 Abfallverzeichnisverordnung	16
2.1.2.4 Bundesabfallwirtschaftsplan 2011.....	17
2.1.3 Regelungen der Länder	18
2.1.3.1 Wiener Abfallwirtschaftsgesetz	19
2.1.3.2 Wiener Abfallwirtschaftsplan	20
2.2 Normative Grundlagen	21
2.2.1 ÖNORM S 2097 – Sortieranalyse von Abfällen.....	21
2.2.2 ÖNORM S 2123 – Probenahmepläne für Abfälle	22
3 GRUNDLAGEN DER ANAEROBEN BEHANDLUNG VON ABFÄLLEN.....	23
3.1 Der anaerobe Abbauprozess.....	23
3.1.1 Hydrolyse.....	24
3.1.2 Acidogenese	25
3.1.3 Acetogenese.....	25
3.1.4 Methanogenese	26
3.1.5 Weitere Prozesse	27
3.2 Verfahrenstechnik der Bioabfallvergärung	28
3.2.1 Anlieferung und Lagerung der biogenen Abfälle	29
3.2.2 Vorbehandlung von Abfällen.....	30
3.2.3 Rückstände der Vorbehandlung	31
3.3 Verfahrenstechnische Unterschiede bei der Vergärung.....	31
3.4 Rückstände und Nachbehandlung der Outputströme nach der Vergärung...	33
3.4.1 Biogas.....	33

3.5	Co-Vergärung	36
3.6	Vergleich Vergärung - Kompostierung	38
4	SITUATION DER ABFALLENTSORGUNG AUS HANDELSKETTEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET	41
4.1	Lebensmitteleinzelhandel in Österreich.....	41
4.2	Nicht mehr verkehrsfähige Lebensmittel	42
4.3	Abfallaufkommen im Lebensmitteleinzelhandel	43
4.4	Andienungszwang	44
4.5	Sammelsystem – Logistik.....	45
4.6	Behandlungsmöglichkeiten von Abfällen aus dem Handelskettenbereich	46
4.6.1	Restmüll- und Biomüllaufkommen	47
4.6.2	Behandlungswege	47
4.6.2.1	Thermische Behandlung	47
4.6.2.2	Anaerobe biotechnische Behandlung	47
4.6.2.3	Aerobe biotechnische Behandlung	48
5	CHARAKTERISIERUNG DER ABFÄLLE	49
5.1	Sortieranalyse.....	49
5.1.1	Versuchsablauf.....	49
5.1.2	Probenahme	52
5.1.3	Dokumentation des Sortierversuches.....	53
5.2	Laboranalytik	53
5.2.1	Analysenmethoden	54
5.3	Darstellung der Ergebnisse	57
5.3.1	Sortieranalyse.....	57
5.3.1.1	Restmüllzusammensetzung	58
5.3.1.2	Biomüllzusammensetzung	60
5.3.1.3	Gegenüberstellung Biomüll- und Restmülltonne.....	62
5.3.2	Laboranalytik	63
5.3.2.1	pH-Wert.....	63
5.3.2.2	Trockenrückstand.....	64
5.3.2.3	Brennwert und Heizwert.....	65
5.3.2.4	Gesamt organisch gebundener Kohlenstoff im Feststoff und Eluat sowie Glühverlust.....	66
5.3.2.5	Biogener Kohlenstoffanteil	68
5.3.2.6	Kohlenwasserstoff-Index im Feststoff	69
5.3.2.7	Summe Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol im Feststoff und Summe der 16 PAKs nach EPA im Feststoff.....	70

6 TREIBHAUSGASBILANZ	71
6.1 Kompostierung	73
6.2 Vergärung	79
6.3 Müllverbrennungsanlage	87
7 ABSCHLIEßENDE INTERPRETATION DER ERGEBNISSE.....	92
7.1 Sortierung	92
7.2 Laboranalysen	93
7.2.1 Behandlungsmöglichkeiten auf Basis der Laboranalysen	93
7.3 Treibhausgasbilanz – Vergleich der Szenarien	94
8 ZUSAMMENFASSUNG.....	98
9 VERZEICHNISSE	100
9.1 Literatur	100
9.2 Abkürzungsverzeichnis.....	108
9.3 Tabellen.....	111
9.4 Abbildungen.....	113
ANHANG.....	I

1 Einleitung

„Siedlungsabfälle“ sind Abfälle aus privaten Haushalten und andere Abfälle, die aufgrund ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus privaten Haushalten ähnlich sind [1]. Es fallen ebenso gemischte Siedlungsabfälle (so genannt „Restmüll“) sowohl in privaten Haushalten, als auch in Gewerbe- und Industriebetrieben an. Die bis jetzt in Österreich durchgeführte gemeinsame Sammlung und Behandlung führt immer wieder zu kontroversen Diskussionen betreffend der Notwendigkeit bzw. Sinnhaftigkeit. Es sei angemerkt, dass sowohl die kommunale Abfallwirtschaft, als auch die private Entsorgungswirtschaft in diesem Bereich derzeit tätig sind. Beispielsweise ist im Wiener Abfallwirtschaftsgesetz geregelt, dass die Stadt Wien für die Sammlung und Entsorgung der Restmüllmengen aus Gewerbebetrieben zuständig ist.

Den Hintergrund zur Erstellung dieser Arbeit bildet die kontroverse Diskussion bezüglich der Frage, ob der Teilstrom von hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen aus dem Handelskettenbereich getrennt oder gemeinsam mit dem kommunalen Restmüll gesammelt und behandelt werden soll. Eine Grundlage für die Zuordnung von Restmüll und Biomüll aus Handelsketten zu Behandlungsverfahren soll basierend auf den Zielen des Abfallwirtschaftsgesetzes (AWG 2002, [1]) erarbeitet werden.

1.1 Problemstellung

Bis dato existiert in Österreich kaum Datenmaterial zur umfassenden stofflichen und chemisch-physikalischen Charakterisierung von Restmüll und Biomüll aus dem Handelskettenbereich. Restmüllanalysen werden in Österreich zwar wiederkehrend, auf Regionen bzw. Einzugsgebiete bezogen, seit langem durchgeführt, jedoch wird bei den Restmüllanalysen jener Teilstrom der „hausmüllähnlichen“ Gewerbeabfälle, welche im Zuge der kommunalen Abfuhr entsorgt werden, nicht getrennt erfasst. Eine branchenspezifische Restmüllanalyse ist wiederum aus dem Grund der auf Bundesländerebene geregelten Andienungspflicht nicht möglich.

1.2 Zielsetzung

Um festzustellen, welche stoffliche und chemisch-physikalische Zusammensetzung der bei Handelsketten anfallende Rest- und Biomüll aufweist, insbesondere wie groß der biogene Anteil der beiden Müllfraktionen ist, wurden Untersuchungen des Abfalls aus Handelsketten die Stadt Wien bzw. das direkte Einzugsgebiet von Wien betreffend, durchgeführt. Neben der Sortieranalyse zur Bestimmung der Abfallzusammensetzung wurde auch auf die Analyse von chemisch-physikalischen Parametern Wert gelegt. Darauf basierend können mögliche Verwertungswege für den Rest- und Biomüll aus dem Handelskettenbereich abgeleitet werden.

Anhand von bereits vorliegenden und im Zuge der Feldversuche gewonnenen Daten wird eine Charakterisierung des Rest- und Biomülls von Handelsketten durchgeführt. Darauf aufbauend werden Verwertungswege identifiziert, die aus Sicht des Klima- und Ressourcenschutzes zielführender sein würden. Die Optimierungsmöglichkeiten betreffen

sowohl die Umlenkung der Stoffströme in andere Entsorgungs- bzw. Verwertungswege, als auch Effizienzsteigerungen bei der Nutzung der Biomasse.

Ausgehend von der Betrachtung der rechtlichen Rahmenbedingungen in Österreich, insbesondere für den Großraum Wien, sowie auf Basis von einschlägigen Normen (siehe Pkt. 3 „Normative Grundlagen“), nach denen die praktischen Sortiersuche zur Materialcharakterisierung abgearbeitet werden sollen, besteht der Inhalt dieser Arbeit in der Ausarbeitung folgender Themengebiete und der Beantwortung von Fragestellungen im Bezug auf:

- die Ermittlung der stofflichen und chemisch-physikalischen Zusammensetzung, im Besonderen des Anteils an biogenem Material, des bei Handelsketten anfallenden Rest- und Biomülls anhand von Sortieranalysen, Probenahmen und analytischen Untersuchungen im Labor.
- die Beschreibung der derzeitigen Verwertungswege und Überprüfung von alternativen Verwertungsmöglichkeiten anhand vordefinierter Parameter.
- die Erstellung von Treibhausgasbilanzen für die aerobe, anaerobe und thermische Behandlung von Rest- und Biomüll aus Supermärkten.

Abgeleitet daraus lässt sich folgende zentrale Fragestellung der Arbeit ableiten: Wie ist der Müll – genauer gesagt der Abfall aus Biomülltonnen und Restmülltonnen – aus Supermärkten zusammengesetzt und wie kann dessen Potential am effizientesten genutzt werden?

2 Rechtliche und normative Grundlagen

Dieses Kapitel beinhaltet die für diese Arbeit relevanten rechtlichen und normativen Grundlagen. Im ersten Abschnitt wird zu Beginn auf das für diese Arbeit relevante europäische Recht, die Abfallrahmenrichtlinie sowie die EU-Deponierichtlinie eingegangen. Anschließend wird das österreichische Abfallrecht kurz dargelegt und folglich aus den entsprechenden abfallwirtschaftlichen Regelungen der Stadt Wien zitiert. Der zweite Teil des Kapitels zeigt die relevanten Normen auf dem Gebiet der Abfallsortierung sowie der Probenahme auf. Im Konkreten werden entsprechend dem Ablauf die praktischen Arbeiten der Sortieranalyse die entsprechend der ÖNORM-Serie S 2097 [15], [16], [17], [18] durchgeführt wurden, beschrieben. Anschließend folgen die normativen Vorgaben der Probenahme mit der zum Zeitpunkt gültigen ÖNORM S 2123-1 „Beprobung von Haufen“ [19] sowie der ÖNORM S 2123-3 „Beprobung fester Abfälle aus Stoffströmen“ [20]. Auf die ÖNORM S 2100, die u.a. die Zuordnung von Abfällen zu Abfallarten festlegt, wird in diesem Kapitel nicht gesondert eingegangen (siehe Kapitel 2.2.4 „Abfallverzeichnisverordnung“).

2.1 Rechtliche Grundlagen

Im Rahmen dieser Arbeit wird mit Definitionen von Abfallarten umgegangen, die im Folgenden überblicksmäßig dargestellt werden:

Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall sind feste Abfälle aus Industrie und Gewerbe, die nach der getrennten Sammlung (z.B. von Altstoffen, Produktionsabfällen, Baurestmassen oder gefährlichen Abfällen) anfallen. Gemäß ÖNORM S 2100 werden diese Abfälle der Schlüsselnummer 91101 mit der Bezeichnung „Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle“ [3] zugeordnet. Der hausmüllähnliche Gewerbeabfall ist der betriebliche Restmüll. In der Literatur wird dieser Abfall noch unterteilt in Geschäftsmüll und Gewerbemüll [4, S. 5]. Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall, der im Holsystem gemeinsam mit dem Hausmüll durch die kommunale Entsorgung erfasst wird, wird als Geschäftsmüll bezeichnet. Gewerbemüll ist jener Teil des betrieblichen Restmülls, der durch private Entsorgungsunternehmen getrennt von der kommunalen Sammlung übernommen wird [4, S. 5].

Bioabfälle definiert die Bioabfallverordnung als die im Siedlungsabfall enthaltenen biologisch abbaubaren organischen Abfallanteile (z.B. organische Küchenabfälle, Gartenabfälle). Diese Abfälle fallen in Haushalten an und unterscheiden sich von Garten- und Parkabfällen, die auf gärtnerisch genutzten Grundstücken, in öffentlichen Parkanlagen sowie als Straßenbegleitgrün anfallen [5, § 1 u. 2].

Restmüll ist jener Anteil des festen Abfalls mit Ausnahme des Sperrmülls und der getrennt gesammelten Abfälle wie Altstoffe (Papier, Glas, Metalle, Kunststoffe und andere), biogene Abfälle und Problemstoffe, die in Haushalten und ähnlichen Einrichtungen üblicherweise anfallen. Die Sammlung erfolgt unter Verwendung genormter Abfallbehälter [6, S. 44].

2.1.1 Regelungen auf EU-Ebene

Aufgrund des Beitritts Österreichs zur Europäischen Union (EU) im Jahr 1995 ergab sich auch im Bereich der Abfallwirtschaft die Verpflichtung, Anpassungen an das EU-Recht vorzunehmen. Hinsichtlich der gegenständlichen Arbeit sind im Bereich der EU die folgenden angeführten Rechtsakte von Belang.

2.1.1.1 Abfallrahmenrichtlinie

Die Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien [7], welche mit 12. Dezember 2008 in Kraft getreten ist, sieht als oberstes Ziel jeder Abfallpolitik, die nachteiligen Auswirkungen der Abfallerzeugung und -bewirtschaftung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu minimieren. Ressourcenschonung und die Förderung der Umsetzung der fünfstufigen neuen Abfallhierarchie ist ebenfalls Gegenstand der Abfallpolitik eines Mitgliedstaates.

Schwerpunkt der Richtlinie sind zahlreiche Maßnahmen wie die neue fünfstufige Abfallhierarchie, zwingende Recycling-Quoten, Abfallvermeidungsprogramme, Einführung von Lebenszyklen, Herstellerverantwortung und verbesserte Definitionen (Abfall, Abgrenzung zu Produkt und Nebenprodukt). Diese Maßnahmen sollen die Grundlagen für eine verbesserte Abfallwirtschaft darstellen und eine Entwicklung hin zur Recycling-Gesellschaft ermöglichen. Weiters soll das Abfallaufkommen vom Wirtschaftswachstum entkoppelt werden [7].

Die Richtlinie gilt grundsätzlich für Abfälle, nicht jedoch für [7, Art. 2]:

- gasförmige Ableitungen in die Atmosphäre;
- Böden (in situ), einschließlich nicht ausgehobener kontaminierter Böden;
- (nicht kontaminierten) Bodenaushub, sofern der Aushub am Ort wieder für Bauzwecke verwendet wird;
- radioaktive Abfälle;
- ausgesonderte Sprengstoffe;
- Fäkalien, Stroh und andere nicht gefährliche land- und forstwirtschaftliche Materialien, soweit in der Land- oder Forstwirtschaft oder zur Energieerzeugung (Biomasse) einsetzbar;
- Abwässer, tierische Nebenprodukte und Bergbauabfälle, soweit durch andere Gemeinschaftsrechtsakte abgedeckt.

Wesentlicher Bestandteil der Abfallrahmenrichtlinie ist die Einführung einer fünfstufigen Abfallhierarchie, von der ein Mitgliedstaat Abweichungen für bestimmte Abfallströme zulassen kann, soweit dies durch Lebenszyklusdenken insgesamt gerechtfertigt ist. Die bisherige dreistufige Abfallhierarchie (Vermeiden, Verwerten, Beseitigen) wird durch die folgende fünfstufige Rangfolge ersetzt [7, Art. 4]:

1. Vermeidung,
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung,
3. Recycling,
4. sonstige Verwertung, z.B. energetische Verwertung, und
5. Beseitigung.

Im Europarecht existiert kein eigenes Regelwerk betreffend der Lenkung von Bioabfällen. Der Umgang mit Bioabfällen ist in der Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union wie folgt definiert: Die Mitgliedstaaten sollen geeignete Maßnahmen treffen, um die getrennte Sammlung von Bioabfällen zum Zweck der Kompostierung und Vergärung sicherzustellen. Darüber hinaus soll die Behandlung von Bioabfällen ein hohes Maß an Umweltschutz gewährleisten und die Verwendung von umweltverträglichen Materialien aus Bioabfällen gefördert werden [7, Art. 22].

2.1.1.2 EU-Deponierichtlinie

Die Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien [8] hat zum Ziel, negative Auswirkungen auf die Umwelt durch die Ablagerung von Abfällen zu vermeiden oder zu vermindern. Es sollen einheitliche Standards für Deponien bzw. für das Ablagern von Abfällen in Europa geschaffen werden.

Diese Richtlinie unterscheidet zwischen verschiedenen Klassen von Abfällen (Siedlungsabfälle, gefährliche Abfälle, ungefährliche Abfälle, Inertabfälle) und gilt für alle Deponien, die als Abfallbeseitigungsanlage für die Ablagerung von Abfällen oberhalb oder unterhalb der Erdoberfläche definiert sind. Deponien für gefährliche Abfälle, Deponien für nicht gefährliche Abfälle und Deponien für Inertabfälle sind die drei Deponieklassen gemäß Artikel 4 der EU-Deponierichtlinie [8, Art. 2 u. Art. 4].

Artikel 5 sieht für die Zielerreichung eine schrittweise Reduktion bei der Ablagerung biologisch abbaubarer Siedlungsabfälle vor (hierin ist der organische Anteil im Abfall nicht durch einen Parameter begrenzt) [8, Art. 5].

2.1.2 Regelungen in Österreich

In der österreichischen Gesetzgebung in Bezug auf die Abfallwirtschaft bildet das Bundesverfassungsgesetz vom 29. November 1988, mit dem das Bundesverfassungsgesetz in der Fassung von 1929 geändert wird [9], die Grundlage. Hier ist festgelegt, dass die Belange der Abfallwirtschaft bezüglich gefährlicher Abfälle bzw. nicht gefährlicher Abfälle, sofern ein Bedürfnis nach Erlassung einheitlicher Vorschriften gegeben ist, sowohl in der Gesetzgebung als auch im Vollzug unter Bundeskompetenz fällt.

Aufbauend darauf wurde das „Abfallwirtschaftsgesetz“ [1] erlassen und eine Reihe anderer Verordnungen, wie z.B. die „Verpackungsverordnung“ [10], die „Verordnung über die Sammlung biogener Abfälle“ [5] oder die „Deponieverordnung“ [11].

Das Bundesabfallwirtschaftsgesetz bildet zusammen mit den neun Landesabfallwirtschaftsgesetzen die Eckpfeiler des österreichischen Abfallrechts, welches die Abfallwirtschaft in ihrer Gesamtheit regelt.

Aufgrund der Vorgaben der Europäischen Union wird das österreichische Abfallrecht laufend geändert.

2.1.2.1 Abfallwirtschaftsgesetz

Das Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002) [1] mit der Stammfassung BGBl. I Nr. 102/2002 wurde zuletzt mit dem BGBl. I Nr. 103/2013 geändert. Das Bundesgesetz, mit dem das Abfallwirtschaftsgesetz 2002 geändert wird (AWG-Novelle Industrieemissionen) [1] ist mit 20. Juni 2013 kundgemacht worden und gilt seit 21. Juni 2013. Das Abfallwirtschaftsgesetz gilt für gefährliche Abfälle und Altöle sowie – im Rahmen der Bedarfsgesetzgebung – auch für nicht gefährliche Abfälle. Es regelt den Umgang mit Abfällen und deren Behandlung, formuliert Ziele und Grundsätze der Abfallwirtschaft und schafft Steuerungsinstrumente für eine entsprechende Abfallwirtschaft wie beispielsweise [1]:

- der Bundes-Abfallwirtschaftsplan (BAWP) umfasst insbesondere eine Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft, Vorgaben zur Reduktion der Abfallmengen und Schadstofffrachten, zur umweltgerechten und volkswirtschaftlich sinnvollen Abfallverwertung und zur Beseitigung nicht vermeidbarer bzw. nicht verwertbarer Abfälle, einschlägige Maßnahmen des Bundes, die regionale Verteilung von Behandlungsanlagen für gefährliche Abfälle, usw.;
- Maßnahmen zur Abfallvermeidung und -verwertung (Kennzeichnung, Rücknahmepflicht, Pfandsysteme, Verkehrsbeschränkungen, Qualitätsanforderungen an Komposte, Zielverordnungen, usw.);
- Selbstregelungsmechanismen der Wirtschaft (Sammel- und Verwertungssysteme, Vorgabe von Zielen zur Verringerung der Mengen und Schadstofffrachten der üblicherweise bei Letztverbrauchern anfallenden Abfälle);
- Einrichtung von Sammel- und Verwertungssystemen unter Koordinierung und Aufsicht des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft;
- Bewilligungspflicht für abfallerzeugende und behandelnde Anlagen.

Im ersten Abschnitt sind unter den allgemeinen Bestimmungen die Ziele und Grundsätze der Abfallwirtschaft definiert [1, § 1, Abs. 1]. Dazu gehören im Sinne des Vorsorgeprinzips und der Nachhaltigkeit:

1. die Vermeidung von schädlichen oder nachteiligen Einwirkungen auf Mensch, Tier und Pflanze, deren Lebensgrundlagen und deren natürliche Umwelt oder sonstige beeinträchtigende Einwirkungen des allgemeinen menschlichen Wohlbefindens so gering wie möglich zu halten;

2. Emissionen von Luftschadstoffen und klimarelevanten Gasen so gering wie möglich zu halten;
3. die Schonung von Ressourcen (Rohstoffe, Wasser, Energie, Landschaft, Flächen, Deponievolumen);
4. die Abfälle oder die aus ihnen gewonnenen Stoffe bei der stofflichen Verwertung sollen kein höheres Gefährdungspotential aufweisen als vergleichbare Primärrohstoffe oder Produkte aus Primärrohstoffen; sowie
5. die Ablagerung jener Abfälle, die keine Gefährdung für nachfolgende Generationen darstellen.

Die fünfstufige Abfallhierarchie wird wie folgt definiert [1, § 1, Abs. 2]:

1. Abfallvermeidung
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung,
3. Recycling,
4. Sonstige Verwertung, z.B. energetische Verwertung, und
5. Beseitigung.

Die nachstehende Abbildung 1 zeigt, dass die vor der AWG-Novelle 2010 [1] gültige „Abfallverwertung“ nun in die Vorbereitung zur Wiederverwendung (z.B. Reuse), Recycling (für den ursprünglichen oder für andere Zwecke) und sonstige Verwertung (z.B. thermische Verwertung, Verfüllung) aufgesplittet ist.

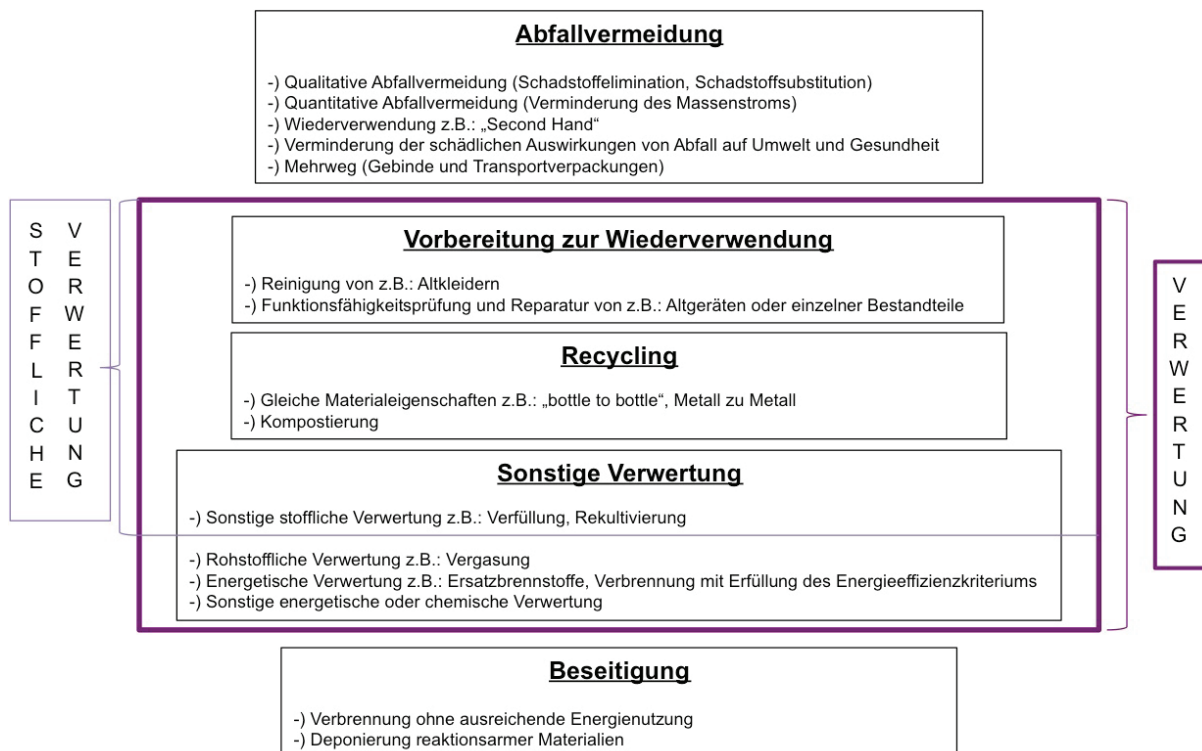


Abbildung 1: Abfallhierarchie (modifiziert nach [12])

Die Abfallhierarchie ist nach folgenden Vorgaben anzuwenden [1, § 1, Abs. 2a]:

- Die ökologische Zweckmäßigkeit und die technische Möglichkeit sind zu berücksichtigen sowie, dass die dabei entstehenden Mehrkosten im Vergleich zu anderen Verfahren der Abfallbehandlung nicht unverhältnismäßig sind und ein Markt für die gewonnenen Stoffe oder die gewonnene Energie vorhanden ist oder geschaffen werden kann.
- Abgewichen werden kann von dieser genannten Abfallhierarchie, wenn eine gesamthafte Betrachtung hinsichtlich der gesamten Auswirkungen bei der Erzeugung und Verwendung eines Produktes sowie der Sammlung und Behandlung der nachfolgend anfallenden Abfälle bei bestimmten Abfallströmen unter Berücksichtigung des o.g. Punktes ergibt, dass eine andere Option das beste Ergebnis unter dem Aspekt des Umweltschutzes erbringt.
- Je nach ihrer Beschaffenheit sind nicht verwertbare Abfälle durch biologische, thermische, chemische oder physikalische Verfahren zu behandeln. Feste Rückstände sind reaktionsarm ordnungsgemäß abzulagern.
- Die Abfallwirtschaft hat sich insofern zu entwickeln, sodass unionsrechtliche Zielvorgaben, insbesondere im Hinblick auf das Recycling, erreicht werden.

2.1.2.2 Verordnung über die getrennte Sammlung biogener Abfälle

Die Verordnung des Bundesministers für Umwelt, Jugend und Familie über die getrennte Sammlung biogener Abfälle in der gültigen Fassung BGBl. Nr. 456/1994 [5] regelt, welche

biologisch abbaubaren Abfälle getrennt gesammelt werden müssen, sofern diese nicht im unmittelbaren Bereich des Haushalts oder der Betriebsstätte verwertet, d.h. kompostiert, werden. Diese Verordnung wurde aufgrund des § 11 Abs. 3 des Abfallwirtschaftsgesetzes, BGBl. Nr. 325/1990, erlassen [5].

In den Geltungsbereich dieser Verordnung gehören [5, § 1]:

- Natürliche, organische Abfälle aus dem Garten- und Grünflächenbereich. Das sind insbesondere Grasschnitt, Baumschnitt, Laub, Blumen und Fallobst.
- Feste pflanzliche Abfälle, wie insbesondere solche aus der Zubereitung von Nahrungsmitteln.
- Pflanzliche Rückstände aus der gewerblichen und industriellen Verarbeitung und aus dem Vertrieb land- und forstwirtschaftlicher Produkte.
- Papier, sofern es sich um unbeschichtetes Papier handelt, das mit Nahrungsmitteln in Berührung stand oder zur Sammlung und Verwertung von biogenen Abfällen geeignet ist.

Werden die o.g. Abfälle nicht im unmittelbaren Bereich des Haushaltes oder der Betriebsstätte verwertet (kompostiert), so sind sie für die getrennte Sammlung bereitzustellen oder zu einer dafür vorgesehenen Sammelstelle zu bringen. Flüssige organische Abfälle, tierische Abfälle und Speisereste dürfen nur dann gemeinsam mit biogenen Abfällen gesammelt werden, wenn sie einer dafür geeigneten aeroben oder anaeroben Behandlungsanlage zur Verwertung zugeführt werden [5, § 2].

2.1.2.3 Abfallverzeichnisverordnung

Gemäß § 4 Z 1 und 2 des Abfallwirtschaftsgesetzes 2002 (AWG 2002), BGBl. I Nr. 102/2002, wurde der Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft ermächtigt mit Verordnung folgende zwei Punkte festzulegen. Lt. Z 1 des AWG 2002 sind die Abfallarten in Form eines Abfallverzeichnisses, welches die Abfallarten des Verzeichnisses im Sinne des Art. 7 der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle (EU-Abfallrahmenrichtlinie) umfasst, darzulegen. Lt. Z 2 des AWG 2002 sind die gefahrenrelevanten Eigenschaften gemäß Anhang III der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle sowie die gefährlichen Abfallarten, welche im Verzeichnis im Sinne des Art. 7 der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle als gefährlich gekennzeichnet sind, auszuweisen [1, § 4, Z 1 u. Z 2].

Somit trat die Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über ein Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnisverordnung) [2] in der Stammfassung BGBl. II Nr. 570/2003 mit 1. Jänner 2004 in Kraft. Mit 31. Dezember 2008 ist die Novelle der Abfallverzeichnisverordnung, BGBl. II Nr. 498/2008, in Kraft getreten. Deren Inhalt ist der Entfall des Umstiegs auf das Europäische Abfallverzeichnis. Die Abfallverzeichnisverordnung beinhaltet weiters Kriterien für die Zuordnung von Abfällen zu einer Schlüsselnummer und die anzuwendenden Untersuchungsmethoden [2].

In der Anlage 1, Punkt II „Besondere Zuordnungskriterien“ wird im Unterpunkt 10 „Abfälle zur biologischen Verwertung“ auf die Festlegung der Abfallarten im Rahmen einer Genehmigung von Kompostierungs- und Vergärungsanlagen eingegangen. Im Besonderen wird auf die Zuordnung der Abfälle aus der Kompostierung unter Einbeziehung der Qualitätsanforderungen gemäß der Kompostverordnung hingewiesen [2, Anlage 1, II].

Das Abfallverzeichnis umfasst die Abfallarten, die in Punkt 5 Tabelle 1 der ÖNORM S 2100 "Abfallverzeichnis" [3], ausgegeben am 1. Oktober 2005, aufgelistet sind, mit den in der Anlage 5 der Abfallverzeichnisverordnung angeführten Änderungen. Das aktuelle Abfallverzeichnis wird am EDM-Portal (Portal zum Elektronischen Datenmanagement des Lebensministeriums, www.edm.gv.at) veröffentlicht [2, § 1, Z 1].

2.1.2.4 Bundesabfallwirtschaftsplan 2011

Ein Bundesabfallwirtschaftsplan ist gemäß § 8 des Abfallwirtschaftsgesetzes mindestens alle sechs Jahre vom Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft zu erstellen. Derzeit ist der Bundesabfallwirtschaftsplan 2011 [6] gültig. Der Bundesabfallwirtschaftsplan hat folgende Inhalte gemäß § 8, Abs. 2 des AWG 2002 zu umfassen [1, § 8, Abs. 2]:

- eine Bestandsaufnahme der Situation der Abfallwirtschaft und eine Abschätzung der zukünftigen Entwicklungen der Abfallströme;
- die regionale Verteilung der Anlagen zur Beseitigung von Abfällen und bedeutender Anlagen zur Verwertung von Abfällen;
- die Beurteilung der Notwendigkeit der Stilllegung von Anlagen, zusätzlicher Anlageninfrastruktur zur Errichtung und Aufrechterhaltung eines Netzes an Anlagen zur Sicherstellung der Entsorgungsautarkie und Behandlung von Abfällen in einer der am nächsten gelegenen geeigneten Anlage;
- bestehende Abfallsysteme sowie die Beurteilung der Notwendigkeit neuer Sammelsysteme;
- bei grenzüberschreitenden Vorhaben die Darstellung der Zusammenarbeit mit betroffenen Mitgliedsstaaten und der Europäischen Kommission;
- aus den Zielen und Grundsätzen des AWG abgeleitete Vorgaben:
 - zur Reduktion der Mengen und Schadstoffgehalte und nachteiligen Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen der Abfälle,
 - zur Förderung der Vorbereitung zur Wiederverwendung, des Recyclings und der sonstigen Verwertung von Abfällen, insbesondere im Hinblick auf eine Ressourcenschonung,
 - zur umweltgerechten und volkswirtschaftlich zweckmäßigen Verwertung von Abfällen,
 - zur Beseitigung der nicht vermeidbaren oder verwertbaren Abfälle und

- zur Verbringung von Abfällen nach oder aus Österreich zur Verwertung oder Beseitigung;
- die zur Erreichung dieser Vorgaben geplanten Maßnahmen des Bundes;
- besondere Vorkehrungen für bestimmte Abfälle, insbesondere Behandlungspflichten und Programme einschließlich der Strategie zur Verwirklichung der Verringerung der zur Deponierung bestimmten biologisch abbaubaren Abfälle.

Die Kapitel 2 „Überblick über die Abfallwirtschaft in Österreich“, 3 „Betrachtung ausgewählter Abfallströme“ und 4 „Verwertungs- und Beseitigungsanlagen“ des Bundesabfallwirtschaftsplans 2011 wurden mit dem „Statusbericht 2012“ aktualisiert. In diesen Statusbericht wurden jene Daten und Informationen, die bis zum Oktober 2012 vorlagen aufgenommen. Angaben betreffend der Massen sind grundsätzlich aus dem Jahr 2010 und jene zu den Anlagen aus dem Jahr 2012 in den Bericht eingegangen [51, S. 2].

Das aktuelle Rest- und Biomüllaufkommen sowie die aktuellen Behandlungswege für die Rest- und Biomüllmengen aus den Supermärkten wird im Kapitel 6 aufgezeigt.

2.1.3 Regelungen der Länder

Durch die Novelle zum Bundesverfassungsgesetz 1988 (BGBl. Nr. 685/1988) wurde in der österreichischen Bundesverfassung ein Kompetenztatbestand „Abfallwirtschaft“ eingebracht. Mit dieser Maßnahme wird dem Bundesgesetzgeber eine umfassende Zuständigkeit für die Regelung der gefährlichen Abfälle zugesprochen. Die Zuständigkeit für die nicht gefährlichen Abfälle wurde den Ländern übergeben, außer wenn auch für diese Abfälle die Notwendigkeit einer einheitlichen Regelung durch den Bundesgesetzgeber gegeben ist (Bedarfskompetenz) [9, Art. I u. Art. VIII].

Als nicht gefährliche Abfälle gelten alle Abfälle mit Ausnahme der gefährlichen Abfälle und der Problemstoffe (Problemstoffe sind gefährliche Abfälle, die in privaten Haushalten anfallen) [1, § 2, Abs. 6].

Die Abfallvorschriften der Länder regeln – in Anlehnung an das AWG – u.a.:

- den Umgang mit nicht gefährlichen Abfällen,
- die Bewilligung von Anlagen für nicht gefährliche Abfälle,
- die Sammlung von nicht gefährlichen Abfällen und Problemstoffen,
- die Organisation der Abfallwirtschaft und
- die Gebührenregelung.

Nachfolgend werden für die Stadt Wien das Wiener Abfallwirtschaftsgesetz und der Wiener Abfallwirtschaftsplan dargelegt.

2.1.3.1 Wiener Abfallwirtschaftsgesetz

Die aktuelle Novelle des Gesetzes über die Vermeidung und Behandlung von Abfällen und die Einhebung einer hierfür erforderlichen Abgabe im Gebiet des Landes Wien [13] ist vom 24. August 2012. Das Wiener Abfallwirtschaftsgesetz (Wr. AWG) beinhaltet Regelungen zur Abfallvermeidung und -verringerung (z.B. Abfallkonzept für Baustellen und Veranstaltungen, Schadstofferkundung), Abfallbehandlung, Sammlung und Behandlung von Müll sowie die Einrichtung der öffentlichen Müllabfuhr, Sammlung von verwertbaren Abfällen und Abgaben [13].

Die Umsetzung der EU-Abfallrahmenrichtlinie in Form der fünfstufigen Abfallhierarchie [13, § 1, Abs. 2, Z 1-5] sowie die Verpflichtung der Landesregierung zur regelmäßigen Erstellung von Abfallvermeidungsprogrammen [13, § 2] ist auch Inhalt des Wiener Abfallwirtschaftsgesetzes.

§ 4 des Wr. AWG definiert den Begriff „Müll“ als nicht gefährlichen Siedlungsabfall, der vorwiegend fest ist, aus einem Stoffgemisch besteht und in privaten Haushalten (Hausmüll) oder in Betrieben, Anstalten oder im Zuge von Veranstaltungen oder Anlassmärkten (betrieblicher Müll) anfällt. Müll ist auch sonstiger nicht gefährlicher, brennbarer, vorwiegend fester Abfall, der zulässigerweise gemeinsam mit Hausmüll oder mit betrieblichem Müll gesammelt wird (sonstiger Müll). Keinesfalls als Müll gelten Altstoffe, Sperrmüll, Straßenkehrsicht sowie produktionsspezifische Abfälle [13, § 4].

Der Eigentumsübergang des Mülls ist aus rechtlichen Gründen sowie aus hygienischen Gründen geregelt. Abfälle gehen mit dem ordnungsgemäßen Einbringen in die dafür vorgesehenen Sammelbehälter oder technischen Vorsammelsysteme im Rahmen der öffentlichen Müllabfuhr und der öffentlichen Altstoffsammlung in das Eigentum der Gemeinde Wien über [13, § 9, Abs. 1].

Gemäß § 17 Abs. 1 des Wr. AWG sind in die öffentliche Müllabfuhr alle im Gebiet des Landes Wien gelegenen Liegenschaften einbezogen, sofern sie nicht gemäß § 18 ausgenommen sind [13, § 17, Abs. 1].

Von der öffentlichen Müllabfuhr sind gemäß § 18 unbebaute Liegenschaften und Liegenschaften, auf denen durch eine Benützung kein Müll anfällt, ausgenommen [13, § 18, Abs. 1]. Auf schriftlichen Antrag des Liegenschaftseigentümers hat der Magistrat die Liegenschaft von der öffentlichen Müllabfuhr auszunehmen wenn zutrifft:

1. Liegenschaften, die ausschließlich Betrieben oder Anstalten dienen, wenn der Antragsteller eine sachlich einwandfreie Sammlung und Behandlung der auf der Liegenschaft anfallenden Abfälle nachweist, wobei die Ausnahmegenehmigung die für die einwandfreie Sammlung und Behandlung der Abfälle erforderlichen Auflagen zu enthalten hat.
2. Liegenschaften, deren Benützung auf Grund der Notwendigkeit umfangreicher Bauarbeiten (z.B. Generalsanierungen) unmöglich ist, sodass kein Müll anfallen kann, wobei die Ausnahme auf die Dauer der Unbenutzbarkeit zu befristen ist.

Die Andienungspflicht ist somit für Gewerbebetriebe in Wien einer Ausnahmegewilligung nach § 18 Wr. AWG zugänglich. Diese Bestimmung beruht auf dem Begriff „Liegenschaft“. „Liegenschaft im Sinne dieses Gesetzes ist der Grundbuchskörper im Sinne des Allgemeinen Grundbuchsanlegungsgesetzes, ...“ [13, § 4, Abs. 11].

2.1.3.2 Wiener Abfallwirtschaftsplan

Das Wiener Abfallwirtschaftsgesetz schreibt vor, dass die Wiener Landesregierung einen Abfallwirtschaftsplan zu erstellen hat und diesen bei Bedarf, jedoch mindestens alle sechs Jahre fortzuschreiben hat [13, § 2, Abs. 1].

Folgendes hat der Abfallwirtschaftsplan zu beinhalten [13, § 2, Abs. 2]:

- Aussagen über den gegenwärtigen Stand der Abfallwirtschaft, insbesondere hinsichtlich Art und Menge der in Wien anfallenden Abfälle,
- abfallwirtschaftliche Prognosen und daran anknüpfende erforderliche Maßnahmen zur Verwirklichung der Ziele und Grundsätze der Abfallwirtschaft,
- Aussagen über den Bedarf, Bestand und Betrieb von Behandlungsanlagen und Deponien,
- die Beurteilung der Notwendigkeit der Stilllegung von Anlagen,
- die Beurteilung der Notwendigkeit zusätzlicher Anlageninfrastruktur zur Errichtung und Aufrechterhaltung eines Netzes an Anlagen zur Sicherstellung von Entsorgungsautarkie und Behandlung in einer der am nächsten gelegenen geeigneten Anlage,
- Aussagen über die Anzahl der erforderlichen Personen oder Einrichtungen zur Abfallberatung gemäß § 3 Wiener Abfallwirtschaftsgesetz sowie deren erforderliche Kenntnisse und Ausbildung und
- aus § 1 Wr. AWG abgeleitete Vorgaben.

Das aktuell vorliegende Wiener Abfallwirtschaftskonzept 2007 hat zum Inhalt die Maßnahmen im Zuständigkeitsbereich der Stadt Wien, in Abgrenzung von den Aufgaben für die gemäß Bundesabfallwirtschaftsgesetz der Bund zuständig ist. Des Weiteren ist Inhalt die strategische Planungsgrundlage für die Wiener Abfallwirtschaft der nächsten Jahre. Auf deren Basis ergibt sich die operative Umsetzung dieser Ergebnisse durch den zuständigen Magistrat der Stadt Wien [14, S. 1]. Beispielsweise wird auf die Anlagenkapazitäten in Bezug auf die Behandlung von biogenen Abfällen eingegangen. Weiters wird die Finanzierung der kommunalen Abfallwirtschaft thematisiert, die auch die Sammlung und Verwertung biogener Abfälle beinhaltet [14, S. 16]. Die Auflistung der Abfallarten und Abfallmengen zeigt für die biogenen Abfallstoffe (getrennt gesammelt) eine Verringerung der Menge von rund 88.000 t des Jahres 2000 auf rund 85.000 t im Jahr 2005. Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, worin auch der Restmüll aus Supermärkten beinhaltet ist, zeigt ebenso eine Verringerung in der Abfallmenge vom Jahr 2000 (rund 590.000 t) zum Jahr 2005 (rund 570.000 t) [14, S. 19].

2.2 Normative Grundlagen

2.2.1 ÖNORM S 2097 – Sortieranalyse von Abfällen

Die ÖNORM-Serie S 2097 Teil 1 bis 4 „Sortieranalyse von Abfällen“ [15], [16], [17], [18] befasst sich mit der Ermittlung und Untersuchung der Zusammensetzung fester Abfälle einschließlich Altstoffen unter Verwendung von physikalischen Verfahren.

Der Teil 1 legt die Begriffe fest, die für die Sortieranalyse von Abfällen gelten. Gemäß dieser ÖNORM ist eine Sortieranalyse eine „quantitative und qualitative Bestimmung der durch Sortierung von Abfällen erhaltenen Fraktionen / Unterfraktionen / Nebenfraktionen“. „Eine Sortieranalyse besteht aus der Sortierung und Auswertung von Einzelproben“ [15, S. 3]. Wobei man unter Sortierung die mechanische Trennung der Probe in einzelne Fraktionen versteht. Die Fraktionen sind dabei im Sortierkatalog definiert [15, S. 3 f.].

Teil 2 befasst sich mit der Probenahme. Es wird der Ablauf einer Sortieranalyse beginnend bei der Probenahme bis einschließlich dem Analysenbericht beschrieben. Genauere Richtlinien gibt es in Teil 2 bezüglich der Erstellung des Probenahmeplans, der Durchführung der Probenahme und der Probenahmedokumentation inkl. einem Muster für das Protokoll [16, S. 3ff].

Der Teil 3 ist für manuell sortierbare Abfälle in Abhängigkeit von der Stückigkeit bzw. Stückgröße anzuwenden. Hier sind die Hauptstoffgruppen (biogene Abfälle, Holz, Papier und Kartonagen, Kunststoffe, Glas, Textilien, Metalle, Problemstoffe/gefährliche Abfälle, Materialverbunde, Elektro- und Elektronikgeräte und Inertstoffe) als mögliche Fraktionen angeführt. Des Weiteren werden die Fraktionen „andere Abfälle“ und „Sortierrest“ angeführt. Unter dem Begriff „andere Abfälle“ sind alle Abfallstoffe, die im Rahmen der Analyse nicht von Interesse sind, zusammengefasst. „Sortierrest“ steht für Abfälle unbekannter Zusammensetzung (üblicherweise eine Feinfraktion) [17, S. 3]. In dieser Norm wird auch auf den Ablauf der manuellen Sortierung eingegangen, wobei die Verwiegung des Ausgangsmaterials für die Sortierung sowie das Gewicht der sortierten Fraktionen sehr wichtig sind. Die Abweichung der Massensummen der Einzelfraktionen darf 3 % der Masse der Gesamtprobe nicht überschreiten, andernfalls darf die Probe nicht in die Auswertung genommen werden. Nicht sortierbare Proben aus Gründen der Arbeitssicherheit, Unsortierbarkeit oder Unzumutbarkeit für das Sortierpersonal werden verworfen und entsprechend im Protokoll dokumentiert. Weitere Aufzeichnungen im Protokoll sind: Sortierleiter, Sortierort/Sortierzeit, Probenbezeichnung mit Bezug zum Probenahmeprotokoll, Masse/Volumen der Probe, Fraktionsmassen, Fotodokumentation, Besonderheiten der Probe, besondere Vorkommnisse und Unterschrift des Sortierleiters [17, S. 3 ff.].

Bei der Auswertung der Analysenergebnisse von manuell sortierbaren Abfällen (Stückigkeit, Stückgröße) ist Teil 4 relevant. Die Analysenergebnisse sind, wenn nicht schon vor Ort, dann anschließend in elektronische Form zu bringen. Die Auswertung erfolgt unter Berücksichtigung von Ausreißern, Minimal- und Maximalwert der Einzelfraktionen und Mittelwertberechnung für jede Fraktion [18, S. 3 ff.].

2.2.2 ÖNORM S 2123 – Probenahmepläne für Abfälle

Zum Zeitpunkt der Probenahmen war die ÖNORM S 2123-1 „Beprobung von Haufen“ [19] noch aktuell, somit wird in diesem Abschnitt auf die für diese Arbeit relevanten Teile der ÖNORM-Serie S 2123 eingegangen. Teil 1 der ÖNORM S 2123 wurde am 01.11.2011 zurückgezogen und durch die ÖNORM S 2127: 2011 11 01 „Grundlegende Charakterisierung von Abfallhaufen oder von festen Abfällen aus Behältnissen und Transportfahrzeugen“ ersetzt.

Die ÖNORM-Serie S 2123 befasst sich mit der Erstellung von Probenahmeplänen und deren Umsetzung in Abhängigkeit von der Lagerart des Abfalls (z.B. Haufen, Behälter, Transportfahrzeuge) bzw. dem physikalischen Zustand (z.B. fest, flüssig, pastös) des Abfalls. Die Teile 2 („Beprobung fester Abfälle aus Behältnissen und Transportfahrzeugen“), 4 („Beprobung flüssiger bzw. pastöser Abfälle“) und 5 („Beprobung stückiger Abfälle“) fanden in der vorliegenden Arbeit keine Anwendung, deshalb wird darauf hier nicht näher eingegangen.

Teil 1 „Beprobung von Haufen“ [19] ist bei der Probenahme von Abfallhaufen anzuwenden. In der ÖNORM S 2123-1 werden Begriffe definiert, der Ablauf einer Abfalluntersuchung beleuchtet und die Erstellung des Probenahmeplans dargestellt.

Der Probenahmeplan hat folgende Punkte zu beinhalten: Beurteilung der Homogenität/Heterogenität, Massebestimmung, Festlegung der Probenanzahl, Festlegung der Mindestmengen der Proben und gesetzliche Vorgaben. Zur Durchführung der Probenahme werden Probenahmegeräte und -behälter benötigt, die vollständig entleerbar, der Problemstellung angepasst sein müssen und eine Kontamination der Probe ausschließen. Die Entnahmeöffnung des Probenahmegerätes hat mindestens das 2,5 fache des Größtkorns, aber in jedem Fall mindestens 25 mm zu betragen. Die Befüllöffnung des Probenahmebehälters sollte möglichst dem Durchmesser des Behälters entsprechen. Die Probenahme kann mittels von Hand zu bedienender Geräte oder mittels Großgeräten erfolgen. Während der Probenahme ist ein Protokoll zu führen, anhand einer Skizze die Lage der Probeentnahmestellen einzuzeichnen und eine Fotodokumentation zu führen [19, S. 3 ff.].

Bei der Probenahme von festen Abfällen aus Stoffströmen (fallend, ruhend bzw. bewegt) ist Teil 3 der ÖNORM S 2123 „Beprobung fester Abfälle aus Stoffströmen“ [20] anzuwenden. Hier werden Begriffe definiert, der Ablauf der Abfalluntersuchung angeführt und die Erstellung des Probenahmeplanes beleuchtet (siehe oben). Bei der Durchführung der Probenahme wird zwischen Probenahme aus bewegten Abfallströmen und stillgelegter Fördereinrichtungen unterschieden. Wenn es der Betrieb zulässt in bestimmten Zeitabständen ein Band stillzusetzen, können die qualifizierten Stichproben durch Beprobieren eines Bandabschnittes erhalten werden. Die qualifizierten Stichproben aus bewegten Abfallströmen sind nach einem entsprechenden Vorlauf in zeitlich gleichen Abständen zu ziehen [20, S. 3 ff.].

3 Grundlagen der anaeroben Behandlung von Abfällen

Mit der flächendeckend, gesetzlich vorgeschriebenen Getrenntsammlung kommunaler biogener Abfälle (Bioabfallverordnung BGBl. Nr. 68/1992) bzw. dem Verbot der direkten Deponierung organischer Abfälle (Deponieverordnung BGBl. Nr. 164/1996 i.d.F. BGBl. II Nr. 49/2004) hat sich in Österreich die Vergärung kommunaler biogener Abfälle als Alternative zu Deponierung, Verbrennung bzw. Ergänzung zur Kompostierung etabliert. Die anaerobe Vergärung für halb feste biogene Abfälle hat sich in Österreich verbreitet, da biogene Abfälle mit Wassergehalten von über 70 % in klassischen Kompostierungen meist zu Geruchsproblemen und Methanbildung führen. Hingegen werden bei der Vergärung in geschlossenen Behältern Geruchs- und Schadstoffemissionen über die Luft bei entsprechender Biogasverwertung vermieden [21, S. 1].

Bei der Vergärung von festen oder flüssigen organischen Stoffen entstehen ein stabilisierter Reststoff und ein Gasmischung aus Methan und Kohlendioxid. Die im organischen Material enthaltene Energie wird auf das Biogas übertragen, welches zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie in Form von Biomethan als Treibstoff genutzt werden kann. Die Gärreste enthalten verwertbare Nährstoffe und können als Sekundärrohstoffdünger eingesetzt werden [22, S. 232].

Zunächst werden die Grundlagen der Vergärung beschrieben. Anschließend werden einige grundlegende Unterschiede der biologischen Bioabfallverwertungsverfahren – Kompostierung und Vergärung – gegenübergestellt.

3.1 Der anaerobe Abbauprozess

Anaerobe Vergärung ist der biologische und oxidative Abbau von organischem Material durch bestimmte Bakteriengruppen in Abwesenheit von Sauerstoff. Dabei wird das Material partiell in Biogas umgesetzt [22, S. 232].

Die mikrobielle Umsetzung von organischem Material zu Biogas setzt sich im Wesentlichen aus folgenden vier Schritten zusammen [22, S. 232]:

1. Hydrolyse,
2. Acidogenese (Versäuerung),
3. Acetogenese (Essigsäurebildung) und
4. Methanogenese (Methanbildung).

Am anaeroben Prozess (siehe Abbildung 2) sind verschiedene Gruppen von Mikroorganismen beteiligt. Diese Organismen verwerten jeweils die Produkte der vorangegangenen Schritte [23, S. 7].

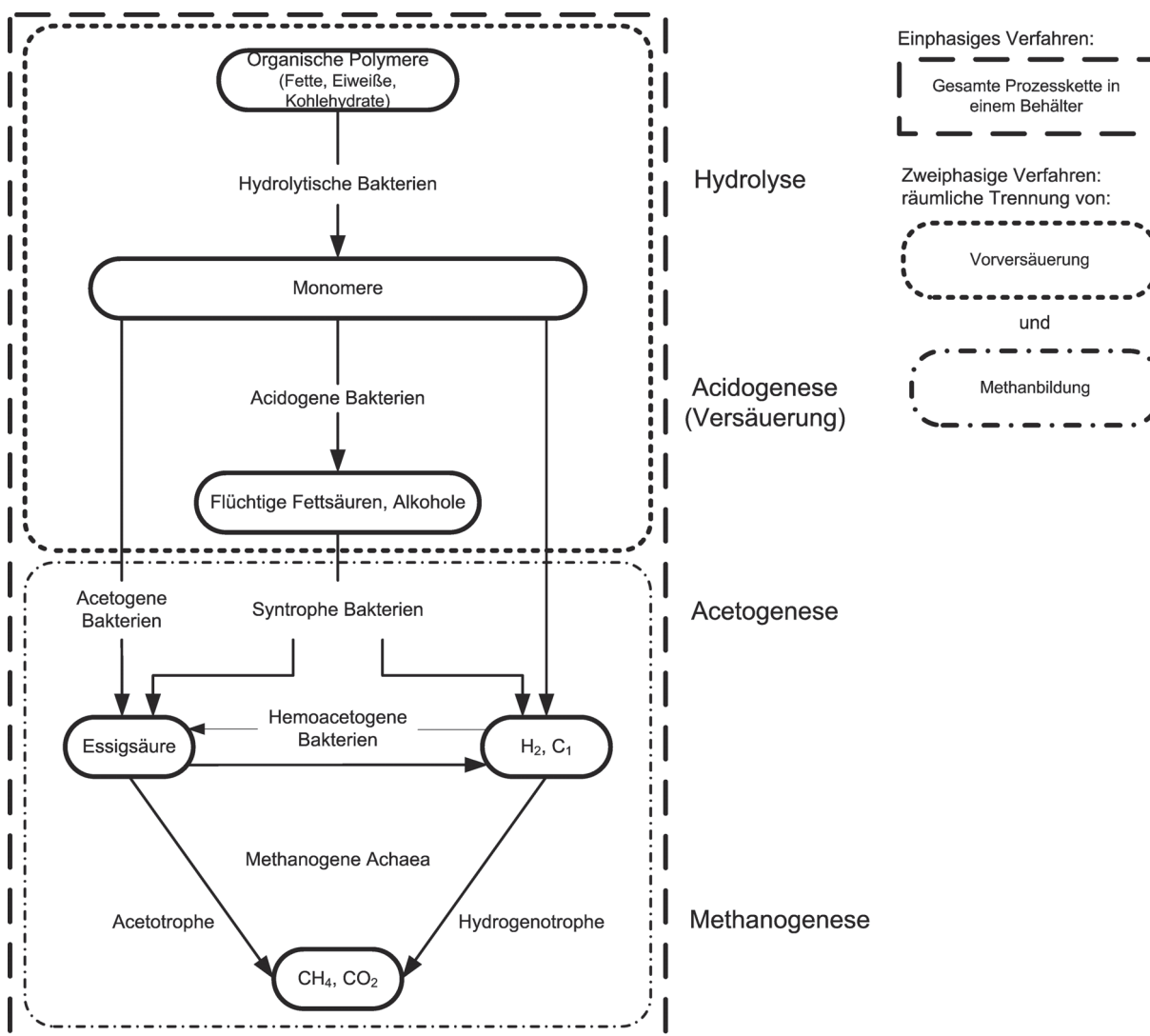


Abbildung 2: Phasen der Biogasentstehung (in Anlehnung an [23, S. 8, Abb. 4])

3.1.1 Hydrolyse

Der anaerobe Abbau von organischem Material beginnt mit der Hydrolyse (chemisch: Spaltung von Molekülen unter Reaktion mit Wasser). In dieser Phase werden komplexe Makromoleküle aus Kohlenhydraten (z.B. Stärke), Fetten und Proteinen enzymatisch unter Anlagerung von Wasser in niedermolekulare Verbindungen gespalten. In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die wesentlichen Stoffumsetzungen dargestellt [23, S. 8].

Tabelle 1: Stoffumsetzungen in der hydrolytischen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen [23, S. 8]

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
Kohlenhydrate Proteine Fette	Clostridium spp. Bacillus spp. Pseudomonas spp.	Monosacharide Aminosäuren kurzkettige Peptide langkettige Fettsäuren Glyzerin

Die in Abbildung 2 dargestellte Prozesskette läuft in einem Fermenter räumlich und zeitlich parallel ab. Die Geschwindigkeit des Gesamtabbaus wird bestimmt durch das langsamste Glied in der Kette. Im Falle von Biogasanlagen, welche vorwiegend mit pflanzlichen Struktursubstanzen, komplexe Polysaccharide, beschickt werden, ist die Hydrolyse der geschwindigkeitsbestimmende Prozess. Die Hydrolyse erfolgt mittels von Bakterien abgesonderten Exoenzymen, welche das ungelöste, partikuläre Material angreifen können. Die Hydrolyseprodukte werden von den in der Abbaukette nachfolgenden Organismen aufgenommen und im eigenen Stoffwechsel weiter abgebaut [23, S. 8].

3.1.2 Acidogenese

Die aus der Hydrolyse vorhandenen Monomere werden von Versäuerungs-bakterien (siehe Tabelle 2) als Substrat verwendet. Es entstehen niedermolekulare organische Säuren und Alkohole. Außerdem entstehen mit Acetat, Wasserstoff und Kohlendioxid bei der Acidogenese bereits Ausgangsprodukte für die Methanbildung (siehe Tabelle 2) [23, S. 9].

Tabelle 2: Stoffumsetzungen in der acidogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen [23, S. 9]

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
Monosaccharide Aminosäuren Kurz-kettige Peptide Lang-kettige Fettsäuren Glyzerin	Clostridium spp. Bacteroides spp. Butyrivibrio spp.	flüchtige Fettsäuren (Acetat, Propionat, Butyrat) Aldehyde, Alkohole Ketone, Ammoniak Kohlendioxid, Wasserstoff

3.1.3 Acetogenese

In der Acetogenese (Essigsäurebildung) werden die niedermolekularen organischen Säuren und Alkohole der Acidogenese weiter in kleinere Moleküle umgesetzt (siehe Tabelle 3). Es entstehen vor allem Acetat, Wasserstoff und Kohlendioxid. Acetogene bzw. syntrophe Bakterien bauen durch Hydrolyse (β -Oxidation der Fettsäuren) oder komplexere Reaktionen die Fettsäuren weiter zu Acetat, Kohlendioxid und Wasserstoff ab [23, S. 9].

Tabelle 3: Stoffumsetzungen in der acetogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen [23, S. 9]

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
flüchtige Fettsäuren (Propionat, Butyrat) Aldehyde Alkohole Ketone	Clostridium spp. Eubacterium spp.	Acetat Kohlendioxid Wasserstoff

3.1.4 Methanogenese

In der letzten Phase, der Methanogenese, erzeugen methanogene Bakterien schließlich das Methan (siehe Tabelle 4). Die Methanbildung kann auf zwei Wegen erfolgen. Etwa 30 % des erzeugten Methans entsteht durch die Oxidation von Kohlendioxid und Wasserstoff durch hydrogenotrophe Organismen ($\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$) wie z.B. *Methanobacterium bryanti*. Ungefähr 70 % erfolgt auf dem Wege der Spaltung der Essigsäure in Methan und Kohlendioxide durch acetogenotrophe Methanbakterien [23, S. 9].

Tabelle 4: Stoffumsetzungen in der methanogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen [23, S. 10]

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
Acetat Kohlendioxid Wasserstoff	<i>Methanosarcina</i> spp. <i>Methanosaeta</i> spp. <i>Methanobacterium</i> spp.	Methan Kohlendioxid

Die Methanogenese wird normalerweise als geschwindigkeitslimitierender Schritt bezeichnet, da die beteiligten Bakterien hier eine niedrigere Wachstumsrate und eine höhere Empfindlichkeit gegenüber den Milieubedingungen aufweisen. Bei Substraten mit höherem Feststoffanteil kann die Hydrolyse geschwindigkeitslimitierend sein [22, S. 234].

Die methanbildenden Reaktionen können bei einem Wasserstoffpartialdruck über 10^{-6} atm exergon¹ werden. Demgegenüber benötigen die essigsäurebildenden Bakterien einen niedrigen Wasserstoffpartialdruck ($< 10^{-3}$ atm), da die Reaktionen ansonsten energieverbrauchend werden. Diese Reaktionen sind somit thermodynamisch erst möglich, wenn der produzierte Wasserstoff gleichzeitig von wasserstoffoxidierenden Bakterien entfernt wird. Somit ist die Methanbildung aus Kohlendioxid und die Acetogenese in dem Bereich von 10^{-6} bis ca. 10^{-3} atm Wasserstoffpartialdruck gleichzeitig exergon. Die Methanbildung aus Acetat wird hingegen vom Wasserstoffpartialdruck nicht beeinflusst. Der Wasserstoffpartialdruck steigt, wenn die Methanbildung aus Wasserstoff gehemmt wird und limitiert die Umwandlung von Fettsäuren. Die Fettsäuren reichern sich im Reaktor an und führen zur pH-Wert-Absenkung. Ein zu niedriger pH-Wert wirkt sich wiederum limitierend auf essigsäureverwertende Bakterien aus und kann zu Betriebsstörungen bis hin zum Betriebsausfall führen [22, S. 234 f.]. Mit einer rechtzeitigen Unterbrechung der Substratzufuhr kann diesem Prozess entgegengewirkt werden. Die Zugabe von neutralisierenden Stoffen wie Kalk oder Natronlauge kann in extremen Fällen die Versäuerung verhindern [23, S. 10].

¹ Eine Reaktion ist exergonisch, wenn Energie freigesetzt oder Arbeit geleistet wird. In diesem Fall ist die Freie Enthalpie $\Delta G'$ negativ [Atkins, P. W.: Kurzlehrbuch Physikalische Chemie. Heidelberg; Berlin; Oxford: Spektrum Akademischer Verlag, 1993; S. 209].

3.1.5 Weitere Prozesse

Nachfolgend sind weitere Prozesse angeführt, die bei der Biogaserzeugung zu berücksichtigen sind.

Hinsichtlich des Schwefelwasserstoffgehaltes spielt die Sulfatreduzierung eine wesentliche Rolle. Dieser Prozess findet v.a. bei Zugabe von schwefelhaltigem Ausgangsmaterial statt. Der beispielsweise in Aminosäuren enthaltene Schwefel wird von sulfatreduzierenden Mikroorganismen zu Schwefelwasserstoff abgebaut. Dieser Prozess hat zwei Nachteile. Einerseits verbraucht diese Reaktion Wasserstoff. Somit stehen die sulfatreduzierenden Mikroorganismen in direkter Konkurrenz zu den methanogenen Organismen, welche Wasserstoff und Kohlendioxid zu Methan verarbeiten. Andererseits ist Schwefelwasserstoff für den Menschen gesundheitsschädlich und führt in den Einrichtungen der Biogasanlage zu Korrosionsschäden [23, S. 10].

Zur gezielten Biogaserzeugung sind für die Mikroorganismen geeignete Rahmenbedingungen zu schaffen. Das Wachstum und die Aktivität der Bakterien werden wesentlich durch Sauerstoffausschluss, Gärtemperatur, pH-Wert, Nährstoffangebot, Durchmischungsintensität und den Gehalt an Hemmstoffen beeinflusst. Insbesondere die methanbildenden Bakteriengruppen sind obligat anaerob, somit ist der Sauerstoffeintrag in den Gärprozess unbedingt zu vermeiden [23, S. 11].

Grundsätzlich werden drei Temperaturstufen unterschieden, in denen jeweils der Temperatur angepasste Bakterienstämme aktiv sind [23, S. 11]:

psychrophil	< 20 °C
mesophil	30-42 °C
thermophil	48-55 °C

Die Geschwindigkeit des Abbauprozesses wird maßgeblich durch das Temperaturniveau bestimmt. Grundsätzlich gilt, dass bei einer höheren Temperatur der Abbau schneller erfolgt. Höhere Abbaugrade sind zwar prinzipiell möglich, führen in Biogasanlagen aber zu unverhältnismäßig längeren Verweilzeiten, größeren Fermentervolumina und damit entsprechend höheren Kosten [23, S. 11].

Im thermophilen Temperaturbereich ist die Hydrolyserate im Vergleich zum mesophilen Temperaturniveau erhöht, was einen Anstieg des Gehalts an organischen Säuren bedingt. Thermophile Gärprozesse reagieren bereits auf Temperaturschwankungen von +/- 1 °C und benötigen eine gewisse Zeit, sich an ein neues Temperaturniveau anzupassen und die ursprüngliche Leistung wieder zu erreichen [23, S. 11].

Bei der mesophilen Prozessführung werden in der Regel Temperaturschwankungen von +/- 3 °C toleriert, ohne dass es zu einem größeren Einbruch in der Gasbildungsrate kommt. Aufgrund der erhöhten Reaktionsgeschwindigkeit sind bei höheren Temperaturen geringere Verweilzeiten des Substrates im Faulraum zur Erreichung desselben Abbaugrades erforderlich (Abbildung 3) [23, S. 11].

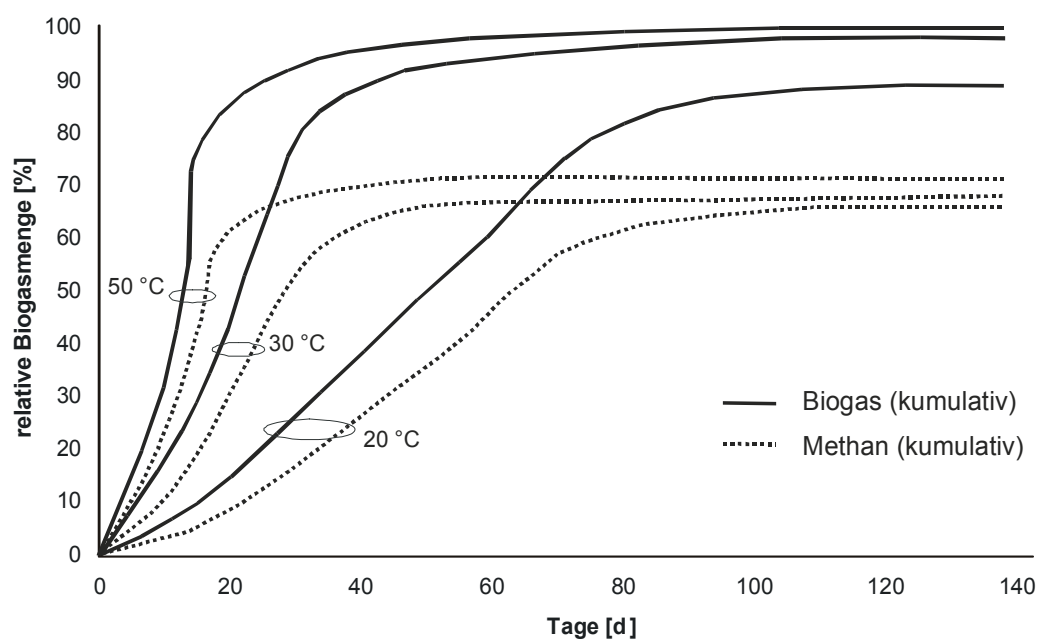


Abbildung 3: Relative Biogasmenge in Abhängigkeit von Temperatur und Verweilzeit [23, S. 12]

Generell ist für die Methanbildung ein pH-Wert im schwach alkalischen Bereich bis 7,5 optimal. Der Trockenmassegehalt sollte in voll durchmischten Gärbehältern zwischen 3 und 10 % liegen. Die Alkalinität als Maß für die Pufferkapazität liegt zwischen 1.500 und 5.000 mg CaCO_3/l , die Konzentration einzelner flüchtiger Fettsäuren im Bereich von 600 bis 1.500 mg/l. Messwerte außerhalb der angegebenen Bereiche deuten auf eine Prozessstörung hin [23, S. 12].

3.2 Verfahrenstechnik der Bioabfallvergärung

Die anaerobe Behandlung von Bioabfällen umfasst im Wesentlichen die Verfahrensschritte:

- Anlieferung und Lagerung,
- Aufbereitung,
- Vergärung und
- Nachbehandlung.

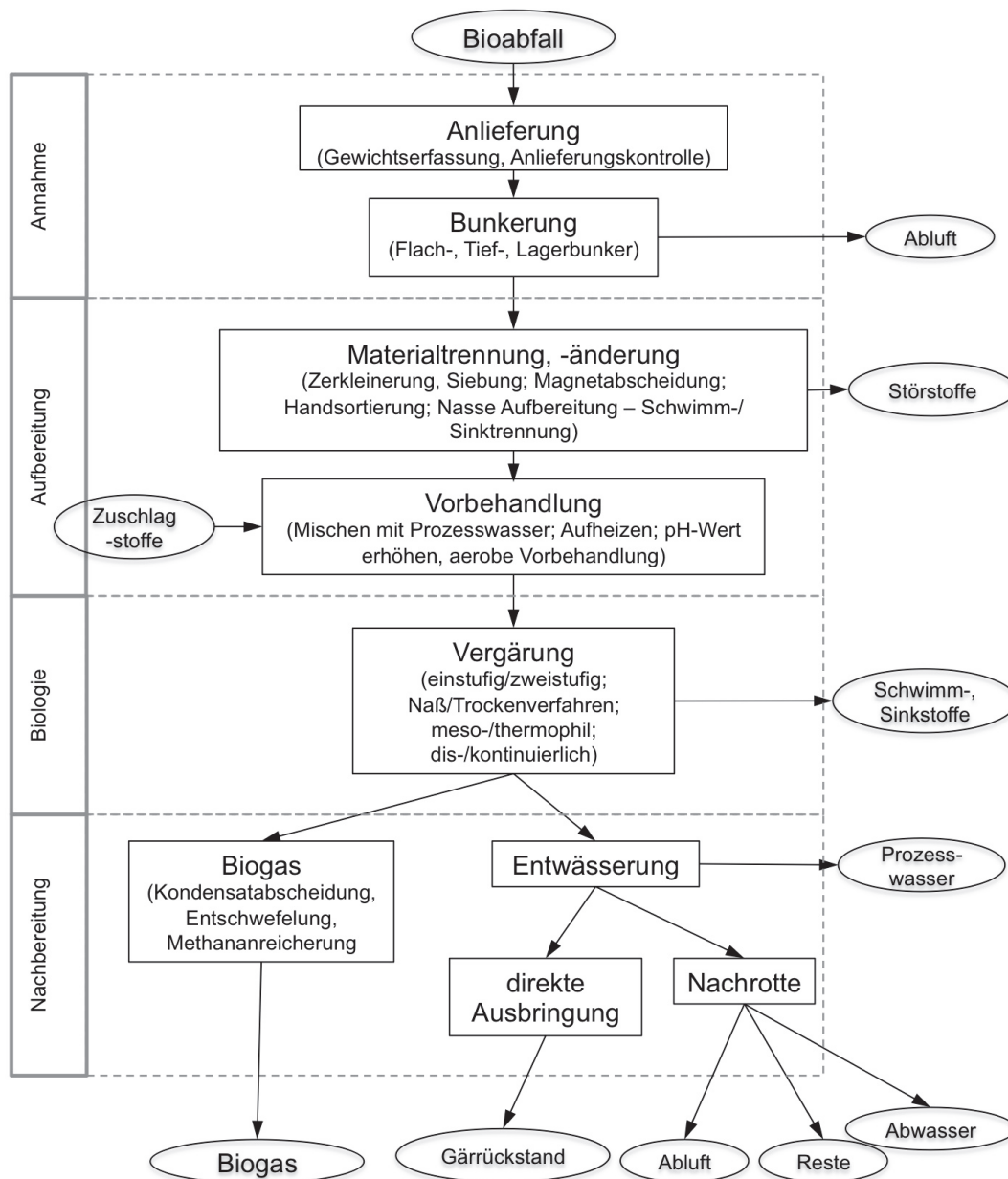


Abbildung 4: Prozessablauf der Vergärung organischer Abfälle (modifiziert nach [24, S. 73])

Der verfahrenstechnische Aufwand und die einzelnen Verfahrensschritte unterscheiden sich nach eingesetzten Verfahren und dem Qualitätsanspruch des Endproduktes voneinander.

3.2.1 Anlieferung und Lagerung der biogenen Abfälle

Das Sammelsystem (Sack oder Tonne, Hol- oder Bringsystem) und das Sammelintervall (z.B.: ein- oder zweimal pro Woche) beeinflussen eine wünschenswerte schadstofffreie Erfassung der Abfälle. Die Sammlung wirkt sich auf die Vorbehandlung, Vergärung, Nachbehandlung und die eventuelle Vermarktung der Outputströme aus [25, S. 13 f.].

In den Bereich der Anlieferung fällt die Einhaltung einschlägiger Pflichten hinsichtlich Eingangskontrolle, Erfassung, Dokumentation und Nachweisführung der angelieferten Substrate. Die Lagerung der Substrate ist erforderlich bei verschiedenen Ausgangsstoffen, um eine möglichst gleichmäßige Mischung herzustellen. Die Dimensionierung der Lager

muss sich dabei nach den Liefermengen und -intervallen sowie den täglichen Einbringungen in den Fermenter richten. Werden geruchsintensive Stoffe, z.B. Altfett, gelagert, ist eine geschlossene Lagerung mit ggf. entsprechender Abluftreinigung vorzusehen. Werden tierische Nebenprodukte, z.B. Speise- oder Schlachtabfälle, eingesetzt, sind die Regelungen gemäß Tiermaterialengesetz einzuhalten [23, S. 34].

3.2.2 Vorbehandlung von Abfällen

Die Vorbehandlung der Abfälle stellt einen wesentlichen Schritt im Gesamtprozess der Abfallbehandlung dar, da durch die Veränderung der spezifischen Oberfläche und die Abtrennung nicht vergärbare Substanzen Einfluss auf die Abbauezeit und die Abbauleistung genommen werden kann. Die Aufbereitung der Abfälle ist von der Art und dem Anteil der Störstoffe sowie vom nachfolgenden Vergärungsverfahren abhängig [25, S. 14].

Folgende Verfahren werden zur Änderung der Stoffzusammensetzung eingesetzt [25, S. 14]:

- Sichtkontrolle: Entfernen von groben Störstoffen (Kunststoff, Glas, NE-Metalle);
- Magnetabscheidung: Entfernen von magnetischen Metallen (Metallteile, Schrauben, Dosenbleche);
- Windsichtung: Entfernen von leichten Stoffen (Kunststoffe, Papiere);
- Siebung: Erzeugung von verschiedenen Kornfraktionen.

Folgende Verfahren sind zur Änderung der Stoffeigenschaften vorhanden und werden je nach Ausgangszusammensetzung des Abfalles sowie dem nachgeschalteten Verfahren einzeln oder kombiniert angewendet [25, S. 14 f.]:

- Zerkleinerung: Die Zerkleinerung mit Hammer- oder Schneckenmühlen dient im Wesentlichen der Vergrößerung mikrobiologisch angreifbarer Oberflächen und damit der Beschleunigung des Abbauprozesses sowie der Minderung von Verstopfungen, Sedimentation und Flotation in den nachfolgenden technischen Einrichtungen.
- Nasszerkleinern (Auflösen): Mechanischer Aufschluss in Pulpnern, die bei der Altpapieraufbereitung auch zum Einsatz kommen.
- Schwimm-/Sinktrennung: Entfernung von Leicht- und Schwerstoffen durch Trennung aufgrund von Dichteunterschieden in Flüssigkeiten.

Folgende Verfahren können einzeln oder kombiniert als letzte Vorbehandlungsschritte zum Einsatz kommen [25, S. 15]:

- Anmischen/Rückimpfen: Vermischen der organischen Abfälle mit Prozesswasser (Kreislaufführung) und gleichzeitiges Beimpfen durch Mikroorganismen.
- Thermisch alkalische Vorbehandlung: Chemischer Aufschluss durch Zusatz von Lauge in einem heizbaren Reaktor.

3.2.3 Rückstände der Vorbehandlung

Bei der Vorbehandlung werden verschiedene Störstoffe abgetrennt. Je nach Art der Vorbehandlung und Zusammensetzung des Inputmaterials können Glas, Folien, Kunststoffe sowie Metalle verwertet werden. Problemstoffe sind einer entsprechenden Entsorgung zuzuführen. [25, S. 15].

3.3 Verfahrenstechnische Unterschiede bei der Vergärung

Vergärungsverfahren können durch Stoffführung, Reaktionsbedingungen und Reaktoren unterschieden werden. Die verschiedenen Reaktorkonfigurationen können gemäß Tabelle 5 zugeordnet werden.

Der Temperaturbereich des Reaktors wird unterschieden zwischen psychrophil, mesophil und thermophil. Der Vorteil der thermophilen Vergärung ist, dass die Rate der Methanerzeugung höher ist als im mesophilen Bereich. Weiters kann das Reaktorvolumen kleiner sein und die Bedingungen für eine Hygienisierung sind besser. Die Energiebilanz ist insgesamt trotzdem vergleichbar, da der thermophile Prozess höhere Erwärmungsenergie benötigt. Überdies braucht die thermophile Vergärung eine feinere Steuerung der Temperatur, um die Stabilität des thermophilen Prozesses zu gewährleisten [22, S. 238].

Tabelle 5: Reaktorkonfigurationen [22, S. 238]

Gliederungsbegriff	
Temperatur	psychrophil (< 20 °C), mesophil (30-42 °C), thermophil (48-55 °C).
Stufen	Ein Reaktor für Versäuerung und Methanogenese (einstufig). Zwei Reaktoren für die zwei Phasen (zweistufig). Mehrere Reaktoren für jede Phase (mehrstufig).
Eintragsmodus	kontinuierlich oder semi-kontinuierlich, kontinuierlich mit Umwälzung, diskontinuierlich oder diskontinuierlich mit Perkulation.
Wassergehalt	Trockensubstanz > 25 % (trocken), hoher Feststoffgehalt, Trockensubstanz < 15 % (semi-nass), Trockensubstanz < 8 % (nass), geringer Feststoffgehalt.
Reaktoraufbau	Rührkesselreaktor, Plug-Flow Reaktor, Schlammbett, Kontaktprozess, Anaerobfilter.

Normalerweise werden die Versäuerung und die Methanbildung in einem einzigen Reaktor durchgeführt. Die zwei Stufen zu trennen und zwei Kaskaden-Reaktoren zu betreiben ist auch möglich. Jeder einzelne Reaktor kann dann unter optimalen Bedingungen bezüglich pH-Wert und Temperatur betrieben werden. Die zwei- oder mehrstufigen Prozesse verbessern die gesamte Leistung des Systems, gehen aber mit höheren Investitions- und Betriebskosten einher [22, S. 238].

Die Substratzufuhr kann auf zwei Arten erfolgen: kontinuierlich/semi-kontinuierlich oder diskontinuierlich. Bei den häufig verwendeten kontinuierlichen Prozessen wird das Substrat ununterbrochen oder in regelmäßigen Zeitabständen zu- und abgeführt. Teilweise wird der Zulauf mit dem Rücklauf gemischt, um die Verweilzeit von besonders schwerabbaubaren Substraten zu erhöhen. Im Gegensatz dazu wird der diskontinuierliche (batch) Reaktor einmal mit dem Substrat beladen und dann für die notwendige Verweilzeit betrieben bis die Biomasse ausreichend stabilisiert ist. Für diese kostengünstige Methode werden trockene stapelbare Substrate benötigt, die nicht pumpfähig sind, wie z.B. Pflanzenreste. Häufig wird das Prozesssickerwasser recirculiert, um eine Mischung im System zu erreichen [22, S. 238 f.].

Die meisten Vergärungsprozesse werden als Nassverfahren mit einem Wassergehalt über 90 % durchgeführt. Als typische pumpfähige Substrate zählen Klärschlamm und Tiergülle, aber auch flüssige Produktionsabfälle und angemischte Bioabfälle. Trockene Fermentation mit Wassergehalten unter 85 % wurden speziell für Bioabfälle Pflanzenreste und Festmist entwickelt. Diese Art der Fermentation kann diskontinuierlich oder auch kontinuierlich mit besonderen Plug-Flow-Reaktoren erfolgen [22, S. 239].

Zur Kombination der verschiedenen Optionen wurden im Laufe der Jahre zahlreiche Reaktorbauformen entwickelt. Nachfolgend sind auszugsweise Bauformen angeführt [22, S. 239 ff.]:

- Einstufiger Rührkesselreaktor für pumpfähige Substrate mit relativ geringen technologischen Ansprüchen;
- Plug-Flow-Reaktor (Pfropfenstromreaktor) zur kontinuierlichen Behandlung von trockenen Substraten;
- Schlammbedreaktor insbesondere für flüssige Substrate;
- Batchreaktor ist eine kostengünstige Lösung für trockene, nicht pumpfähige Substrate zur diskontinuierlichen Vergärung.

Normalerweise besteht der Reaktor aus Stahl. Bei Nassvergärungsverfahren ist der Reaktor meist ein stehender Zylinder, während trockene Vergärungsverfahren in stehenden und liegenden Behältern ausgeführt sind. Der Reaktor muss durch Vorerwärmung des Substrates, effiziente Wärmedämmung und eventuell auch Heizschläuche auf der gewählten Betriebstemperatur gehalten werden [22, S. 242].

3.4 Rückstände und Nachbehandlung der Outputströme nach der Vergärung

Nach Abschluss der Vergärung fallen je nach Abfallzusammensetzung bzw. Inputmaterialien verschieden große Outputströme an. Der tatsächliche Anteil ist abhängig vom abfallwirtschaftlichen Gesamtkonzept, der Logistik der Getrenntsammlung und den Verwertungsmöglichkeiten von Altstoffenn. Die Produktströme – Sickerwasser, Gärreste und Biogas – müssen in der Regel zusätzlich für einen nachfolgenden Prozess behandelt werden (siehe Abbildung 5).

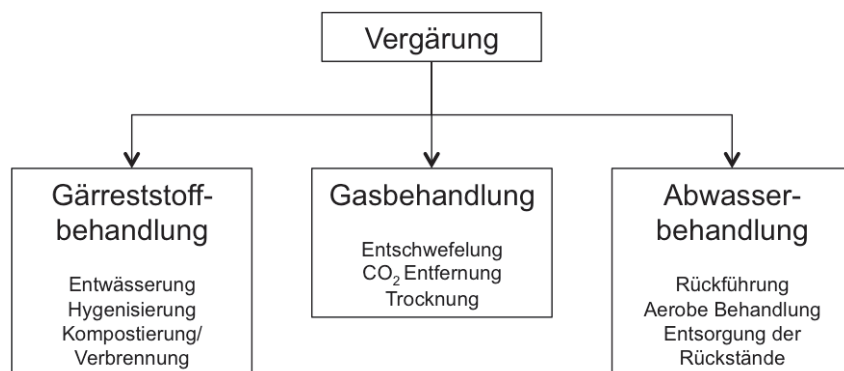


Abbildung 5: Nachbehandlungsverfahren (modifiziert nach [22, S. 253])

Die Gärreststoffe müssen nach der Vergärung entwässert werden. Durch den Substratabbau und durch Zugabe von Prozesswasser wird der Trockensubstanzgehalt im Vergleich zur eingesetzten Gärsubstanz vermindert. Durch Pressen oder Zentrifugieren können die Gärreste je nach Inputmaterialien kompostiert, verwertet oder verbrannt werden [22, S. 254].

Das anfallende Abwasser wird zum Teil als Prozesswasser im Kreislauf geführt oder je nach Inputmaterialien auch zur Befeuchtung von Kompostmaterial benutzt. Das stark organisch oder auch anorganisch belastete Schlammwasser muss gereinigt werden. Vor der Einleitung in die kommunale Abwasserreinigungsanlage kann gegebenenfalls eine aerobe Reinigung und Nährstoffeliminierung notwendig werden [22, S. 254].

3.4.1 Biogas

Biogas ist eine Mischung aus Methan, Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und weitere Spurengase sowie Wasserdampf. Von der Art der Inputmaterialien sowie im geringen Maße von der Prozessführung hängt die Zusammensetzung des Biogases ab. In der Tabelle 6 ist die durchschnittliche Biogaszusammensetzung ersichtlich [29, S. 17].

Tabelle 6: Zusammensetzung von Biogas (modifiziert nach [29, S. 18, Tab. 1])

Gaskomponente	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	H ₂	NH ₃	H ₂ S
Vol-%	50-75	25-50	1-10	0-5	0-2	0-1	0-1	0-0,6

Die theoretische, rechnerische Biogasausbeute ist von der Substratzusammensetzung an Kohlenhydraten, Proteinen und Fetten abhängig. Bei vollständigem anaeroben Abbau von Glucose wird eine spezifische Gasmenge von 790 l/kg organischer Trockensubstanz (oTS) (50 % CH₄-Gehalt) freigesetzt, bei Proteinen durchschnittlich 700 l/kg oTS (71 % CH₄-Gehalt) und bei Fetten ca. 1.270 l/kg oTS (68 % CH₄-Gehalt) [30, S. 11]. Protein- und fettreiche Substrate führen daher zu höheren Methankonzentrationen im Biogas. Sowohl die Biogasausbeute als auch die Biogaszusammensetzung schwanken je nach eingesetzten biogenen Abfallströmen, deren Substratzusammensetzung und deren Schwankungen in Abhängigkeit z.B. von der Jahreszeit oder dem Sammelsystem. In der nachfolgenden Tabelle 7 sind Biogaserträge und Methangehalte unterschiedlicher biogener Abfallströme aus einer Literaturstudie des Umweltbundesamtes angeführt [31, S. 26 f.].

Tabelle 7: Gaserträge und Methangehalte biogener Abfälle je Tonne biogener Abfall [31, S. 27]

Abfallart	Biogasertrag [m ³ /t]	Methangehalt im Biogas [%]
Bioabfälle (Biotonne)	110	60
Küchen- und Kantinenabfälle	170	70
Marktabfälle	110	65
Grünabfälle	150	60

Biogas kann nach entsprechender Aufbereitung für die Erzeugung von Wärme, Strom und als Treibstoff genutzt werden (siehe Abbildung 6).

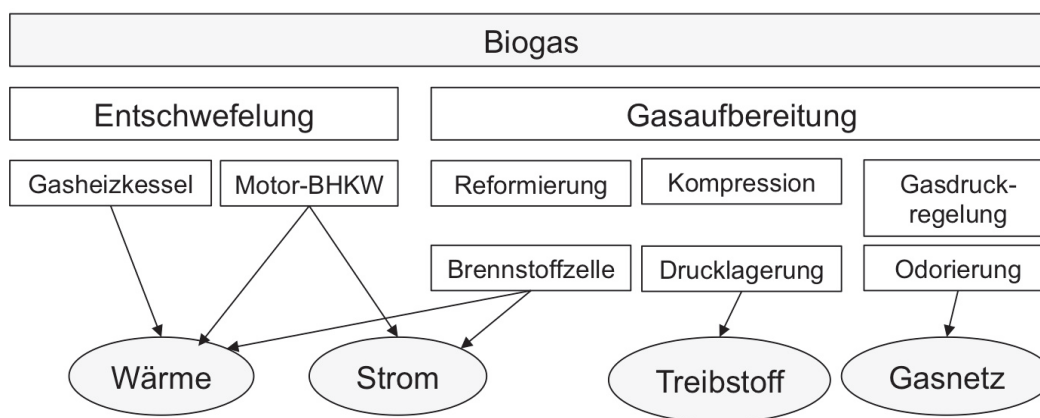


Abbildung 6: Verwendungsmöglichkeiten von Biogas (modifiziert nach [29, S. 17, Abb. 4])

Die Gasaufbereitung und Gasbehandlung ist je nach Verwertung erforderlich, z.B. Entwässerung, chemische und biologische Entschwefelung sowie Reinigung und Gasverdichtung. Beim Einsatz von Biogas in Brennstoffzellen und der Nutzung als Kraftstoff ist beispielsweise eine sehr gründliche Gasreinigung und Methananreicherung notwendig. Die Entwässerung erfolgt in der Regel mittels Kondensatfalle oder speziellem Gastrockner. Bei der Entschwefelung wird zwischen chemisch-physikalischen, biologischen und

kombinierten Verfahren unterschieden. Chemisch-physikalische Verfahren (Absorption, Adsorption, Oxidation, Druckwäsche und Membrantrennung) können Schwefelwasserstoffkonzentrationen im Reingas von weniger als 20 ppm erreichen, sind aber sehr kostenintensiv. Dagegen sind biologische Verfahren sehr wirtschaftlich, erreichen aber eine gesicherte Schwefelwasserstoffkonzentration von weniger als 20 ppm nicht alleine. Als wirtschaftliche und technisch sinnvolle Möglichkeit werden deshalb Verfahrenskombinationen eingesetzt, die eine biologische Grobreinigung mit einer nachfolgenden Feinreinigung in Ad- bzw. Absorbern verbinden [32, S. 25 ff.].

Auf die chemisch-physikalischen Verfahren Fällung durch direkte Eisensalzzugabe, Absorptions- bzw. Waschverfahren mit flüssigen Reaktionspartnern und Adsorption an Aktivkohle mit nachfolgender Oxidation des beladenen Adsorbens wird im Folgenden kurz eingegangen.

Bei der Fällung durch direkte Metallionenzugabe in das Gärsubstrat gehen die Sulfidionen mit den zugesetzten Metallionen schwer lösliche Metallsulfidverbindungen ein. Das Metallsulfid wird mit der Gärflüssigkeit ausgetragen. Als Fällmittel kommen meist Eisensalze wie Eisenchlorid oder Eisensulfat zum Einsatz. Andere Schwermetalle wie Kupfer, Nickel oder Kobalt werden aus ökologischen Gründen nicht eingesetzt [32, S. 27].

Bei den Absorptionsverfahren mit flüssigen Reaktionspartnern wird Schwefelwasserstoff mit Hilfe von Basen chemisch gebunden. Aus ökonomischen Gründen werden die Laugenwäsche mit Natronlauge oder Wäsche mit Aminen in Biogasanlagen zurzeit nicht verwendet [32, S. 28].

Zur Feinstreinigung des Biogases von Schwefelwasserstoff wird die Adsorption an Aktivkohle eingesetzt. Schwefelwasserstoff adsorbiert an der Oberfläche von Aktivkohle. Dann erfolgt in Anwesenheit von Sauerstoff eine katalytische Oxidation zum elementaren Schwefel. Mit steigender Beladung der Aktivkohle lässt die katalytische Aktivität nach, die Aktivkohle ist auszutauschen bzw. zu regenerieren [32, S. 30].

Bei der biologischen Entschwefelung wird durch die Zugabe des Luftsauerstoffs der Schwefelwasserstoff durch Mikroorganismen zu elementarem Schwefel oxidiert. Dieser akkumuliert sich auf den Oberflächen des Fermenters und gelangt wieder in das Substrat. Nur ein Teil wird mit dem Gärrest aus dem Fermenter ausgetragen. Nachteile dieses Verfahrens sind ein begrenzter Wirkungsgrad und die mögliche Bildung von Schwefelsäure. Denn mit dem Luftsauerstoff können sich im Gasraum Schwefelbakterien ansiedeln, die den Schwefelwasserstoff zu Schwefelsäure oxidieren. Diese Schwefelsäure verursacht Korrosionsschäden an Beton- und Metallwerkstoffen. Diese Entschwefelungsvariante ergibt keine sichere und konstante Gasqualität. Bei der Entschwefelung von Biogas in nachgeschalteten Biowäschern bzw. Filtern besteht der Unterschied zu dem zuvor genannten Verfahren, dass die Luftzufuhr genauer eingestellt werden kann und somit eine größere Betriebssicherheit bietet. Für die Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität ist dieses Verfahren wie die direkte biologische Entschwefelung ungeeignet, da eine erhöhte Menge an Sauerstoff und Inertgas in das Biogas eingebracht werden muss und diese Gasbegleitstoffe wieder aus dem Biogas entfernt werden müssen [23, S. 66 ff.]

3.5 Co-Vergärung

Eine Co-Vergärung bezeichnet eine Anlage in der mindestens zwei Substratarten vergoren werden. Die Substrate für Co-Vergärungsanlagen sind grundsätzlich organische Substratarten mit einem geringen Ligningehalt. Mögliche Eingangssubstrate aus dem landwirtschaftlichen Sektor sind Gülle, nachwachsende Rohstoffe (z.B. Maissilage) und pflanzliche Ernterückstände. Aus dem Sektor Abfallwirtschaft werden unter anderem kommunale Bioabfälle, Speisereste, überlagerte Lebensmittel und Klärschlamm anaerob behandelt [30, S. 1].

Eine Möglichkeit einer Co-Vergärung ist beispielsweise die biologische Behandlung von organischen Abfällen zusammen mit Klärschlamm am Standort kommunaler Kläranlagen. Werden schadstoffbelastete Substrate wie z.B. Klärschlamm in einer Co-Vergärung verwendet, ist eine stoffliche Verwertung der Gärreste oft nicht mehr möglich oder erwünscht. Bei entsprechender Qualität des Gärrestes, unter anderem abhängig vom Substrateintrag, kann dieser als organischer Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden [30, S. 1].

In Deutschland wurden im Rahmen eines Pilotversuches der Einfluss der Kombination unterschiedlicher Abfallarten auf die Leistungsfähigkeit und die Qualität der erzeugten Produkte (Kompost, Abwasser, Biogas) der Co-Vergärung von kommunalen Bioabfällen gemeinsam mit festen und flüssigen biogenen Abfällen aus dem Gewerbe untersucht. Vor dem Pilotversuch wurde die Anlage rein mit kommunalen Bioabfällen betrieben. Hinzu kamen Speiseabfälle und Panseninhalte. Negative Auswirkungen durch die Co-Vergärung konnten nicht festgestellt werden [33, S. 1].

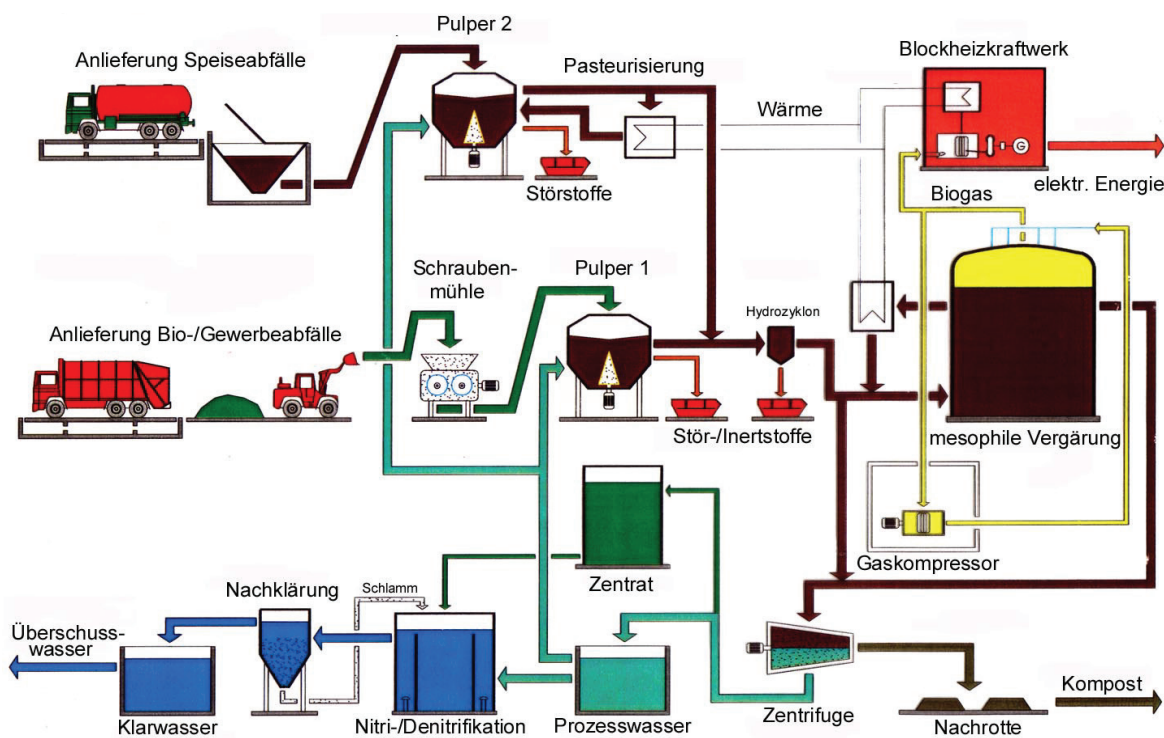


Abbildung 7: Verfahrensschema der Co-Vergärungsanlage [34, S. 3, Abb. 2]

Die Prozessführung der Co-Vergärungsanlage wird in Abbildung 7 verdeutlicht. Die angelieferten Speiseabfälle werden gewogen und in einem verschließbaren Bunker zwischengelagert. Über eine Förderschnecke erfolgen eine Zerkleinerung und der Transport in den Pulper 2. Im Abfallpulper werden die vorzerkleinerten Abfälle unter Zugabe von rezirkuliertem Prozesswasser nassmechanisch zum Gärsubstrat aufbereitet. Durch die Aufbereitung sollen die organischen Abfallinhaltsstoffe homogenisiert und suspendiert, sowie Störstoffe in Form von Rechengut oder als Schwerstoffe abgetrennt werden. Die Bioabfälle und Schlachthofabfälle (vorwiegend Panseninhalte) werden in einer Halle abgeladen und mit einem Radlader in eine Schraubenmühle aufgegeben. Anschließend wird der zerkleinerte Abfall unter Zugabe von rezirkuliertem Prozesswasser im Abfallpulper 1 von Störstoffen mittels Rechen und Schwerstoffschleuse abgetrennt. Die abgetrennten Störstoffe wie Kunststofffolien oder Steine werden separat entsorgt. Die beiden Abfallpulpen besitzen einen Trockenrückstand von ca. 7-9 Masse-% und werden in einem Vorlagebehälter zwischengelagert. Mittels hydrodynamischer Schwerstoffabscheidung werden feine Schwerstoffe wie Sand oder Glassplitter abgetrennt. Mit diesem aufbereitetem Abfall wird der Methanreaktor beschickt, der mittels Biogaseinpressung durchmischt wird. Das Biogas wird in Blockheizkraftwerken energetisch verwertet. Die vergorene Pulpe wird mittels Zentrifuge entwässert. Der feste Gärrest wird zusammen mit Grünabfällen und Holzhäckselgut als Strukturmaterial in einer offenen Mietenkompostierung nachgerottet. Das Zentrat der vergorenen Pulpe wird entweder direkt für die Nassaufbereitung verwendet oder biologisch durch eine Denitrifikation und eine Nitrifikation gereinigt [34, S. 3 f.], [33, S. 3 ff.].

Tabelle 8: Inhaltsstoffe der verwendeten Substrate sowie Methanausbeute (modifiziert nach [33, S. 8, Tab. 2 u. S. 9])

Parameter	Einheit	Kommunale Bioabfälle	Speiseabfälle	Panseninhalte
Trockensubstanz (TS)	[% FS]	29	23	14
Glühverlust (organische Trockensubstanz)	[% TS]	63	93	90
Salzgehalt	[% TS]	3,2	6,2	4,9
Salzgehalt	[g/kg FS]	9,2	14,5	7,1
Methanausbeute nach 28 Tagen von Monochargen	[Nm ³ /t]	59	142	41,5

Im Mittel beträgt der Anteil der Gewerbeabfälle (Speiseabfälle und Panseninhalte) 14 Masse-% bei der Co-Vergärung. Bei den Inhaltsstoffen (siehe Tabelle 8) der Inputmaterialien ist deutlich erkennbar, dass die Speiseabfälle und die Panseninhalte sehr hohe Gehalte an organischer Substanz im Vergleich zu den kommunalen Bioabfällen aufweisen. Die Trockensubstanz der Bioabfälle ist etwas höher als die der Speiseabfälle und etwa doppelt so hoch wie die der Panseninhalte. Ein Vergleich des Salzgehaltes hängt von den unterschiedlichen Wassergehalten ab, ob die Daten auf die Trockensubstanz oder auf die Feuchtsubstanz bezogen werden. Auf die Feuchtsubstanz bezogen enthalten Panseninhalte einen geringeren Salzgehalt als kommunale Bioabfälle und Speiseabfälle. Hingegen beim Salzgehalt bezogen auf die Trockensubstanz haben die kommunalen Bioabfälle den

niedrigsten Salzgehalt. Der Methanertrag war bei der Verwendung von Speiseabfällen etwa 2,4-fach höher als bei der Verwendung von Bioabfall. Das Biogaspotential der Panseninhalte war indessen etwas kleiner als das der Bioabfälle [33, S. 8 f.].

Die Konzentration der für die Kompostqualität maßgeblichen Schadstoffe (Schwermetalle, PCB) in Speiseabfällen und Panseninhalten sind im Vergleich zu typischen Bioabfällen eher als niedrig einzustufen. Bei Bioabfällen und Speiseabfällen gelangen von jeweils 100 kg Abfall ca. 23-25 kg Trockensubstanz in die Abfallpulpe. Für die Biogasbildung ist der Gehalt der Pulpe an organischer Substanz maßgeblich. Bei Speiseabfällen wurden 23 % des Abfalls in Form von organischer Substanz in die Pulpe eingetragen. Vergleichsweise wenig nur 14 bzw. 12 % waren dies bei Bioabfällen und Panseninhalten [33, S. 9 f.].

Ein negativer Einfluss der Co-Vergärung auf den Prozess der Vergärungsanlage konnte anhand der Biogasproduktion nicht erkannt werden. Weiters konnten keine nachteiligen Veränderungen der Gärreststoffqualität von der Co-Vergärung von Bioabfällen und bis zu 14 Masse-% organischer Gewerbeabfälle im Vergleich zu einer reinen Bioabfallvergärung gesehen werden. Das in der betriebseigenen Kläranlage vorgereinigte Überschusswasser war bei reiner Bioabfallvergärung und bei Co-Vergärung weitgehend identisch. Die Vorreinigung ersetzt aber nicht eine Ableitung in die kommunale Kläranlage aufgrund zu hohen Gehalten an schwerabbaubaren organischen Abwasserinhaltsstoffen, erhöhten Nährstoffkonzentrationen und hohen Salzgehalten. Für die Aufbereitung von Speiseresten ist im Vergleich zur Aufbereitung von kommunalen Bioabfällen eine eigene Hygienisierung notwendig [33, S. 14 ff.].

3.6 Vergleich Vergärung - Kompostierung

Die Kompostierung hat die Aufgabe biologisch abbaubare organische Abfälle in verwertbaren Kompost umzuwandeln. Demgegenüber steht bei einer anaeroben Behandlung von Abfällen der Abbau von Kohlenstoffverbindungen und deren Umwandlung in nutzbares Gas im Vordergrund. Die anfallenden Rückstände werden je nach verwendetem Substrat verwertet oder entsorgt. In der nachfolgenden Tabelle 9 sind die Unterschiede der Vergärung und Kompostierung am Beispiel von Bioabfall dargestellt.

Aus Tabelle 9 ist erkennbar, dass die aerobe Behandlung von Abfällen besonders geeignet ist für trockenere, ligninhaltige Abfälle, die häufig im ländlichen Raum auftreten. Städtische Bioabfälle, die sehr häufig feuchter, schlammartig und pastös sind und weniger ligninhaltige Bestandteile aufweisen, können anaerob effektiver behandelt werden. Material aus der Biotonne, Grünschnitt, Landschaftspflegematerial, auch Stroh, Gras und andere (landwirtschaftliche) Abfälle sind manchmal schlecht oder gar nicht rührbar und besitzen oft einen hohen Störstoffanteil. Daher ist für einen störungsfreien Reaktorbetrieb bei der Vergärung eine weitestgehende Voraufbereitung dieser Abfälle notwendig [35, S. 13 ff.].

Der Vorteil bei den anaeroben Verfahren ist die Nutzung des entstandenen Biogases. Der Betrieb einer Anlage mit positiver Energiebilanz ist möglich und der Flächenbedarf ist bei der Vergärung geringer als bei der Kompostierung [35, S. 13 ff.].

Die Kompostierung hat den Ligninabbau und den geringen technischen Aufwand zum Vorteil. Hingegen kommt es bei ungekapselten aeroben Verfahren teilweise zu beträchtlichen Geruchsemissionen. Bei der Vergärung mit einer vollständigen Kapselung ist die Geruchsemission vernachlässigbar [35, S. 13 ff.].

Zur Befeuchtung des Rottegutes kann evtl. entstandenes Sickerwasser aus der Kompostierung verwendet werden. Dabei ist aber auf die Gefahr einer Aufkonzentrierung von Schadstoffen und Salzen zu achten. Diese Gefahr bei der Kreislaufführung der Prozesswässer besteht bei (nassen) anaeroben Verfahren weniger [35, S. 13 ff.].

Tabelle 9: Vergleich der Vergärung und Kompostierung am Beispiel von Bioabfall (modifiziert nach [35, S. 13, Tab. 4])

	Vergärung	Kompostierung
Prozess	2 Phasen: Substrat, Wasser	3 Phasen: Substrat, Wasser, Luft
Ausgangsmaterial	strukturarm, nass, ligninfrei	struktureich, ligninhaltig
Wassergehalt	60-75 % (trocken) 85-95 % (nass)	40-60 %
pH-Wert	5,2-6,3 (Hydrolyse/Säurebildung) 6,8-7,2 (Essigsäure-/Methanbildung)	neutral bis basisch
C/N-Verhältnis	20:1 bis 40:1	35:1
O ₂ -Versorgung	-	0,9 g O ₂ /g org. Substanz
Technischer Aufwand	groß bis sehr groß Korrosionsgefahr	gering bis groß keine Korrosionsgefahr
Reaktionsart	schwach exotherme biochemische Reaktion	exotherme biochemische Reaktion
Hygienisierung	nur bei thermophiler Prozessführung gewährleistet, sonst Nachbehandlung (Rotte) erforderlich; für tierische Nebenprodukte: eigene Hygienisierung	gewährleistet
Prozessdauer	1-3 Wochen anaerob 3-6 Wochen aerob (Nachrotte)	10-19 Wochen
Emissionen	durch geschlossene Reaktionsführung keine Geruchsemissionen, kein Luftumsatz	Geruchsproblematik großer Luftumsatz
Energiebilanz [36, S. 10]	Überschuss von ca. 100 kWh/t _{Bioabfall}	Verbrauch von ca. 60-80 kWh/t _{Bioabfall}
Treibhausgas-Bilanz [31, S. 8]	Bei Erzeugung von Biomethan aus Speiseabfällen: höchste Treibhausgas-Emissionen (bis 155 kg CO _{2-eq} /t Speiseabfall) und höchste Treibhausgas- Gutschrift (bis -302 kg CO _{2-eq} /t Speiseabfall) => Treibhausgasbilanz: -147 kg CO _{2-eq} /t (Speiseabfall)	Bei der teilgeschlossenen Kompostierung: geringste Emissionen (60 kg CO _{2-eq} /t) und geringste Gutschriften (-24 kg CO _{2-eq} /t) => Treibhausgasbilanz: Emission von 36 kg CO _{2-eq} /t

Der Energieverbrauch ist verfahrensabhängig und ist nur überschlagsweise in der Literatur angeführt. Bei der Kompostierung werden ca. 60-80 kWh/t_{Bioabfall} aufgrund der energieintensiven Belüftung und Umsetzung verbraucht. Während bei der Vergärung ein Überschuss von ca. 100 kWh/t_{Bioabfall} aufgrund der Nutzung des Biogases entsteht [36, S. 10].

Bei der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan beträgt der Nettoenergiegewinn im Mittel 599 kWh/t biogener Abfall, wobei der Nettoenergiegewinn je nach Ausgangssubstrat unterschiedlich ist (425 kWh/t Biotonne, 856 kWh/t Küchen- und Kantinenabfälle). Bei der Nutzung von Biogas rein zur Wärmerzeugung liegt der Nettoenergiegewinn rund 15 % unter der Aufbereitung zu Biomethan. Der Nettoenergiegewinn bei Nutzung des Biogases in einem Blockheizkraftwerk zur Stromgewinnung liegt je nach Abfall zwischen 159 kWh/t (Biotonne) und 342 kWh/t (Speisereste). Zusammengefasst werden über alle biogenen Abfälle im Durchschnitt bei der Erzeugung von Biomethan 48 % des Energieinhaltes des Abfalls, bei der Erzeugung von Strom und vollständiger Nutzung der erzeugten Wärme 41 % des Energieinhaltes und bei der reinen Stromerzeugung nur 18 % des Energieinhaltes des Abfalls genutzt [31, S. 5 f.].

Die höchsten Treibhausgasemissionen und die höchsten Gutschriften weisen die Varianten der Vergärung mit Erzeugung von Biomethan auf. Die geringsten Emissionen und Gutschriften treten bei der teilgeschlossenen Kompostierung auf. Die Vergärung mit Aufbereitung des Biogases zu Biomethan weist mit Werten bis zu -147 kg CO₂-eq/t (Speiseabfälle) die beste Treibhausgas-Bilanz bei Vergleich der Vergärung zur Kompostierung von biogenen Abfällen [31, S. 8].

4 Situation der Abfallentsorgung aus Handelsketten im Untersuchungsgebiet

In Österreich werden hausmüllähnliche Gewerbeabfälle je nach der gesetzlichen Lage jedes Bundeslandes entweder gemeinsam mit der kommunalen Systemmüllabfuhr oder getrennt behandelt. Tatsache ist, dass zum gegenständlichen Untersuchungszeitraum kaum Datenmaterial zur umfassenden stofflichen und chemisch-physikalischen Charakterisierung von Restmüll und Biomüll einzelner Branchen existierte. So wurde in Kooperation mit einem privaten Entsorgungsunternehmen jener Teilstrom des Rest- und Biomülls, welcher im Handelskettenbereich anfällt, stofflich und chemisch-physikalisch charakterisiert [38, S. 173].

Für das gegenständliche Untersuchungsgebiet werden in diesem Kapitel die Vorerhebungen zur Abfallentsorgung aus dem Lebensmitteleinzelhandel dargestellt. Es wird auf den Lebensmitteleinzelhandel in Österreich, deren Umgang mit den nicht mehr verkehrsfähigen Lebensmitteln, dem Abfallaufkommen und dem Sammelsystem inklusive der Logistik eingegangen. Abschließend wird der Andienungszwang bzw. die Pflichtabfuhr der Landesabfallwirtschaftsgesetze dargestellt. Dies bedeutet, ob ein Betrieb seine nicht gefährlichen Abfälle aus dem Handelsbereich über die kommunale Entsorgung abzuführen hat oder nicht.

4.1 Lebensmitteleinzelhandel in Österreich

Der Lebensmitteleinzelhandel verfolgt das Ziel, den privaten Haushalten Güter des täglichen Bedarfs zur Verfügung zu stellen. Zu den Gütern zählen neben Nahrungs- und Genussmitteln auch Drogeriewaren und konsumnahe Non-Food-Artikel. Als Auswirkungen der Geschäftstätigkeit zur Bereitstellung von Lebensmitteln zeigen sich unter anderem Umweltauswirkungen durch die Logistik und die langen Transportwege, im Ressourcenverbrauch an den Verkaufsstandorten und bei der Entsorgung von Abfällen in den Filialen [37, S. 37].

Im Jahr 2009 konnte der Lebensmitteleinzelhandel in Österreich mit 5.833 Geschäften einen Umsatz von 17 Milliarden Euro erwirtschaften. Dies entspricht einem Umsatzplus von 2 % im Vergleich zum Vorjahr. Die Anzahl der Geschäfte sank auf 5.652 im Jahr 2011. Der Umsatz hingegen stieg auf 17,7 Milliarden Euro in jenem Jahr. Bei der Entwicklung des Lebensmitteleinzelhandels in Österreich ist zu erkennen, dass es in den letzten Jahren zu einem kontinuierlichen Rückgang in der Anzahl der Geschäfte gekommen ist. So gab es im Jahr 2007 vergleichsweise noch 6.076 Geschäfte im Gegensatz zu 5.652 Geschäften im Jahr 2011 [39, S. 9].

Nachfolgende Abbildung 8 stellt die wichtigsten Unternehmen im österreichischen Lebensmitteleinzelhandel im Jahr 2009 dar und zeigt, dass die Rewe International AG mit den Handelsmarken Billa, Merkur, Penny und der kooperierenden Sutterlüty den größten Marktanteil von 31 % besitzt. Danach folgt mit 28,4 % das Handelsunternehmen Spar mit den Handelsmarken Interspar, Eurospar, Maximarkt und den Spar-Supermärkten. Der Discounter Hofer ist an dritter Stelle in Österreich mit 19,8 %. Bei Betrachtung der Entwicklung des österreichischen Lebensmitteleinzelhandels von 2009 bis 2011 ist zu erkennen, dass ein

starker Konzentrationsprozess stattfindet. Die Konzentration zeichnet sich durch die sinkende Anzahl an Geschäften bei gleichzeitig steigenden Geschäftsflächen auch dadurch aus, dass größere Organisationen die Kontrolle über weniger und größere Geschäfte haben. Die Anzahl der Supermärkte an der Gesamtanzahl der Lebensmitteleinzelmärkte mit einer Verkaufsfläche von 400-999 m² entwickelten sich von 44,8 % im Jahr 2009 auf 46,6 % im Jahr 2011. Auch die Diskonter Hofer und Lidl (Anmerkung: werden ohne Verkaufsfläche in einer eigenen Kategorie lt. A.C. Nielsen Ges.m.b.H. angeführt) konnten einen Geschäftezuwachs von 10,6 % im Jahr 2009 auf 11,3 % im Jahr 2011 verzeichnen [39, S. 11].

Handelsunternehmen	Geschäftsanzahl Stand: April 2010	Verbrauchermärkte	Supermärkte	Selbständige Händler	Diskonter	Marktanteil 2009 (Hofer und Lidl geschätzt)
REWE LH (exkl. ADEG)	1429	MERKUR	BILLA	SUTTERLÜTY	PENNY	31,0%
ADEG	478	MAGNET	ADEG Aktiv ADEG	ADEG Aktiv ADEG		3,7%
SPAR	1427	INTERSPAR EUROSPAR MAXIMARKT	EUROSPAR SPAR	SPAR		28,4%
HOFER	430				HOFER	19,8%
MARKANT ÖSTERREICH KASTNER, KIENNAST, PFEIFFER, WEDL	952	TABOR PRO Kaufland WELAS	NAH & FRISCH UNIMARKT	NAH & FRISCH + Kaufleute		5,2%
ZIELPUNKT	311		ZIELPUNKT		PLUS	3,9%
LIDL	189				LIDL	3,8%
MPREIS	176		MPREIS			

Abbildung 8: Lebensmitteleinzelhändler in Österreich [40, S. 8]

In Wien lag die Anzahl der Geschäfte des Lebensmitteleinzelhandels im Jahr 2009 bei 866 [40, S. 17] und im Jahr 2011 bei 870 [39, S. 14]. Der Vergleich zu den österreichweiten Tendenzen zeigt, dass in der Bundeshauptstadt der Rückgang der Anzahl an Geschäften gegenläufig ist. Die steigenden Geschäftsflächen sind aber ebenso ersichtlich. Waren im Jahr 2009 noch 47,2 % der Anzahl an Geschäften Supermärkte mit einer Verkaufsfläche von 400-1.000 m² so stiegen sie im Jahr 2011 auf 48,3 %. Ebenso nahm die Anzahl an Geschäften der Diskonter Hofer und Lidl zu [40, S. 17], [39, S. 14].

4.2 Nicht mehr verkehrsfähige Lebensmittel

Da der Konkurrenzkampf im Lebensmittelhandel besonders groß ist, wird dem Kunden oft bis Ladenschluss ein volles Regal mit perfekter Ware angeboten. Folglich kommt es aber auch oft vor, dass der Händler am Abend massenweise nicht verkaufte frische Ware wegwerfen muss. Manchmal landen die Produkte auch schon Tage vor Ablauf des Mindesthaltbarkeitsdatums im Müll, da sie offensichtlich nicht mehr zu verkaufen sind.

In Österreich landen beispielsweise pro Person 40 kg Nahrungsmittel pro Jahr im Restmüll. Darin inkludiert ist auch die Entsorgung der Produktion und des Handels über die Restmülltonne [41, S. 52].

Nachfolgend wird auszugsweise angeführt, wie einzelne Handelsketten mit den nicht mehr verkehrsfähigen Lebensmitteln umgehen. Die Daten sind der Studie zum Thema „Nachhaltigkeit und Corporate Social Responsibility (CSR) im österreichischen Lebensmitteleinzelhandel“ [41] mit der Erhebungsphase Juni bis August 2011 entnommen.

Rewe schult Mitarbeiter und Kunden über das hauseigene Marktradio im richtigen Umgang mit Lebensmitteln und kooperiert mit Tafeln, Sozialmärkten und regionalen karitativen Einrichtungen, um überschüssige Lebensmittel sinnvoll zu verwerten [41, S. 52].

Spar kooperiert mit Tafeln, Sozialmärkten und anderen karitativen und sozialen Einrichtungen und berücksichtigt die Abfallproblematik in der Prämienberechnung für Filialleiter. Es wird auch versucht in den Intersparfilialen die Überschussmengen an Brot durch eine bedarfsorientierte Brotproduktion zu vermeiden [41, S. 52].

Das Sortiment der Diskonter ist im Vergleich zu den anderen Supermärkten reduziert. Sie bieten außer bei Obst und Gemüse (Stückgut) kaum unverpackte Ware. In den Hoferfilialen erfolgt die Mengendisponierung für diese Waren dezentral und kurzfristig. Darüber hinaus werden Überschusswaren preisreduziert angeboten oder an verschiedene karitative und soziale Einrichtungen gespendet. Lidl kooperiert mit verschiedenen Sozialmärkten sowie Tafeln und ein Teil der nicht mehr verkehrsfähigen Ware wird auch zentral als Biomasse zur „Ökostromproduktion“ verwertet [41, S. 52].

4.3 Abfallaufkommen im Lebensmitteleinzelhandel

Über das Abfallaufkommen im Lebensmitteleinzelhandel sind kaum Literaturdaten vorhanden. In der Studie zum Thema „Nachhaltigkeit und CSR im österreichischen Lebensmitteleinzelhandel“ wird das Abfallaufkommen auf Basis von erhaltenen Daten, die häufig lückenhaft oder weder intern noch extern vergleichbar sind, beschrieben [41, S. 72]. Beim Tiroler Einzelhändler MPreis ist seit 2006 eine stetige Zunahme hinsichtlich des Gesamtabfallaufkommens (Restmüll inkl. Wiederverwertbarem) unter Berücksichtigung der vergrößerten Verkaufsfläche feststellbar. Die Restmüllmenge ist aber im Zeitraum von 2006 bis 2010 von ca. 700 auf ca. 300 t gesunken. Bei Rewe zeigen die Zahlen zwischen 2008 und 2010 eine konstant steigende Gesamtabfallmenge. Die Abfallverwertungsquote wird mit konstant über 90 % angegeben [41, S. 74]. Hofer gibt für 2010 eine Recyclingquote von über 86 % an. Die Gesamtabfallmenge von Hofer für 2010 liegt ca. 45 % (bezogen auf die Verkaufsfläche) über dem Gesamtabfallaufkommen von MPreis. Lidl verweist auf eine Restmüllreduktion von 2009 auf 2010 von 20 %. Plastikfolie und Karton werden verwertet. 2009 wurde beim Diskonter Lidl eine „Zentralabteilung Entsorgungslogistik“ eingerichtet, die sich schwerpunktmäßig mit einer „Optimierung der Prozesse“ beschäftigt [41, S. 76].

4.4 Andienungszwang

In den neun Landesabfallwirtschaftsgesetzen ist die Entsorgung privater Haushalte und ähnlicher Einrichtungen geregelt. Diese „ähnlichen Einrichtungen“ sind Anfallsstellen mit Abfällen vergleichbarer Zusammensetzungen wie jene aus privaten Haushalten. In einzelnen Landesgesetzen wird auch eine Vergleichbarkeit der Menge vorausgesetzt. Die Landesgesetze geben in unterschiedlichem Umfang den Kommunen die rechtliche Voraussetzung, auch die Entsorgung von betrieblichen Anfallsstellen mit größeren Mengen an hausmüllähnlichen Abfällen zu übernehmen. Das bedeutet, der Betrieb darf das für ihn am besten geeignete Entsorgungsangebot nicht frei wählen. Eine „Andienungspflicht“ verpflichtet den Betrieb je nach Einzelfall seine Abfälle der kommunalen Abfuhr „anzudienen“. Grundsätzlich gilt: Außerhalb des jeweils geltenden Pflichtabfuhrbereiches hat der Betrieb seine Abfälle jedenfalls eigenverantwortlich zu entsorgen. Innerhalb des Pflichtabfuhrbereiches sind die davon erfassten Abfälle an den kommunalen Entsorger zu liefern.

Siedlungsabfälle sind gemäß AWG 2002 „Abfälle aus privaten Haushalten und andere Abfälle, die auf Grund ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus privaten Haushalten ähnlich sind“ [1, § 2, Abs. 4, Z 2]. Der Begriff „Siedlungsabfälle“ kann entsprechend den Fraktionen wie z.B. biogene Abfälle, Restmüll und Sperrmüll untergliedert werden. Der Andienungszwang von „haushaltsähnlichen“ gewerblichen Abfällen wird vom jeweiligen Landesgesetzgeber unterschiedlich definiert.

Nachfolgend ein Auszug der neun unterschiedlichen Vorschriften in den Bundesländern:

Wien: Der Gemeinde obliegt die Sammlung und Abfuhr des Mülls durch die öffentliche Müllabfuhr – es sei denn, es besteht eine Ausnahme (§ 18 Wr. AWG). Betriebe können eine solche Ausnahme beantragen [13, § 16].

Niederösterreich: Abfälle, die in Betrieben anfallen und vom Abfallaufkommen in Menge und Zusammensetzung mit einem privaten Haushalt vergleichbar sind, unterliegen der Pflichtabfuhr [43, § 3 Abs. 3 u. § 9].

Burgenland: Betriebe, deren Abfälle von gleicher Art und Menge sind wie Abfälle, die in einem Haushalt anfallen, gehören zum Pflichtabfuhrbereich. Betriebe können eine Ausnahme beantragen, wenn der Antragsteller über eigene, behördlich genehmigte Abfallbehandlungsanlagen verfügt, die auch zur Behandlung des Haushalts- und Sperrmülls geeignet sind und nachgewiesen wird, dass dieser Müll entsprechend den Bestimmungen des § 4 Burgenländischen AWG und den Grundsätzen des Landes-Abfallwirtschaftsplans entsorgt wird [44, § 11 u. § 12].

Steiermark: In den Pflichtabfuhrbereich fallen Betriebsabfälle, die auf Grund ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus privaten Haushalten ähnlich sind. Unternehmen, die gemäß § 10 AWG 2002 ein Abfallwirtschaftskonzept zu erstellen haben, können unter bestimmten Bedingungen eine Ausnahme erhalten [45, § 4 u. § 6].

Kärnten: Betriebe und sonstige Arbeitsstellen haben ihren Hausmüll zu den festgelegten Abfuhrterminen durch die Gemeinde abholen zu lassen, wenn es sich bei diesem Hausmüll aus Betrieben um nicht gefährliche Abfälle handelt, die mit Abfällen aus privaten Haushalten vergleichbar sind, durchschnittlich in einem Volumen bis 240 Liter pro Woche anfallen und ihre Erfassung durch das ortsübliche Hausmüllsammelsystem möglich ist [46, § 2 u. § 20].

Oberösterreich: Feste Abfälle aus Gewerbe, die in ihrer Zusammensetzung oder Beschaffenheit Hausabfällen ähnlich sind, unterliegen nicht generell der Pflichtabfuhr. Haushaltsähnliche Gewerbeabfälle können aber über die Abfallordnung in den Abholbereich der Gemeinden eingebunden werden, wenn dies im Interesse einer wirtschaftlichen und zweckmäßigen Organisation der Sammlung dieser Abfälle geboten ist [47, § 2, § 5 u. §6].

Salzburg: Hausabfallähnliche Abfälle sind als Abfälle definiert, die im Rahmen von Anstalten, Betrieben und sonstigen Arbeitsstätten anfallen mit ähnlicher Art und Zusammensetzung wie in privaten Haushalten und die sowohl für die gemeinsame Erfassung als auch für die gemeinsame Behandlung mit Hausabfällen geeignet sind. Hausabfallähnliche Abfälle zählen lt. Begriffsbestimmung zu den Hausabfällen und sind der Pflichtabfuhr anzudienen. Betriebe können sich aber unter bestimmten Voraussetzungen auf bis zu drei Jahre von der Erfassung durch die Gemeinde befreien [48, § 1, § 10 u. § 12].

Tirol: Für Restmüll auch aus Betrieben besteht Andienungspflicht. Restmüll wird als jener Siedlungsabfall, der nach der Trennung von den getrennt zu sammelnden Siedlungsabfällen und dem Sperrmüll verbleibt, definiert. Sonstige Abfälle (z.B. betriebliche Produktionsabfälle) sind vom Betrieb je nach Verwertbarkeit des Abfalls einer entsprechenden Verwertung oder Beseitigung zuzuführen [49, § 2, § 11 u. § 12].

Vorarlberg: Die nicht gefährlichen Siedlungsabfälle sind von der Gemeinde zu sammeln und abzuführen, ausgenommen der Abfälle, die in gewerblichen Betriebsanlagen anfallen. Siedlungsabfälle sind Abfälle aus privaten Haushalten und andere Abfälle, die aufgrund ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus privaten Haushalten ähnlich sind. Allerdings können die nicht gefährlichen Siedlungsabfälle aus gewerblichen Betriebsanlagen durch Verordnung einer Gemeindevertretung in die Systemabfuhr einbezogen werden [50, § 2 u. § 7].

4.5 Sammelsystem – Logistik

Im gegenständlichen Untersuchungsgebiet Wien und dessen Einzugsgebiet Vösendorf werden zum Untersuchungszeitpunkt der Rest- und Biomüll aus dem Lebensmitteleinzelhandel sowohl durch das kommunale Sammelsystem als auch entgegen dem Andienungszwang in Wien und Niederösterreich privat entsorgt. Die Biomülltonne wird zurzeit meist in die Verwertungsschiene „Kompostierung“ gelenkt. Der Restmüll gelangt gegenwärtig in die Müllverbrennungsanlage.

Handelsketten haben teilweise eigene Konzepte zur Sammlung von Altstoffen. Beispielsweise gibt es von Konzernen eigene Rücknahmen von Kartons, Holzsteigen und Kunststoffgitterboxen. Große Fehlchargen, die z.B. bei Ausfall von Kühlaggregaten anfallen, werden extra entsorgt. Fleischware wird durch den Fleischhauer und Backware durch den Bäcker zurückgenommen und entsprechend verwertet oder entsorgt.

Die Sammelmethode für Restmüll und Biomüll aus dem Lebensmitteleinzelhandel werden vor allem von den anfallenden Mengen, zum Teil auch von den Platzverhältnissen in den Betrieben bestimmt. Beispielsweise ist eine typische Abfuhrmethode, dass an der Anfallsstelle Umleerbehälter aufgestellt sind, die von Pressfahrzeugen des beauftragten Entsorgungsunternehmens auf regelmäßig durchgeführten Touren entleert werden. Gängige Größenordnungen der Umleerbehälter für Supermärkte sind 240 Liter oder 770 Liter für Biomüll und 1.100 Liter für Restmüll.

Im Entsorgungsgebiet des Unternehmens befinden sich mit Stand Oktober 2009 209 Supermarktfilialen. Alle Filialen verfügen über Restmüllbehälter mit einem Volumen von 1.100 Liter. In 100 Filialen werden für die Biomülltonnen 240-Liter-Behälter bereitgestellt und in 84 Filialen 770-Liter-Behälter. 25 Filialen fordern keine Biomülltonnen für die Entsorgung an (siehe Tabelle I im Anhang).

Mit Stand Oktober 2009 werden jährlich 35.251 Stück 1.100-Liter-Restmüllbehälter, 11.847 Stück 240-Liter-Biomüllbehälter und 8.107 Stück 770-Liter-Biomüllbehälter aus dem Lebensmitteleinzelhandel im Entsorgungsgebiet Wien und dem nahen Einzugsgebiet von Wien entleert (siehe Tabelle I im Anhang).

Auf Basis der Untersuchungen im September 2009 und Jänner 2010 wurden je 1.100-Liter-Restmülltonne eine Masse von durchschnittlich 92,8 kg Restmüll, je 240-Liter-Biomülltonne durchschnittlich 43 kg Biomüll und je 770-Liter-Biomüllbehälter durchschnittlich 170,8 kg Biomüll berechnet. Somit ergeben sich mit den durchschnittlichen Füllmengen sowie der jeweiligen Anzahl an Mülltonnen rechnerisch rund 3.300 t Restmüll und rund 2.000 t Biomüll aus dem Lebensmitteleinzelhandel im gegenständlichen Entsorgungsgebiet für ein Jahr (siehe Tabelle II im Anhang).

Lt. Abfallumrechnungstabelle der Wiener Umweltberatung wird für Restmüll in einem 1.100-Liter-Behälter 117,70 kg Abfallinhalt angegeben, für Biomüll in einem 240-Liter-Behälter 39,60 kg Abfallinhalt und für einen 770-Liter-Biomüllbehälter wird ein Inhalt von 123,97 kg angeführt. Bei diesen Gewichtsangaben ist ein Füllgrad von 100 % angemerkt [42].

4.6 Behandlungsmöglichkeiten von Abfällen aus dem Handelskettenbereich

Die gegenständlich charakterisierten Abfälle aus dem Lebensmitteleinzelhandel werden in Österreich mengenmäßig nicht extra erfasst. Somit erfolgt in diesem Unterkapitel zuerst ein Überblick über das Abfallaufkommen an Restmüll und getrennt gesammelten biogenen Abfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen sowie dessen derzeitige Behandlungsmöglichkeiten mit den Anlagenkapazitäten in Österreich. Im Kapitel 6 erfolgt

dann eine Treibhausgasbilanz von aeroben, anaeroben und thermischen Modellbehandlungsanlagen.

4.6.1 Restmüll- und Biomüllaufkommen

Das Restmüllaufkommen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen (d.h. inkl. des Lebensmitteleinzelhandels) beträgt im Jahr 2010 1.405.300 t in Österreich [51, S. 19]. Davon wurden rund 78,3 % direkt einer thermischen Behandlung bzw. die heizwertreiche Fraktion aus dem Splitting einer Müllverbrennungsanlage zugeführt. Biotechnisch behandelt wurde mit rund 19,6 % die heizwertarme Fraktion aus dem Splitting. Den geringsten Anteil mit rund 2,1 % besitzen die aussortierten Altstoffe, die stofflich verwertet werden [51, S. 30].

Die getrennt gesammelten biogenen Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen (Biotonnen sowie Grünschnitt) in Österreich sind für das Jahr 2010 mit 705.400 t zu beziffern [51, S. 19]. Die Verwertung erfolgt entweder aerob in Kompostierungsanlagen oder anaerob in Biogasanlagen [51, S. 41].

4.6.2 Behandlungswege

In den folgenden Unterkapiteln erfolgt ein Überblick über Anlagen zur thermischen, anaerob biotechnischen und aerob biotechnischen Behandlung von Restmüll bzw. Biomüll aus Supermärkten in Österreich. Weiters werden jeweils die Anlagenkapazitäten in Österreich angeführt.

Angemerkt sei, dass die Einsatzmöglichkeit des Restmülls aus Supermarktketten in Splittingsanlagen, aufgrund des hohen biogenen Anteils und der hohen Feuchte des ggst. Restmülls, nicht betrachtet wird.

4.6.2.1 Thermische Behandlung

Im Jahr 2012 waren elf Anlagen zur Verbrennung von Siedlungsabfällen mit einer Gesamtkapazität von rund 2,5 Millionen Tonnen in Österreich in Betrieb. Restmüll wird vor allem in sieben Anlagen thermisch behandelt. Vier Wirbelschichtfeuerungsanlagen stehen überwiegend den heizwertreichen Fraktionen und Klärschlamm zur Verfügung [51, S. 119].

4.6.2.2 Anaerobe biotechnische Behandlung

In Österreich waren im Jahr 2010 fünf Großanlagen zur Vergärung biogener Abfälle in Betrieb. Die Anlagen Salzburg, Lustenau und Roppen sind als Trockengärverfahren ausgelegt. Die Anlagen Wels und Wien sind als Nassgärverfahren konzipiert. Diese fünf Anlagen haben zusammen eine Behandlungskapazität von ca. 80.000 Jahrestonnen Bioabfall [31, S. 14]. Zur Menge der in Co-Vergärungsanlagen eingesetzten biogenen Abfälle liegen keine Angaben vor. 2010 befinden sich 157 Biogasanlagen, die keine nachwachsenden Rohstoffe einsetzen, mit einer Gesamtkapazität von mehr als 860.000 t in Betrieb [6, S. 112 ff.]. Im Jahr 2010 wurden gemäß Bilanzmeldungen im Elektronischen-Daten-Management (EDM) ca. 310.000 Tonnen an Bioabfällen in Biogasanlagen verwertet. [51, S. 138].

4.6.2.3 Aerobe biotechnische Behandlung

In Österreich sind im Jahr 2012 465 Kompostierungsanlagen mit einer Kapazität von mindestens 1,3 Millionen Tonnen vorhanden. Diese Anlagen verwerten getrennt gesammelte biogene Abfälle, Küchen- und Speiseabfälle, kommunale Abfälle aus dem Grünflächenbereich und Klärschlamm [51, S. 136].

5 Charakterisierung der Abfälle

Gegenstand der Untersuchungen im ausgewählten Gebiet lag in der Ermittlung der stofflichen und chemisch-physikalischen Zusammensetzung des Rest- und Biomülls aus Handelsketten. Besonderes Augenmerk galt dem in den Restmüll- und Biomülltonnen aus dem Handelskettenbereich enthaltenen biogenen Material.

5.1 Sortieranalyse

Im Nachfolgenden wird die Durchführung der Sortieranalysen zur stofflichen Charakterisierung des Rest- und Biomülls aus Handelsketten beschrieben.

5.1.1 Versuchsablauf

Die Sortieranalysen wurde an Restmüll- und Biomülltonnen aus dem Lebensmitteleinzelhandel in Wien und im Einzugsgebiet von Wien (Vösendorf) durchgeführt. Um saisonale Effekte zu minimieren wurden zwei Untersuchungskampagnen zeitversetzt durchgeführt. Die Stichproben für die Sortierung umfassten jeweils getrennt die Restmülltonnen und die Biomülltonnen aus den Handelskettenbetrieben. Der Stichprobenumfang wurde insbesondere auf Basis der Repräsentativität in Bezug auf das Warenangebot, die Größe des Marktes und deren Entleerungszyklus gewählt. Die Sortierung erfolgte einstufig an zwei Terminen.

Die Grundgesamtheit stellt einerseits der Restmüll, andererseits der Biomüll aus den Supermärkten dar. Zugriffsebene ist der Biomüll- bzw. Restmüll-Behälter eines Standortes. Das heißt, eine Sortierprobe umfasst jeweils den Inhalt eines oder mehrerer Biomüll- oder Restmüll-Sammelbehälter eines Standortes.

Die zu beprobenden Behälter wurden in Abstimmung mit dem Entsorgungsunternehmen ausgewählt. Kriterien hierfür waren die Verkaufsgröße und die Betriebscharakteristik. Es wurde darauf geachtet, dass die ausgewählten Lebensmittelmärkte einen repräsentativen Querschnitt der jeweiligen Handelsketten im Untersuchungsgebiet Wien und Vösendorf abbilden. Einschränkungen in Bezug auf die Repräsentativität der Stichproben waren jedoch aufgrund der logistischen Erfordernisse gegeben, insbesondere in Anbetracht der regulären Abfuhrtermine sowie des Einverständnisses der jeweiligen Märkte zur Teilnahme am Versuch. Zehn Lebensmittelmärkte mit ihren Restmüll- und Biomülltonnen wurden in die Untersuchung einbezogen.

Zur Probenahme wurden bei den ausgewählten Märkten die laut Entleerungsplan zu entleerenden Restmüllbehälter (i.d.R. 1.100 l-Behälter) und die Biomülltonnen (240 l- und 770 l-Behälter) gegen leere Behälter getauscht. Die gesammelten Behälter wurden mittels eines Aufklebers, auf dem ein Kürzel für den entsprechenden Supermarkt vermerkt wurde, markiert und zum Sortierort gebracht.

Pro Filiale wurden alle vorhandenen Restmüll- und Biomülltonnen getauscht, sowohl die vollen als auch die leeren Behälter. Hierdurch konnte auch die Auslastung des zur Verfügung gestellten Behältervolumens überprüft werden und Anhaltspunkte für etwaige

Volumenänderungen aufgezeigt werden. Der gemeinsame Tausch von Rest- und Biomüllbehältnissen war insofern von Bedeutung um die Trennschärfe zwischen Biomüll und Restmüll zu ermitteln.

Die erste Sortieranalyse erfolgte im Zeitraum 28. bis 29. September 2009, die zweite vom 25. bis 26. Jänner 2010. Die Sortierung wurde durch ein Team von zwei Mitarbeitern des Entsorgungsunternehmens unterstützt.

Die bereitgestellten Proben wurden jeweils einzeln bearbeitet und protokolliert. Vor der Sortierung erfolgte zunächst eine optische Überprüfung auf mögliche Besonderheiten und die Verwiegung. Herkunftsort, Auffälligkeiten und Masse fanden Eingang ins Untersuchungsprotokoll für spätere Auswertungen. Im Anschluss wurden die Proben der Restmülltonnen in die in Tabelle 10 angeführten 18 Fraktionen händisch aufgetrennt. Die Sortierung der Proben der Biomülltonne erfolgte in die Fraktionen der Restmülltonne, ausgenommen der beiden Fraktionen Problemstoffe und Inertabfall.

Diese Stoffgruppeneinteilung wurde so gewählt um einen Vergleich zwischen den Mülltonnen aus Haushalten und denen aus Supermärkten durchführen zu können und um aus den Sortierfraktionen rechnerisch durch zu Hilfenahme von Literaturwerten den Heizwert zu ermitteln. Des Weiteren sollten anhand dieser Sortierfraktionen die anschließenden Verwertungsmöglichkeiten eingestuft werden können.

Eine Entleerung der Verpackungen mit Restinhalten an Lebensmitteln fand im Rahmen der Sortierung nicht statt, sondern eine Zuordnung zu den jeweiligen Fraktionen mit dem Vermerk „mit Inhalt“. Weiters erfolgte keine Auftrennung von leeren Verpackungen, die aus mehreren Materialien bestanden, sondern eine Zuordnung zu den Fraktionen „Materialverbunde mit oder ohne Inhalt“. Die gewonnenen Fraktionen wurden in separate Behälter sortiert, verwogen und protokolliert.

Die Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung erfolgte für die Restmülltonnen und die Biomülltonnen getrennt. Für jeden Untersuchungstermin wurden die relativen Masseanteile der Einzelfraktionen gemittelt.

Tabelle 10: Stoffgruppeneinteilung für die Sortierung der Restmülltonnen

Fraktion	Beschreibung	Beispiele
1. rein Biogenes	Organische Abfälle ohne jegliche Verpackung	ganze Äpfel, ganze Bananen, Brotwaren
2. Biogenes verpackt	Original verpackte Lebensmittel; Verpackungen aus Kunststoff, Papier	Semmel in Kunststoff verpackt, Bananen in Kunststoff verpackt
3. Holz	Holzreste und Verpackungen aus Holz	Holzreste, Holzsteigen
4. Papier/Karton	Verpackungen und Nichtverpackungen aus Papier und Karton	Zeitungen, Schachteln, Papiersäcke, Prospekte, Kassabelege
5. Kunststoffe (2-D)	Kunststofffolien	Verpackungsfolien
6. Kunststoffe (3-D)	Verpackungen aus Kunststoff (dreidimensional) ohne Inhalt	leere Getränkeflaschen aus Kunststoff
7. Kunststoffbehältnisse mit Inhalt	Verpackungen aus Kunststoff mit Inhalt	Getränkeflasche aus Kunststoff mit Inhalt
8. Glas ohne Inhalt	Verpackungen aus Glas ohne Inhalt, entleert	Marmeladegläser, Flaschen jeweils ohne Inhalt
9. Glas mit Inhalt	Verpackungen aus Glas mit Inhalt	volle Marmeladegläser, volle Getränkeflaschen
10. Textilien	Textilien	Wolle
11. Metall ohne Inhalt	Verpackungen ohne Inhalt und Nichtverpackungen aus Metall	Alufolie, Bierkapseln, leere Getränkedosen
12. Metall mit Inhalt	Verpackungen aus Metall mit Inhalt	volle Thunfischdosen, volle Getränkedosen
13. Problemstoffe	Problemstoffe	Batterien, Lackdosen, Medikamente, Spraydosen
14. Materialverbunde ohne Inhalt	Verpackungen aus Materialverbunden ohne Inhalt	leere Getränkeverbundkartons, leere Zigarettschachteln
15. Materialverbunde mit Inhalt	Verpackungen aus Materialverbunden mit Inhalt	volle Getränkeverbundkartons
16. Inertstoffe	Keramik	Fliesenteile
17. Feinanteil	Feinfraktion Organik	Schalenstück von Obst und Gemüse, Laub, Brotbrösel, Kaffeesatz
18. Sortierrest	alle verbleibenden Fraktionen, die nicht einer der oben genannten Gruppen zugeordnet werden konnten	Zigarettenstummel, Kehricht

5.1.2 Probenahme

Das Probenahmekonzept zur Untersuchung der Restmülltonnen ist der nachfolgenden Abbildung 9 zu entnehmen. Die Probenahme aus den Biomülltonnen unterscheidet sich insofern von der dargestellten Restmüllbeprobung, dass eine Sammelprobe aus sechs Biomülltonnen hergestellt wurde. Die qualifizierten Stichproben „rein Biogenes“ und „Biogenes verpackt“ aus den Biomülltonnen und den Restmülltonnen wurden anschließend jeweils zu der Laborprobe „rein Biogenes“ und „Biogenes verpackt“ vereinigt.

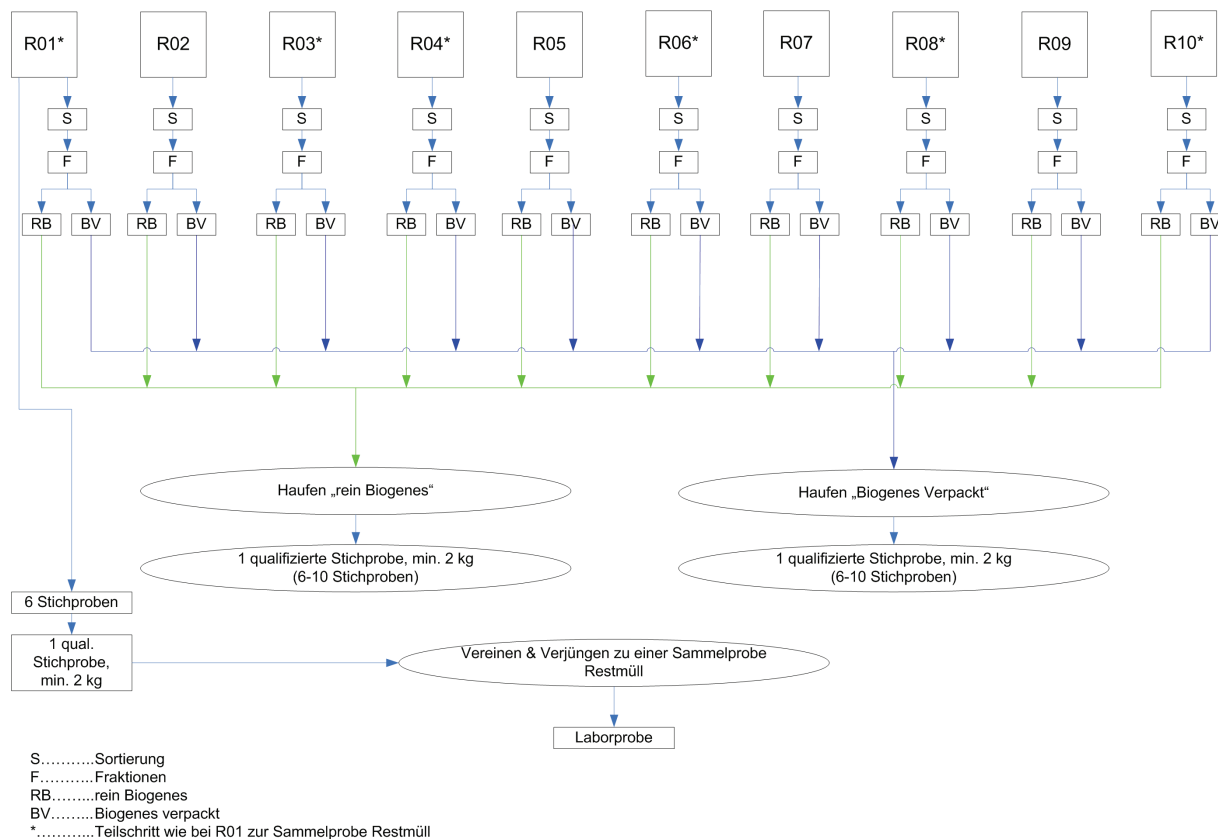


Abbildung 9: Beprobungsschema der Restmülluntersuchung

Es wurde jeweils eine Feldprobe hergestellt um die Gesamtheit der Restmülltonnen bzw. der Biomülltonnen zu charakterisieren. Die Proben aus den Fraktionen „rein Biogenes“ und „Biogenes verpackt“ der Restmülltonnen sollen vor allem Anhaltspunkte für eine Behandlung der Restmüll- bzw. Biomülltonnen in einer Biogasanlage geben. Die weiteren nicht extra beprobten Fraktionen sind für die Biogasproduktion nicht weiter relevant.

Für die jeweiligen Laborproben wurden bei jedem Versuch die entsprechenden Feldproben durch die Viertelungsmethode im Zuge einer Haufwerksbeprobung hergestellt. Die Menge der zu entnehmenden Proben orientierte sich sowohl an der Korngröße des Materials sowie an den Erfordernissen des Untersuchungsverfahrens. Die Proben wurden dann in Behältern mit entsprechender Beschriftung luftdicht verschlossen und ins institutseigene Labor zur analytischen Untersuchung transportiert.

5.1.3 Dokumentation des Sortierversuches

Im Anhang befinden sich einige Beispielfotos des Ausgangsmaterials der Sortierung der Rest- und Biomülltonnen aus dem Lebensmitteleinzelhandel. Abbildung I bis Abbildung XVIII zeigen anhand von 18 Beispielen alle Fraktionen, die aus der Restmüll- bzw. der Biomülltonnenbeprobung aussortiert wurden.

Anzumerken sei, dass vor allem die Abfälle in den Restmülltonnen häufig in Müllsäcken nochmals verpackt waren (siehe Abbildung XIX und XX im Anhang), während in den Biomülltonnen keine zusätzliche Verpackung verwendet wurde (siehe Abbildungen XXI und XXII der Biomülltonnen im Anhang). Beispiele vollständiger 240-l-Biomülltonneninhalte sind in den Abbildungen XXIII und XXIV ersichtlich.

5.2 Laboranalytik

Die im Rahmen des Sortierversuches entnommenen Proben wurden dem akkreditierten Labor für Umwelt- und Prozessanalytik des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (Anmerkung: Zum Zeitpunkt der Analysen war es das akkreditierte Labor des Institutes für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik) zur Analytik übergeben. Folgende Parameter wurden in Hinblick auf eine etwaige nachfolgende Vergärung, Verbrennung, Kompostierung, mechanisch-biologische Behandlung oder Deponierung für die chemisch-physikalische Charakterisierung gewählt:

- pH-Wert (pH),
- Trockenrückstand, Trockensubstanz (TS),
- Glühverlust (GV),
- Brennwert, oberer Heizwert (H_o),
- Heizwert, unterer Heizwert (H_u),
- Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff im Feststoff (TOC_{fest}),
- Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff im Eluat (TOC_{Eluat}),
- Biogener Kohlenstoffanteil, nach ^{14}C (Radiokarbonmethode),
- Kohlenwasserstoff-Index im Feststoff (KW-Index),
- Summe Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole im Feststoff (BTEX) und
- Summe der 16 PAKs nach EPA im Feststoff (PAK16).

Anzumerken sei, dass die Parameter BTEX und PAK16 bei der zweiten Versuchsreihe nicht mehr analysiert wurden, da die jeweiligen Messwerte beim ersten Versuch unterhalb der Bestimmungsgrenze waren und daher ein Kontaminationsverdacht mit größter Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann. Für die Auswahl einer entsprechenden Behandlung bzw. Verwertung des gegenständlichen Abfalls sind diese beiden Parameter nicht relevant.

Im Unterkapitel „Analysemethoden“ wird auf die oben genannten Parameter und deren angewandte Analysennormen eingegangen.

5.2.1 Analysemethoden

Die übergebenen Proben wurden vorbereitet (auf 0,5 mm gemahlen) und analysiert. Ein Messergebnis entspricht dem arithmetischen Mittelwert von drei Einzelmessungen derselben Analysenprobe. Die Elution erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM S 2113, ÖNORM S 2115 und DIN 38414-4. Die Analysemethoden der Untersuchungsparameter sind in Arbeitsanweisungen (AA) und den zugrunde liegenden Normen dargelegt. In der nachfolgenden Tabelle 11 sind die Normen, Arbeitsanweisungen und die Bestimmungsgrenze für die einzelnen Parameter aufgelistet. Anschließend werden die Parameter und die angewandten Untersuchungsvorschriften kurz dargelegt.

Tabelle 11: Analysemethoden

Parameter	Bestimmungsgrenze	Norm	SOP (Standard Operating Procedure)
pH-Wert (pH)	1-14	DIN 38404-5:1984 DIN 38404-5:2009	AA pH-Wert
Trockenrückstand, Trockensubstanz (TS)	0,001 %	DIN EN 12880:2000	AA Trockenrückstand
Glühverlust (GV)	0,02 %	DIN EN 12879:2001, ÖNORM M 6295:1993	AA Glühverlust
Brennwert, oberer Heizwert (H_o)	–	analog AQS-Richtlinie 2001	AA Heizwert AQS IKA
Heizwert, unterer Heizwert (H_u)	–	analog AQS-Richtlinie 2001	AA Heizwert AQS IKA
Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff im Feststoff (TOC_{fest})	0,5 %	ÖNORM EN 13137:2001	AA TOC fest
Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff im Eluat (TOC_{Eluat})	0,5 mg/l	EN 1484 (nicht akkreditiert)	–
Biogener Kohlenstoffanteil	–	ASTM D6866 (nicht akkreditiert)	–
Kohlenwasserstoff-Index im Feststoff (KW-Index)	100 mg/kg	ÖNORM EN 14039 (nicht akkreditiert)	–
Summe Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol im Feststoff (BTEX)	2,5 mg/kg	ÖNORM S 2124 (nicht akkreditiert)	–
Summe der 16 PAKs nach EPA im Feststoff (PAK16)	0,4 mg/kg	DIN 38414-S23 (nicht akkreditiert)	–

Der **pH-Wert** ist der negative dekadische Logarithmus der H_3O^+ -Ionen-Konzentration ($pH = -\log c_{H_3O^+}$). Er gibt an, wie sauer ($pH < 7$), basisch ($pH > 7$) oder neutral ($pH = 7$) eine Lösung ist. Die Analysennorm DIN 38404-5 beinhaltet die elektrometrischen Verfahren. Diese Verfahren beruhen auf der Messung der Kettenspannung einer elektrochemischen Zelle, bei der eine der beiden Halbzellen eine Messelektrode, die zweite eine

Bezugselektrode ist. Das Potential der Messelektrode ist eine Funktion des pH-Werts der Messlösung [53, S. 4 f.].

Abfall als Feststoff enthält unterschiedliche Wasseranteile. Der Massenanteil des partikulären Materials an einer Probe wird als **Trockenrückstand** nach DIN EN 12880 bestimmt. Ein aliquoter Teil der Probe wird im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet. Die zurückgebliebene Masse wird ausgewogen und ergibt, bezogen auf die Masse der eingewogenen Probe, den Trockenrückstand in Masse-% [54, S. 4].

Der **Glühverlust**, der auch als organischer Trockenrückstand bezeichnet wird, wird nach DIN EN 12879:2001 und ÖNORM M 6295:1993 bestimmt. Der Glühverlust ist der verglühbare Anteil an einer getrockneten Probe. Die nach vollständigem Ausglühen der Probe zurückbleibende Masse, der Glührückstand, wird vom Trockenrückstand abgezogen und ergibt den Glühverlust bezogen auf den Trockenrückstand der Probe in Masse-% [55, S. 5], [56, S. 1].

Der **Brennwert** und der **Heizwert** fester und flüssiger Brennstoffe sind Maße für die bei vollständiger Verbrennung frei werdenden Wärmemengen. Aus diesem Grund sind sie auch wichtige Kenngrößen bei der Müllverbrennung.

Der Brennwert H_0 ist definiert als Quotient aus der bei vollständiger Verbrennung frei werdenden Wärmemenge und der Masse des Brennstoffs, wenn die Temperatur des Brennstoffs vor dem Verbrennen und die seiner Verbrennungserzeugnisse 25 °C beträgt, und wenn das vor dem Verbrennen im Brennstoff vorhandene Wasser und das beim Verbrennen des Wasserstoffs gebildete Wasser in flüssigem Zustand vorliegen. Außerdem müssen die Verbrennungserzeugnisse des Kohlenstoffs und des Schwefels als Kohlendioxid und Schwefeldioxid in gasförmigem Zustand vorliegen. Eine Oxidation des Stickstoffs darf nicht stattgefunden haben. Der Brennwert wird mit einem Bombenkalorimeter gemessen [57, S. 3 ff.].

Der Heizwert H_u unterscheidet sich vom Brennwert H_0 nur dadurch, dass das Wasser nach der Verbrennung in dampfförmigem Zustand vorliegt, d.h. Brennwert und Heizwert unterscheiden sich durch die Verdampfungswärme des Wassers. Für die Auslegung industrieller Feuerungsanlagen ist der Heizwert maßgeblich, da die Kondensationswärme des Wassers nicht genutzt wird und folglich das Wasser dampfförmig über den Schornstein abgegeben wird. Der Heizwert wird rechnerisch aus dem Brennwert bestimmt [57, S. 3 ff.].

Die Ermittlung des **gesamten Gehaltes organisch gebundenen Kohlenstoffes in einer Feststoffprobe** (TOC_{fest}) erfolgte nach ÖNORM EN 13137. Der TOC bildet u.a. die Entscheidungsgrundlage für die weitere Verwertung/Behandlung des Abfalls wie z.B. Deponierung, Kompostierung oder Verwertung. Hauptsächlich zur Beurteilung der Deponiefähigkeit von Abfällen wird der TOC neben dem Glühverlust immer häufiger als Leitparameter herangezogen. Er gibt Auskunft darüber, inwieweit der Feststoff mit organischen Schadstoffen kontaminiert ist und in Folge dessen durch mikrobiellen Abbau der organischen Inhaltsstoffe zu einer Veränderung des Deponiekörpers bzw. zur Mobilisierung von Schwermetallen beitragen kann. Er wird entweder direkt durch trockene Verbrennung der zuvor mit einer nichtoxidierenden Säure vorbehandelten Probe gemessen oder indirekt

aus den Parametern Total Carbon (TC) und Total Inorganic Carbon (TIC) errechnet [58, S. 2 f.]. Bei der gegenständlichen Analytik wurde der organische Kohlenstoffgehalt der Feststoffe (TOC) durch die Differenzbildung von Gesamtkohlenstoffgehalt (TC) und anorganischem Kohlenstoff (TIC), d.h. mittels indirekten Verfahren, ermittelt.

Die Bestimmung des **gesamten organisch gebundenen Kohlenstoffes** (Total Organic Carbon, $\text{TOC}_{\text{Eiuat}}$) **in einer flüssigen Probe** erfolgte nach EN 1484. Der gesamte organische Kohlenstoff ist ein Maß für den Kohlenstoffgehalt gelöster und ungelöster organischer Stoffe im flüssigen Medium. Er liefert keinen Hinweis auf die Art der organischen Substanz. Bei der TOC-Analyse wird zuerst die Probe auf pH 2 angesäuert, danach der anorganische Kohlenstoff durch Sauerstoffbegasung als Kohlendioxid ausgetrieben und anschließend der verbliebene organische Kohlenstoff mittels thermischer Oxidation zu Kohlendioxid oxidiert. Das Kohlendioxid wird nach verschiedenen Verfahren (z.B.: Infrarot-Spektrometrie, Titration, Wärmeleitfähigkeitsdetektion, Leitfähigkeitsmessung, Coulometrie, CO_2 -empfindliche Sensoren und – nach Reduktion des CO_2 unter anderem zu Methan – mittels Flammenionisationsdetektor) quantifiziert [59, S. 4 ff.].

ASTM D6866 wurde in den Vereinigten Staaten als eine standardisierte analytische Methode entwickelt, die den **biogenen Kohlenstoffanteil** von festen, flüssigen und gasförmigen Proben mit Hilfe der Radiocarbon-Datierung bestimmt. Die Radiocarbonmethode beruht auf der Grundlage, dass Organismen – aufgrund der kosmischen Strahlung gebildeten – radioaktiven Kohlenstoff (^{14}C) aufnehmen. Sobald der Organismus abstirbt, verringert sich die Konzentration des Isotops entsprechend der radioaktiven Zerfallsrate kontinuierlich, da keine Aufnahme mehr erfolgen kann. Über die Bestimmung des Isotopenanteils ^{14}C wird auf den biogenen Anteil rückgerechnet [60].

Die Bestimmung des **Kohlenwasserstoff-Index** erfolgt durch gaschromatographische Untersuchungsverfahren entsprechend ÖNORM EN 14039. Das Verfahren erfasst Mineralölkohlenwasserstoffe bzw. Mineralölprodukte mit Siedepunkten bzw. -bereichen oberhalb von n-Dekan (C_{10} , 175 °C) und unterhalb von n-Tetrakontan (C_{40} , 525 °C). Dabei können auch die „mobileren“ Kohlenwasserstoffe C_{10} bis C_{22} quantifiziert werden. Diese Fraktion zeichnet sich durch eine erhöhte Verfügbarkeit aus und ist daher umweltrelevanter [61, S. 5].

Die leichtflüchtigen aromatischen Kohlenwasserstoffe (**BTEX**) Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol (o-, m-, p-Xylol) werden mittels Gaschromatographie massenspektrometrisch nach Extraktion mit Methanol gemäß ÖNORM S 2124 bestimmt [62, S. 4].

Zu den polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) zählen einige hundert Verbindungen mit zwei oder mehr miteinander verbundenen aromatischen Ringstrukturen. Häufig werden in Umweltproben die 16 PAK analysiert, die von der amerikanischen Environmental Protection Agency (EPA) definiert wurden. Die Bestimmung der **Summe von 16 polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe nach US-EPA** erfolgt mittels Hochleistungsflüssigkeitschromatographie-Verfahren (HPLC) gemäß DIN 38414-S23 [63, S. 2 ff.].

5.3 Darstellung der Ergebnisse

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Sortieranalysen sowohl tabellarisch als auch grafisch und die Ergebnisse der Laboranalysen grafisch dargestellt. Anschließend werden die Ergebnisse diskutiert.

5.3.1 Sortieranalyse

Die Anzahl der sortierten Proben (im konkreten Fall die Abfallbehälter) sowie die Gesamtmasse der Proben beider Untersuchungsturnusse sind in der nachfolgenden Tabelle 12 aufgezeigt.

Tabelle 12: Stichprobenumfang der Sortierung

	Restmüll		Biomüll	
	Anzahl Proben	Masse [kg]	Anzahl Proben	Masse [kg]
1. Sortierung (September 2009)	9	621,0	3	339,0
2. Sortierung (Jänner 2010)	7	641,5	3	324,5
Gesamt	16	1.262,5	6	663,5

Im Rahmen des ersten Sortierversuches wurden neun Restmüllproben und drei Biomüllproben sortiert. Beim zweiten Termin waren sieben Restmüllproben und drei Biomüllproben zur Sortierung vorhanden. Insgesamt wurden an beiden Terminen 1.262,5 kg Restmüll und 663,5 kg Biomüll der Sortierung unterzogen und in die Auswertung einbezogen.

Die Diskrepanz zwischen zehn geplanten Filialen und neun bzw. sieben sortierten Restmüllproben resultierte daraus, dass die Restmüllbehälter im Rahmen der routinemäßigen Abholung bei den zuvor ausgewählten Filialen mitgenommen wurden. Jene Behälter, die ohne Inhalt bei den Filialen angetroffen wurden, sind nicht in der Tabelle 12 aufgenommen. Beispielsweise konnte bei einer Filiale im Rahmen des ersten Versuches beobachtet werden, dass die Restmülltonnen leer waren. Offensichtlich wurden stattdessen die beiden Biomülltonnen (je 240 l) zur Entsorgung des anfallenden Mülls verwendet.

Der Stichprobenumfang bei den Biomülltonnen betrug je Versuch nur drei Proben, da zum einen manche Filialen keine Biomülltonnen hatten, zum anderen eine Trennung von Biomüll und Restmüll nicht überall erfolgte und somit die Biomülltonnen teilweise leer blieben.

5.3.1.1 Restmüllzusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der Restmülltonnen beider Sortierversuche ist in Abbildung 10 dargestellt. Für jeden Untersuchungstermin wurden die Masseanteile der Einzelfraktionen gemittelt.

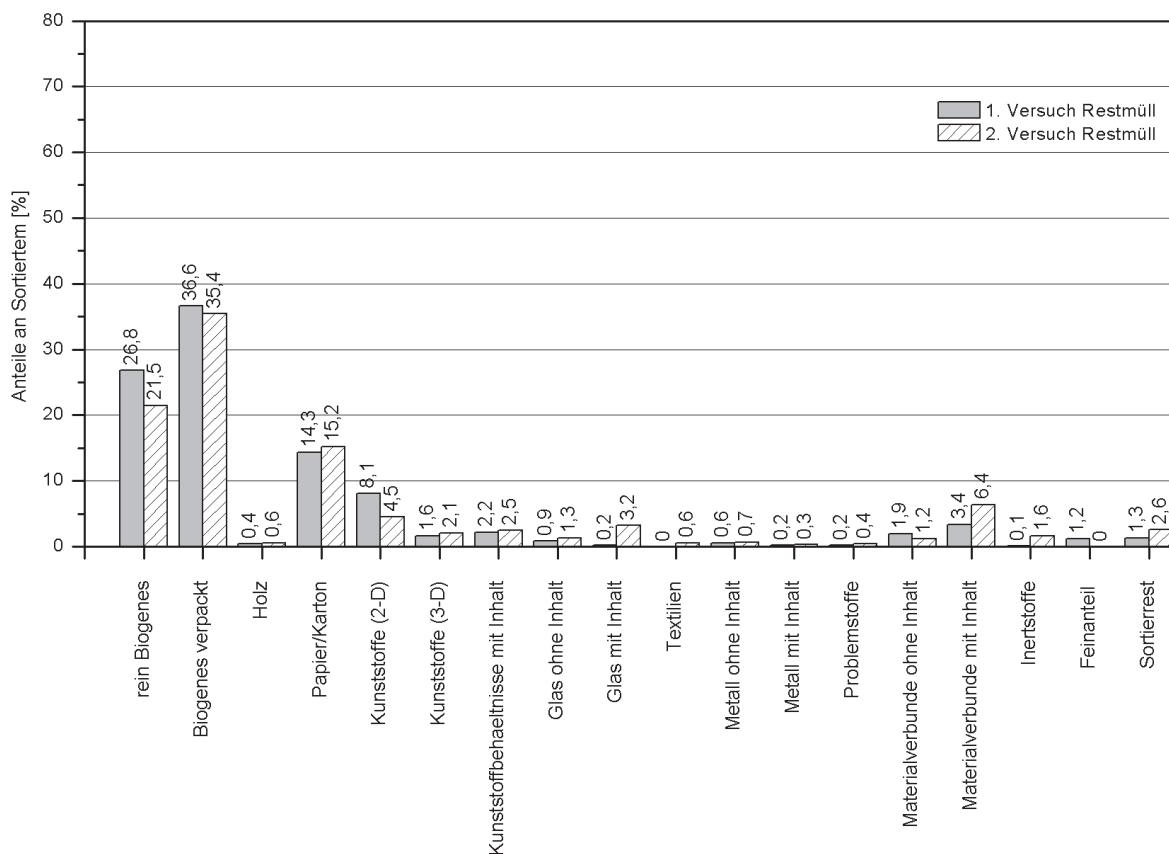


Abbildung 10: Vergleich der Restmüllzusammensetzung vom September 2009 (1. Versuch) und Jänner 2010 (2. Versuch) in Masseanteilen (Differenz zu 100 % aufgrund von Rundungsfehlern)

Den größten Anteil am Restmüll hatten bei beiden Untersuchungsterminen die Fraktionen „rein Biogenes“ mit 26,8 bzw. 21,5 Masse-%, „Biogenes verpackt“ mit 36,6 bzw. 35,4 Masse-% und „Papier/Karton“ mit 14,3 bzw. 15,2 Masse-%. Die beiden Fraktionen „rein Biogenes“ und „Biogenes verpackt“ je Untersuchungstermin zusammengefasst tragen zu mehr als der Hälfte der Masse des untersuchten Restmülls bei. Die Stoffgruppen „Kunststoffe (2-D)“ und „Kunststoffe (3-D)“ aufsummiert ergeben beim ersten Versuch 9,7 Masse-% und beim zweiten Versuch 6,6 Masse-%. Mit 3,4 Masse-% und 6,4 Masse-% sind die Stoffgruppe „Materialverbunde mit Inhalt“ noch zu erwähnen.

Signifikante Unterschiede in der Zusammensetzung der Restmülltonnen sind beim Vergleich der beiden Untersuchungstermine nicht ersichtlich.

Eine Auflistung der Mittelwerte der Stoffgruppen in Masse-% sind getrennt für die beiden Untersuchungstermine in nachfolgender Tabelle 13 ausgewiesen. Die Differenz zu 100 Masse-% ist durch Rundungsfehler begründet.

Tabelle 13: Zusammensetzung des Restmülls in Masseanteilen der beiden Sortierungen

Fraktionen	Mittelwerte [Masse-%]	
	1. Sortierung September 2009	2. Sortierung Jänner 2010
1. rein Biogenes	26,8	21,5
2. Biogenes verpackt	36,6	35,4
3. Holz	0,4	0,6
4. Papier/Karton	14,3	15,2
5. Kunststoffe (2-D)	8,1	4,5
6. Kunststoffe (3-D)	1,6	2,1
7. Kunststoffbehältnisse mit Inhalt	2,2	2,5
8. Glas ohne Inhalt	0,9	1,3
9. Glas mit Inhalt	0,2	3,2
10. Textilien	0,0	0,6
11. Metall ohne Inhalt	0,6	0,7
12. Metall mit Inhalt	0,2	0,3
13. Problemstoffe	0,2	0,4
14. Materialverbunde ohne Inhalt	1,9	1,2
15. Materialverbunde mit Inhalt	3,4	6,4
16. Inertstoffe	0,1	1,6
17. Feinanteil	1,2	0,0
18. Sortierrest	1,3	2,6

Weitere Daten zu den sortierten Restmüllproben sind im Anhang in Tabelle III, IV und V ersichtlich.

5.3.1.2 Biomüllzusammensetzung

Die Biomüllzusammensetzung der Versuche im September 2009 und Jänner 2010 sind in der nachfolgenden Abbildung 11 grafisch dargestellt.

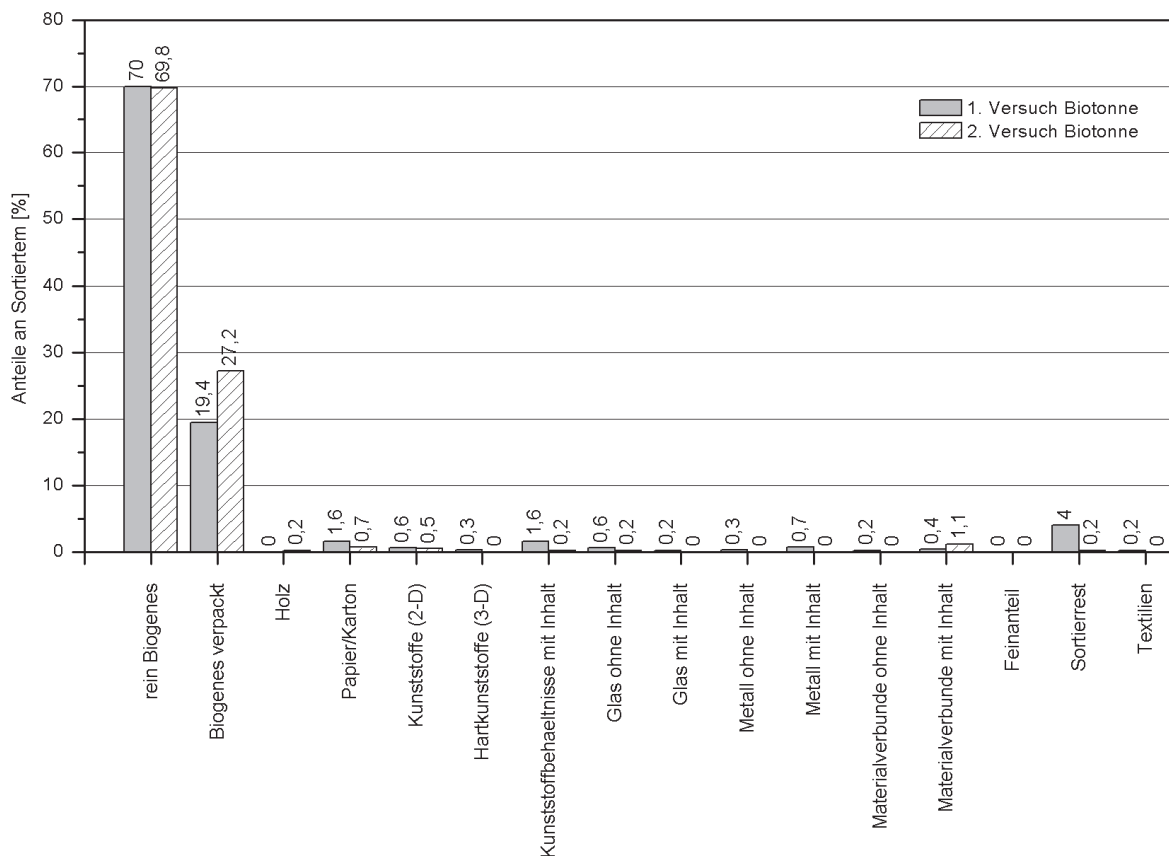


Abbildung 11: Vergleich der Biomüllzusammensetzung vom September 2009 (1. Versuch) und Jänner 2010 (2. Versuch) in Masseanteilen (Differenz zu 100 % aufgrund von Rundungsfehlern)

Den größten Anteil an den Biomüllproben hatte jeweils bei den zwei Untersuchungskampagnen die Fraktion „rein Biogenes“ mit jeweils ca. 70 Masse-% gefolgt von der Fraktion „Biogenes verpackt“ mit 19,4 bzw. 27,2 Masse-%. Bei der ersten Sortierung fielen ca. 10 Masse-% auf Altstoffe und den Sortierrest. Hingegen bei der zweiten Sortierung war dieser Anteil nur noch 3 Masse-%. Saisonale Unterschiede sind nicht eindeutig erkennbar.

Eine Auflistung der Stoffgruppen mit den jeweiligen Mittelwerten aus den beiden Untersuchungsterminen sind in der Tabelle 14 angeführt. Die Differenz zu 100 Masse-% ist durch Rundungsfehler begründet.

Tabelle 14: Zusammensetzung des Biomülls in Masseanteilen der beiden Sortierungen

Fraktionen	Mittelwerte [Masse-%]	
	1. Sortierung September 2009	2. Sortierung Jänner 2010
1. rein Biogenes	70,0	69,8
2. Biogenes verpackt	19,4	27,2
3. Holz	0,0	0,2
4. Papier/Karton	1,6	0,7
5. Kunststoffe (2-D)	0,6	0,5
6. Kunststoffe (3-D)	0,3	0,0
7. Kunststoffbehältnisse mit Inhalt	1,6	0,2
8. Glas ohne Inhalt	0,6	0,2
9. Glas mit Inhalt	0,2	0,0
10. Metall ohne Inhalt	0,3	0,0
11. Metall mit Inhalt	0,7	0,0
12. Materialverbunde ohne Inhalt	0,2	0,0
13. Materialverbunde mit Inhalt	0,4	1,1
14. Feinanteil	0,0	0,0
15. Sortierrest	4,0	0,2
16. Textilien	0,2	0,0

Weitere Daten zu den einzelnen sortierten Proben sind im Anhang in Tabelle VI ersichtlich.

5.3.1.3 Gegenüberstellung Biomüll- und Restmülltonne

Die Restmüllzusammensetzung wird in Abbildung 12 mit den Ergebnissen der Biomüllsortieranalyse verglichen. Der Vergleich erfolgt auf Basis von Mittelwerten der beiden Sortierkampagnen.

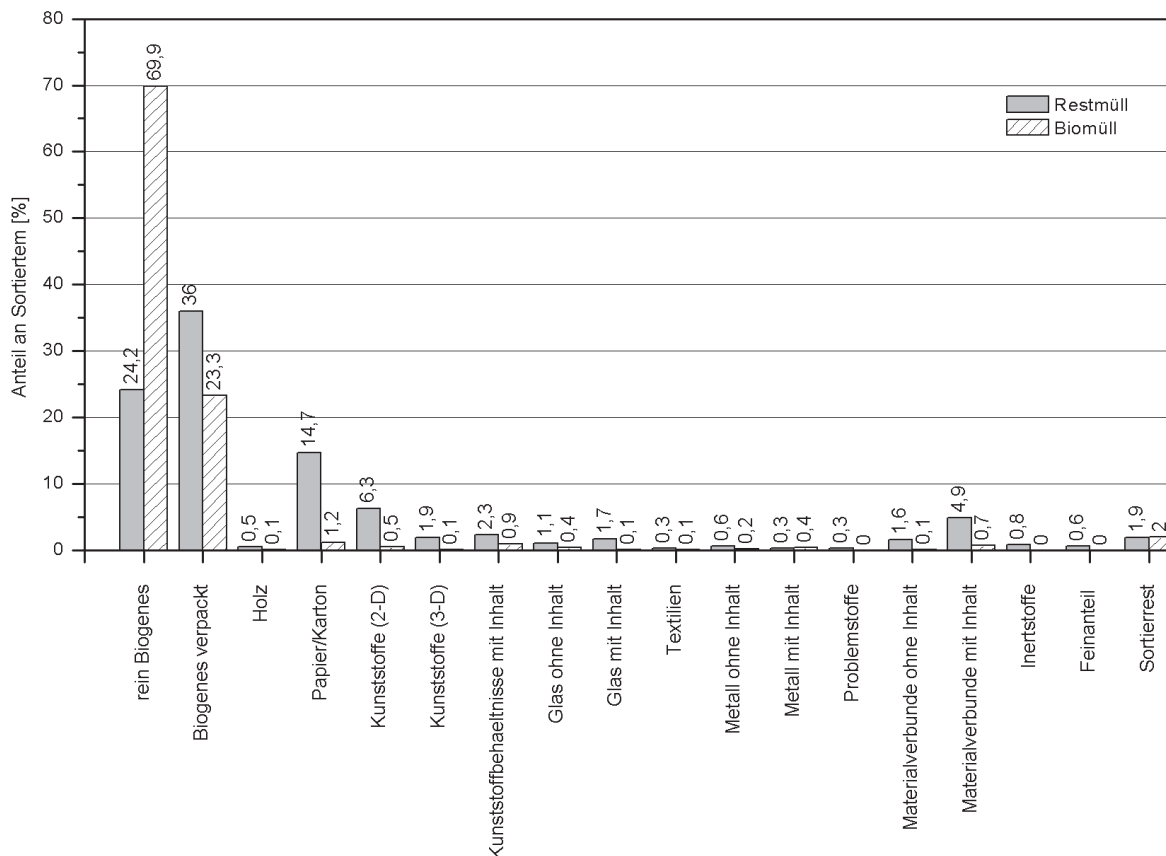


Abbildung 12: Vergleich der mittleren Zusammensetzung der Restmülltonnen und der Biomülltonnen in Masseanteilen

Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Zusammensetzung der Biomülltonnen den Restmülltonnen sehr ähnlich ist. Einzelne Biomülltonnen enthielten sehr viele Fremdteile und andererseits enthielten die Restmülltonnen einen großen Anteil an Biogenem. Dennoch ist die Tendenz dahingehend, dass der Anteil an Sortierfraktionen mit biogenem Anteil in der Biomülltonne deutlich größer ist als in der Restmülltonne. Im Detail enthält die Biomülltonne aufgrund der Sortierung im Mittel den dreifachen Anteil an „rein Biogenem“ mit 69,9 Masse-% im Vergleich zur Restmülltonne mit 24,2 Masse-% „rein Biogenem“. Die Fraktion „Biogenes verpackt“ hat mit einem durchschnittlichen Anteil von 36 Masse-% in der Restmülltonne den höheren Anteil als in der Biomülltonne mit 23,3 Masse-%. Die beiden Sortierfraktionen „rein Biogenes“ und „Biogenes verpackt“ zusammengefasst ergeben in der Biomülltonne rund 93,2 Masse-% und in der Restmülltonne rund 60,2 Masse-%. Somit entfallen für Altstoffe und den Sortierrest in der Biomülltonne weniger als 7 Masse-% und in der Restmülltonne weniger als 40 Masse-%.

5.3.2 Laboranalytik

Im Folgenden werden die Ergebnisse der untersuchten Parameter graphisch dargestellt und ausgewertet. Die Ergebnisse sind im Anhang in Tabelle VII aufgelistet.

5.3.2.1 pH-Wert

Die Ergebnisse der pH-Wert-Messungen der gegenständlichen Laborproben sind in der nachfolgenden Abbildung 13 ersichtlich.

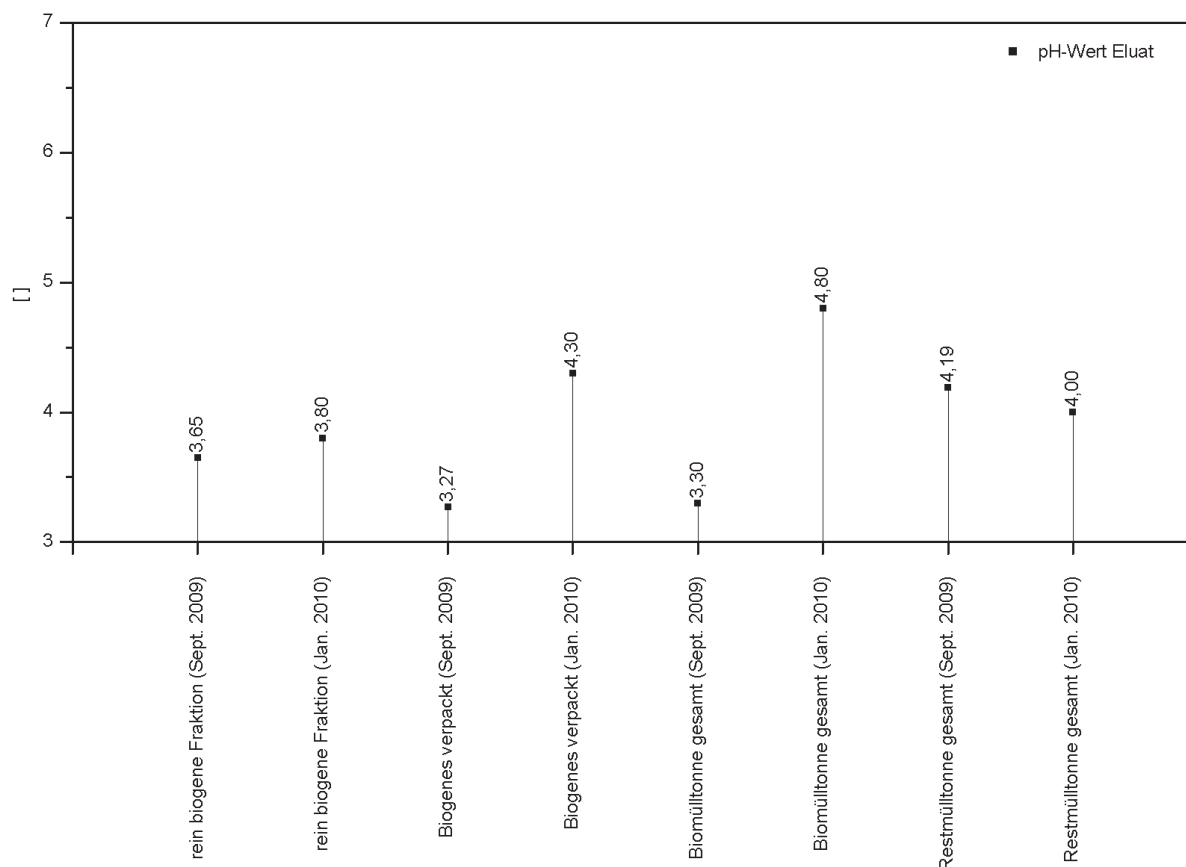


Abbildung 13: pH-Werte der Eluate

Die pH-Werte liegen bei den untersuchten Proben im Bereich von 3,3 bis 4,8. Der saure Bereich ($\text{pH} < 7$) lässt auf einen hohen biogenen Anteil in der jeweils untersuchten Probe schließen. Das saure Milieu ergibt sich aufgrund des biologischen Abbaus der Substanz.

5.3.2.2 Trockenrückstand

In der nachfolgenden Abbildung 14 werden der Trockenrückstand (Trockensubstanz (TS)) und der Wassergehalt von jeweils vier unterschiedlichen Laborproben der beiden Untersuchungstermine gegenübergestellt.

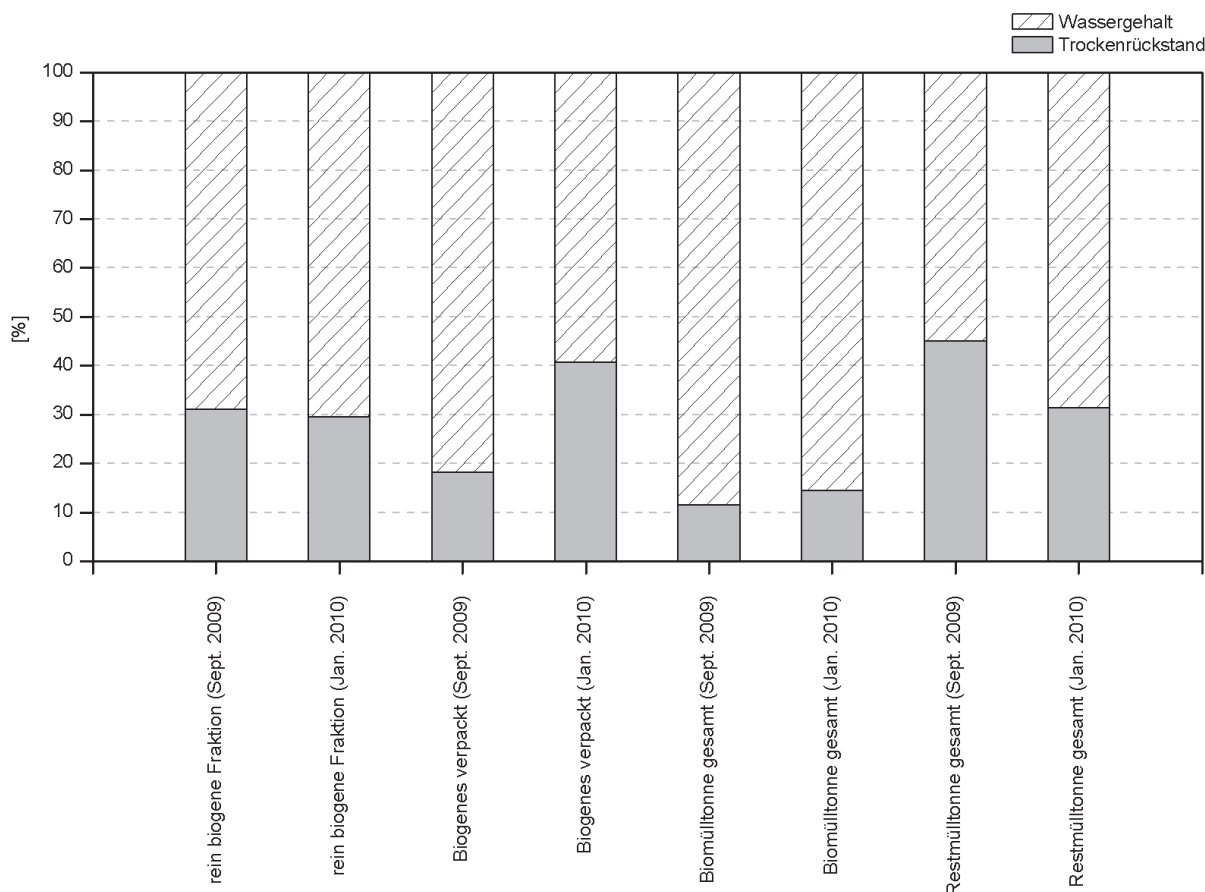


Abbildung 14: Trockenrückstand und Wassergehalt

Die Laborprobe „Biomülltonne gesamt“ vom September 2009 besitzt mit 88,5 % die größte Feuchte gefolgt von der Probe „Biomülltonne gesamt“ vom Jänner 2010 mit 85,6 % Wassergehalt. Die Proben der Fraktionen „rein Biogenes“ und „Biogenes verpackt“ haben jeweils im Mittel ca. 70 % Feuchte. Mit einem mittleren Wassergehalt von 61,8 % hat die Probe „Restmülltonne gesamt“ die geringste Feuchte.

Ein saisonaler Unterschied in Bezug auf die Feuchte konnte bei den Analysenproben „Biomülltonne gesamt“ und „Restmülltonne gesamt“ nicht erkannt werden. Bei den Sortierungen der Biomüll- und Restmülltonnen konnte ebenfalls kein eindeutiger saisonaler Unterschied identifiziert werden.

5.3.2.3 Brennwert und Heizwert

Der Brennwert und der Heizwert der Analysenproben sind in Abbildung 15 ersichtlich.

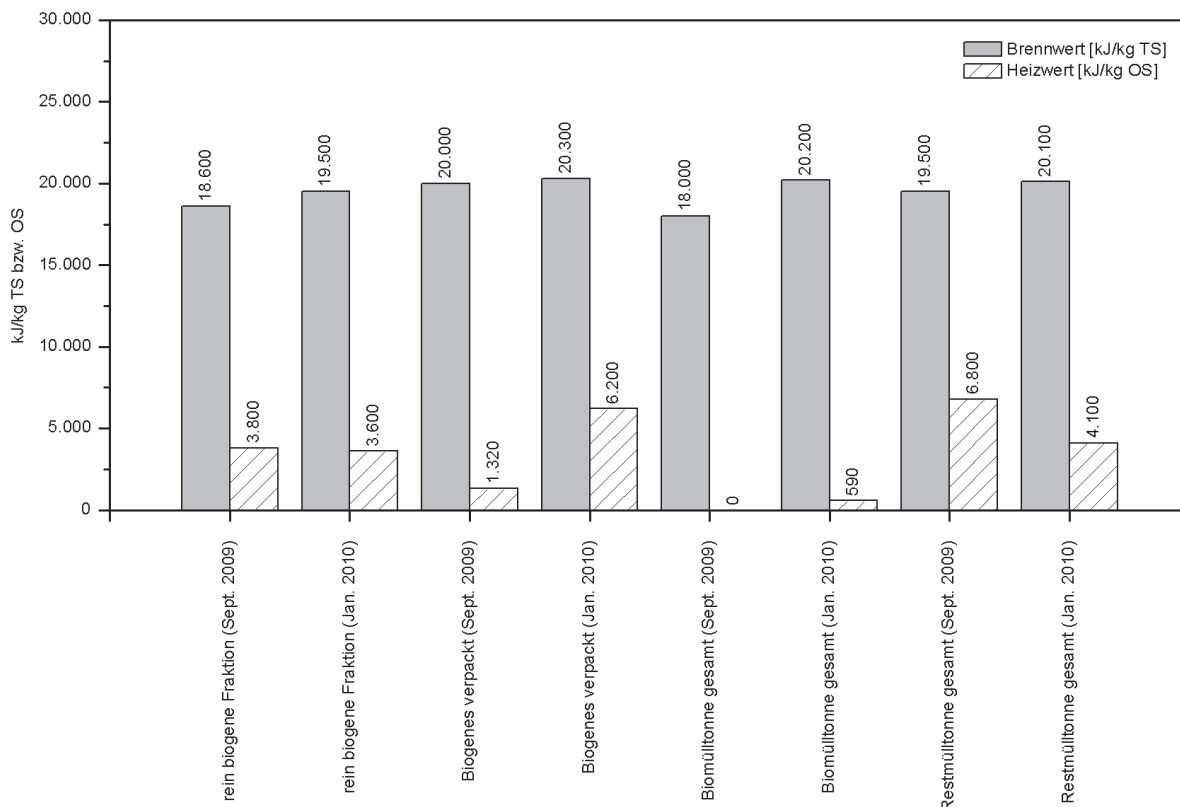


Abbildung 15: Brennwert und Heizwert

In der Probe „Biomülltonne gesamt“ vom September 2009 ist der Heizwert (H_u) nicht messbar (entspricht dem Wert Null). Bei der dazugehörigen Probe vom Jänner 2010 geht der Heizwert gegen Null (590 kJ/kg OS). Die entsprechenden Heizwerte liegen aufgrund der hohen Feuchte im Bereich der Biomüllproben außerhalb des messbaren und bei den Restmüllproben zwischen 4.100 und 6.800 kJ/kg OS. Die gegenständliche Probe „Restmülltonne gesamt“ mit einem Heizwert von 6.800 kJ/kg OS besitzt etwa die Hälfte des Heizwertes von Hausmüll der laut Literatur zwischen 9 und 11 MJ/kg OS liegt [64, S. 12] und in etwa ein Drittel des Heizwertes vom Gewerbemüll ausmacht. In den analysierten Proben ist nur ein verhältnismäßig geringer Anteil an Kunststoffen enthalten. Weiters ist bei einem geringen Heizwert von einem hohen biogenen Anteil auszugehen (siehe Analysenproben „Biomülltonne gesamt“ in Abbildung 18). Aufgrund des hohen Wassergehaltes sind dementsprechend geringe Heizwerte zu erwarten. Dies wurde beispielsweise anhand der Probe „Biomülltonne gesamt (Jän. 2010)“ ersichtlich, wo bei einem hohen Wassergehalt von 85,6 % der Heizwert mit 590 kJ/kg OS entsprechend gering ausfällt und an den Nachweisgrenzen liegt.

Die ermittelten Brennwerte liegen zwischen 18.000 kJ/kg TS bei der Probe „Biomülltonne gesamt (Sept. 2009)“ und 20.300 kJ/kg TS bei „Biogenes verpackt (Jän. 2010)“. Diese Ergebnisse sind auch für die übrigen analysierten Proben repräsentant.

5.3.2.4 Gesamt organisch gebundener Kohlenstoff im Feststoff und Eluat sowie Glühverlust

Die Messwerte des Glühverlusts (GV) sowie des gesamt organisch gebundenen Kohlenstoffs im Feststoff (TOC_{fest}) sind zu den jeweiligen Proben in der nachfolgenden Abbildung 16 dargestellt.

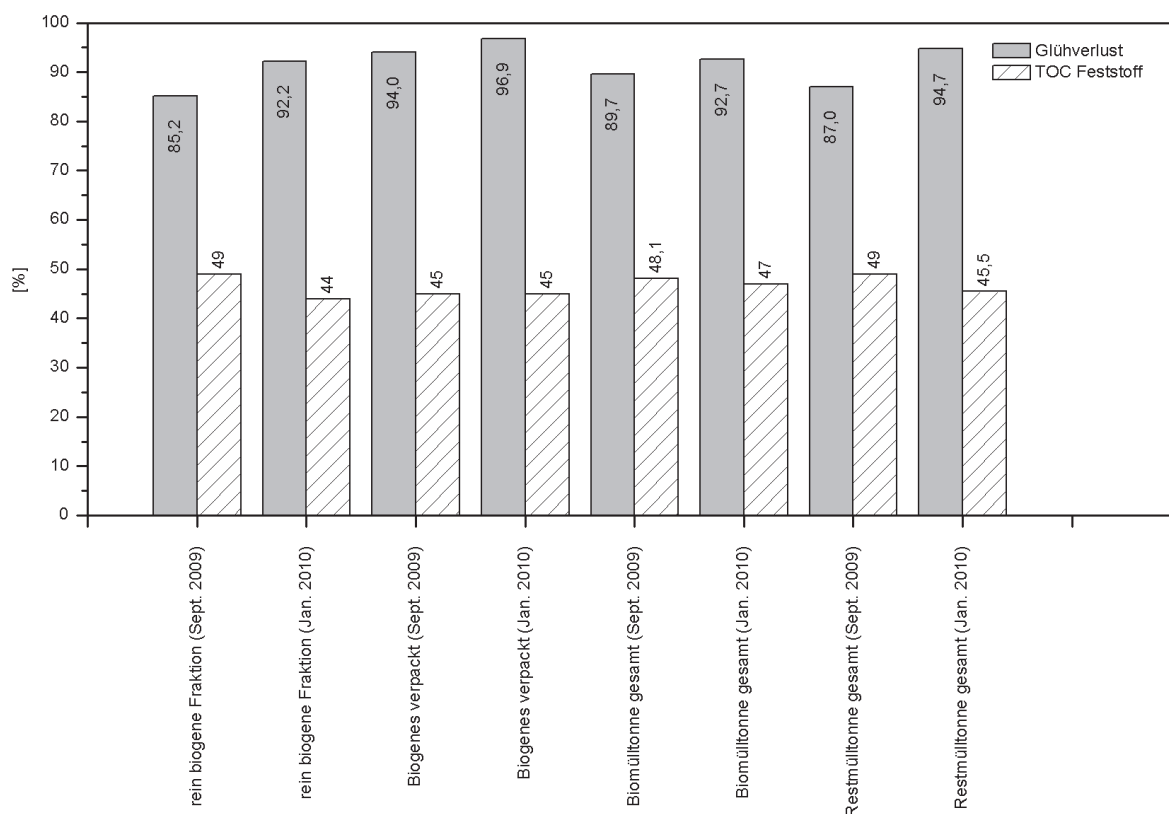


Abbildung 16: Glühverlust und TOC im Feststoff

Der analysierte Glühverlust der Proben schwankt zwischen 85,2 % und 96,9 %. Es ist erkennbar, dass der Glühverlust bei den Proben vom September 2009 jeweils geringfügig kleiner ist als der Glühverlust der jeweils gleichartigen Probe vom Jänner 2010. Über alle Proben ist der TOC konstant.

Beim TOC im Feststoff ergaben sich Werte zwischen 44 und 49 %. Somit verhält sich der TOC im Feststoff annähernd gleich über alle Proben.

Auf Basis von Glühverlust und TOC im Feststoff der gegenständlichen Proben kann festgehalten werden, dass im Wesentlichen kein Unterschied zwischen den Proben der Biomülltonnen und der Restmülltonnen aus den Supermärkten festgestellt werden kann. In der Literatur [65, S. 28] wird für „reine“ biogene Abfallstoffe eine organische Substanz (bestimmt als Glühverlust) mit etwa 80-95 % TS angegeben. Gegenständliche

Analysenproben weisen einen Glühverlust im Bereich von 87 und 95 % TS auf. Geringere Analysenwerte als die genannten, wären auf einen mehr oder weniger großen Inertstoffanteil zurückzuführen.

Der TOC ist als Maß für die Reaktivität des Abfalls insbesondere im Bereich der Deponierung relevant. Auf Basis der o.g. Messwerte sind keine saisonalen Schwankungen erkennbar.

Nachfolgend wird der TOC im Feststoff mit dem gesamt organisch gebundenen Kohlenstoff im Eluat (TOC_{Eluat}) anhand von Abbildung 17 dargestellt.

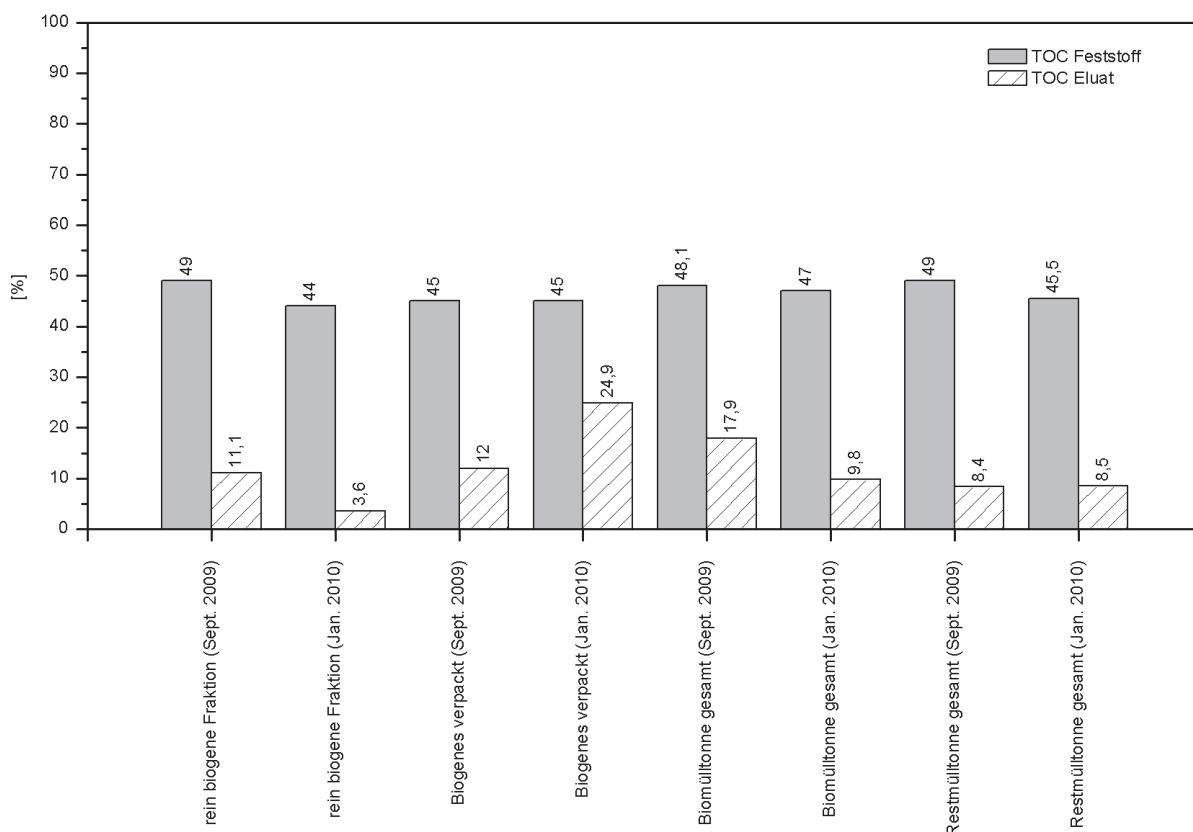


Abbildung 17: TOC im Eluat und im Feststoff

Die Messwerte des TOC im Eluat variieren bei den gegenständlichen Proben zwischen 3,6 % und 24,9 %. Hier ist ersichtlich, dass der TOC im Feststoff über alle Analysenproben hinweg annähernd im gleichen Bereich liegt, während der TOC im Eluat eine größere Schwankungsbreite aufweist. Dies bedeutet, dass bei der „Biomülltonne gesamt vom September 2009“ mehr wasserlösliche Komponenten vorhanden sind als bei der Probe „Biomülltonne gesamt vom Jänner 2010“. Die beiden Proben der „Restmülltonne gesamt“ zeigen fast idente TOC-Eluat-Werte, im Vergleich zur „Biomülltonne gesamt vom September 2009“ sind in den Restmülltonnen offensichtlich mehr unlösliche Komponenten wie beispielsweise Kunststoffe enthalten.

5.3.2.5 Biogener Kohlenstoffanteil

Der biogene Kohlenstoffanteil der analysierten Proben wird in Abbildung 18 dargestellt.

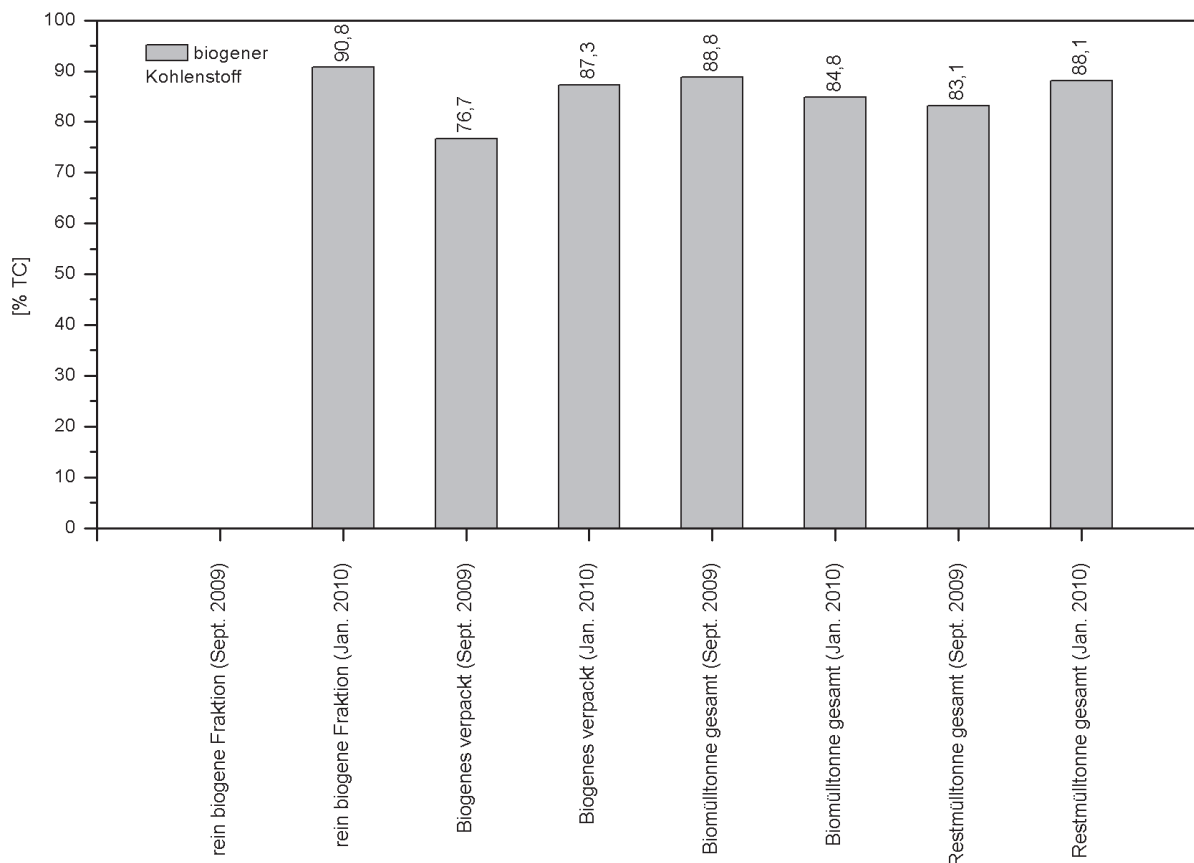


Abbildung 18: biogener Kohlenstoffanteil

Die Probe „rein biogene Fraktion (Sept. 2009)“ wurde nicht analysiert, da davon ausgegangen wurde, dass der biogene Kohlenstoffanteil bei 100 % liegt. Diese Vermutung wurde mit der Probe „rein biogene Fraktion (Jän. 2010)“ bestätigt, wo ein biogener Anteil von über 90 % ermittelt wurde.

Mit 76,7 % biogenem Kohlenstoffanteil erreichte die Probe „Biogenes verpackt (Sept. 2009)“ den kleinsten biogenen Anteil der gesamten Versuchsreihe. Die Probe der gleichen Stoffgruppe der zweiten Versuchsreihe „Biogenes verpackt (Jän. 2010)“ ergab einen Messwert von 87,3 % biogenem Kohlenstoffanteil. Dieser Unterschied in den Messwerten kann aufgrund der Inhomogenität der Proben und der Einengung der Analysenprobe zustande gekommen sein. Die Proben „Biogenes verpackt (Jän. 2010)“, „Biomülltonne gesamt (Sept. 2009)“, „Biomülltonne gesamt (Jän. 2010)“, „Restmülltonne gesamt (Sept. 2009)“ und „Restmülltonne gesamt (Jän. 2010)“ liegen mit ihren biogenen Kohlenstoffanteilen nahe bei der Fraktion „rein biogene Fraktion (Jän. 2010)“.

Es ist sowohl in den Biomülltonnen sowie in den Restmülltonnen der untersuchten Supermärkte ein wesentlicher biogener Kohlenstoffanteil feststellbar.

5.3.2.6 Kohlenwasserstoff-Index im Feststoff

Die Abbildung 19 zeigt die Messwerte des Kohlenwasserstoff-Index im Feststoff (KW-Index) der acht analysierten Proben.

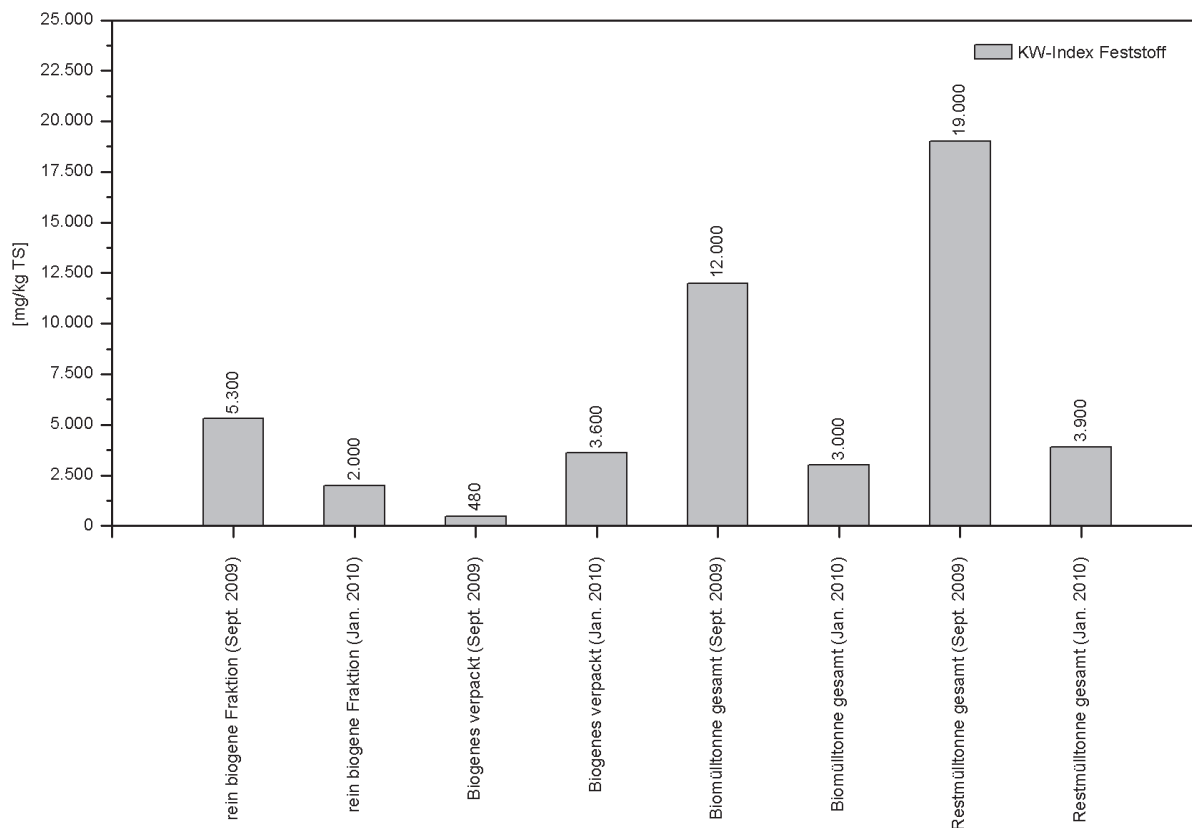


Abbildung 19: Kohlenwasserstoff-Index im Feststoff

Die Messwerte des KW-Index im Feststoff zeigen sowohl innerhalb der zugehörigen Fraktionen als auch als Gesamtheit kein einheitliches Bild. Der größte Ausreißer mit 19.000 mg/kg TS wurde in der Probe „Restmülltonne gesamt (Sept. 2009)“ verifiziert. In der entsprechenden Probe beim zweiten Versuch im Jänner 2010 lag der Wert nur noch bei 3.900 mg/kg TS (siehe „Restmülltonne gesamt (Jän. 2010)“). Selbige Tendenz ist bei den Proben „Biomülltonne gesamt (Sept. 2009)“ und „Biomülltonne gesamt (Jän. 2010)“ mit den Werten zwischen 12.000 mg/kg TS und 3.000 mg/kg TS erkennbar. Bei den Proben „Biogenes verpackt (Sept. 2009)“ und „Biogenes verpackt (Jän. 2010)“ ist ein umgekehrter Trend erkennbar, wobei bei der ersten Versuchsreihe zuerst ein niedriger Wert von 480 mg/kg TS KW-Index im Feststoff und bei der zweiten Versuchsreihe ein höherer Wert von 3.600 mg/kg TS ermittelt wurde.

Auf Basis dieser Ergebnisse kann festgehalten werden, dass die unterschiedlichen Gehalte an Kohlenwasserstoffen offensichtlich mit der Inhomogenität der Proben zu tun haben und es ggf. zu einer Überbestimmung des Materials gekommen sein kann.

Die beiden Proben der rein biogenen Fraktion weisen 5.300 mg/kg TS sowie 2.000 mg/kg TS an Kohlenwasserstoff-Index im Feststoff auf. Der KW-Index kann von höher molekularen

Kohlenwasserstoffen (Fette, Öle) stammen, welche durch biologische Aktivität herrühren bzw. durch enthaltene Kunststoffe vorhanden sein können. Die höher molekularen Kohlenwasserstoffe werden im Zuge der Hexan-Extraktion gelöst und im Parameter KW-Index aufsummiert.

5.3.2.7 Summe Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole im Feststoff und Summe der 16 PAKs nach EPA im Feststoff

Der organische Summenparameter für Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole im Feststoff (BTEX) und die Summe der 16 PAKs nach EPA im Feststoff (PAK16) wurden bei der ersten Untersuchungsreihe anhand vier Laborproben untersucht. Es zeigte sich, dass der Messwert jeweils unterhalb der Bestimmungsgrenze liegt (siehe Tabelle VII im Anhang). Da eine Kontamination mit diesen genannten Schadstoffen aufgrund der Ergebnisse der ersten Proben weitgehend auszuschließen ist, wurde bei der zweiten Untersuchungsreihe von dessen Bestimmung abgesehen.

6 Treibhausgasbilanz

Die betrachteten Abfälle aus dem Handelskettenbereich mit ihren Charakteristiken (Zusammensetzung, Eigenschaften und Mengen) sind im Rahmen einer abfallwirtschaftlichen Betrachtung nicht zu vernachlässigen. Zum einen stellen diese Abfälle aufgrund des hohen biogenen Anteils einen Rohstoff dar und zum anderen kommt es bei der Umwandlung von organischer Substanz je nach verwendeter Technologie zur Entstehung klimarelevanter Gase. Das dabei entstehende Kohlendioxid aus der Umwandlung der Biomasse verhält sich durch die biogene Herkunft des Kohlenstoffs klimaneutral.

Die Ermittlung und vergleichende Bewertung der Klimaschutzpotentiale hat zum Ziel eine einfache Bilanzierung der thermischen, anaeroben und aeroben Behandlung der untersuchten Abfälle aus Supermärkten. Dabei wird folgender Lebensweg der Dienstleistung „Abfallentsorgung“ betrachtet. Mit dem Einbringen des Abfalls in die Behandlung/Verwertung beginnt die Bilanz. Das Vorleben des Abfalls ist für die Frage der Behandlungs- bzw. Verwertungsmöglichkeit nicht relevant. Es wird angenommen, dass bei allen Behandlungs- bzw. Verwertungsoptionen das Vorleben des Abfalls gleich ist und sich somit aus der Betrachtung herauskürzt. Für jedes System wird der gleiche Nutzen bilanziert: die „Verwertung/Behandlung der gleichen Menge Biomüll bzw. Restmüll aus dem Handelskettenbereich“. Die Erzeugung eines quantifizierbaren Nutzens (z.B. Ersatz eines Primärproduktes, Nutzung von Wärme) eines betrachteten Systems wird durch eine Gutschrift ausgedrückt [66, S. 14 f.]. Im Rahmen dieser vergleichenden Betrachtung wird die Menge von 1 t Inputabfallmaterial (Restmüll oder Biomüll) aus dem Lebensmitteleinzelhandel als funktionelle Einheit angesetzt. In den Grobbilanzen werden die Gutschriften eines klimarelevanten Gases (Emissionseinsparungen/ -vermeidungen) als negativer Wert und die Emissionen als positiver Wert angeführt.

Im Rahmen der Sachbilanz erfolgt die Ermittlung der klimarelevanten Emissionen aus folgenden Systemelementen:

1. Materialaufbereitung vor dem eigentlichen Prozess: Es werden jene klimarelevanten Emissionen (nur die CO₂-Emissionen) aus dem Strombedarf zur Aufbereitung und aus dem Einsatz von Dieselmotoren berücksichtigt.
2. Verwertungs-/Behandlungsprozess: Es werden jene klimarelevanten Emissionen aus dem Einsatz von Dieselmotoren, Strom- und Wärmebedarf (nur die CO₂-Emissionen) sowie aus dem gegebenenfalls auftretenden biologischen Abbau (CH₄, N₂O) berücksichtigt.
3. Nutzen des erzeugten „Produktes“: Es werden jene klimarelevanten Emissionen aus dem „Erzeugnis“ als „Gutschriften“ in die Bilanz aufgenommen (CO₂, CH₄, N₂O).

Die nachfolgende Abbildung 20 skizziert das oben genannte System.

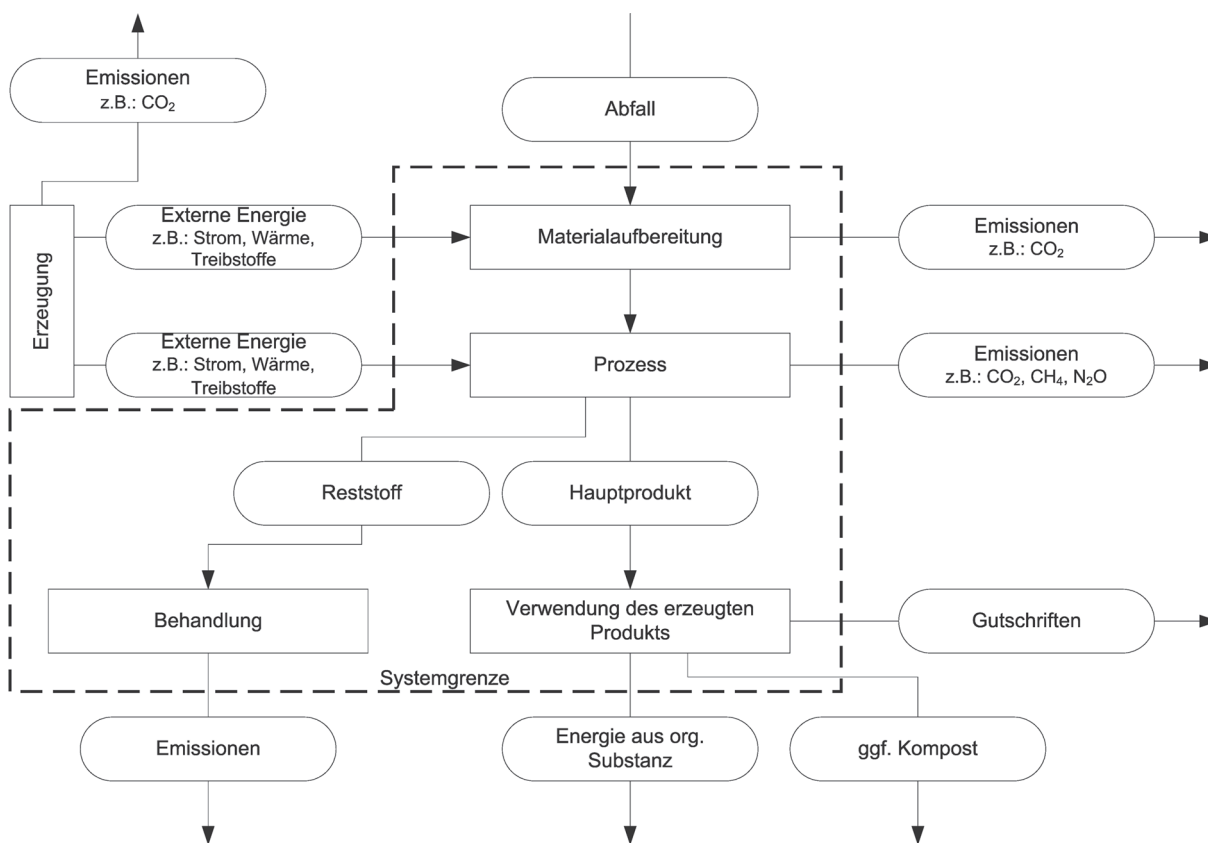


Abbildung 20: Referenzsystem zur Berechnung der Grobbilanz inkl. Systemgrenze

Die Systemgrenzen werden wie folgt generell definiert, sodass eine Vergleichbarkeit der drei verschiedenen Szenarien (aerobe, anaerobe und thermische Behandlung) gegeben ist. Die zu vergleichenden Szenarien werden dann in den jeweiligen Unterkapiteln dargestellt. Der an die betrachteten Behandlungsanlagen angelieferte Abfall stellt den Systeminput dar. Der Transport des Materials zu den Anlagen liegt außerhalb des Betrachtungsraumes. Bei gegenständlicher Zielsetzung sind der Transportweg sowie die Transportart ohne Relevanz, da davon auszugehen ist, dass die Transporte nur regional beurteilt werden können. Prozessrückstände sind der Systemoutput und werden nur dann einbezogen, sofern ein nennenswerter Beitrag zur klimaneutralen Energieproduktion auf Grund eines biogenen und fossilen Anteils im Rückstand vorhanden ist. Prozesse der Bereitstellung, der Wartung und der Reparatur der Anlagen selbst liegen außerhalb der Systemgrenzen.

Die Bezugsgröße zum Vergleich der Behandlungsverfahren ist eine Tonne Inputmaterial (Feuchtsubstanz, FS). Etwaige zusätzliche Inputmaterialien wie beispielsweise Strukturmaterial für die Kompostierung werden nicht in die Treibhausgas-Bilanzierung mitaufgenommen. Allfällig anfallende Sickerwässer werden nicht berücksichtigt. Die Entsorgung der abgetrennten Reststoffe aus der Kompostierung sowie die Reststoffe aus der Gärrestaufbereitung werden nicht berücksichtigt. Bei der Verbrennung wird die Entsorgung der Aschen und Schlacken nicht miteingerechnet.

Die klimarelevanten Gase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) werden betrachtet. Als Zeithorizont für die Klimarelevanz der einzelnen Treibhausgase wird 100 Jahre gewählt. Für Methan wird ein Treibhausgasfaktor (Äquivalenzfaktor) lt. IPCC, 2007

von 25 und für Lachgas von 298 verwendet [67, S. 223, Table 2.14]. Die Treibhausgasemissionen werden folgend immer als CO₂-Äquivalente (CO₂-eq) angegeben. Diese Äquivalenzfaktoren werden aufgrund der Vergleichbarkeit in der vorliegenden Arbeit verwendet, da Literaturdaten aus Studien verwendet werden, die auf diesen Faktoren basieren.

Die Gutschrift aus der erzeugten Strommenge bzw. die Emissionen bei zugekauftem Strom basieren auf dem Gesamtemissionsfaktor (d.h. inklusive Vorkette) für die Stromaufbringung gemäß den Daten des Umweltbundesamtes. Jede Kilowattstunde Strom, die eingespeist wird (erzeugte Strommenge abzüglich Stromeigenverbrauch), ersetzt 1 kWh Strom mit dem Emissionsfaktor von 274 g CO₂-eq/kWh. Der Emissionsfaktor für Diesel inkl. Vorkette wird mit 2.765 g CO₂-eq/l angesetzt [68]. Die Substitution der Wärme orientiert sich am österreichischen Wärmemix 2012 (basierend auf dem Fernwärmemix [69]) mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 213 g CO₂-eq/kWh Wärme.

Weitere Daten für die Berechnungen stammen einerseits aus der Literaturrecherche und andererseits aus den eigenen Untersuchungen. Es sei vorausgeschickt, dass es sich um eine Grobbilanzierung handelt, bei welcher ein gewisser Grad an Unsicherheit bzw. die Möglichkeit, dass Varianzen bezüglich Genauigkeit und Reproduzierbarkeit auftreten, besteht. Dies ist auf unterschiedliche Herkunft und Qualität der verwendeten Daten zurückzuführen, da Systemausbeuten von jeweiligen Verfahren, dessen Wirkungsgrad und der Zusammensetzung des Materialinputs abhängen.

Als Behandlungs-/Verwertungswege werden die drei folgenden Varianten betrachtet, indem jeweils das System mit der angenommenen Verfahrenstechnologie beschrieben und die Sachbilanz mit der Wirkungsabschätzung für den Restmüll und den Biomüll aus dem Handelskettenbereich dargelegt werden. Ein Versuch zum Vergleich der Systemvarianten ist Teil von Kapitel 7.3 dieser Arbeit.

6.1 Kompostierung

Eine gezielte Kompostierung bedarf einer entsprechenden Zusammensetzung des Ausgangsmaterials (C:N-Verhältnis, Wassergehalt, etc. – siehe u.a. Kapitel 4.6). Bei diesem Verfahren wird die organische Masse aerob unter Bildung von Kohlendioxid abgebaut und die entstehende Wärme kann energetisch nicht genutzt werden. Durch die Aufbringung von Fertigungskompost erfolgen eine Kohlenstofffixierung im Boden, eine Minereraldüngereinsparung sowie eine Vermeidung von Lachgasemissionen bei der Aufbringung von Stickstoff-Handelsdünger.

Die Modellanlage für die Berechnungen kann wie folgt beschrieben werden (vgl. Abbildung 21): Materialaufbereitung (Sieb, Zerkleinerer, Windsichter, NE-Metall-Abscheider, Magnetabscheider), offene Kompostierung mit passiv belüfteten Trapezmieten – Belüftung durch regelmäßiges Umsetzen, Erzeugung von Fertigungskompost und Einsatz des erzeugten Kompostes in der Landwirtschaft. Die während der Materialaufbereitung abgetrennte Kunststofffraktion des Restmülls wird in einer Müllverbrennungsanlage behandelt, da der Anteil an Kunststoffen im Verfahrensinput nicht vernachlässigbar ist. Hingegen werden aber

die Transportemissionen von der Kompostanlage zur Müllverbrennungsanlage nicht berücksichtigt, da diese vernachlässigbar gering sind.

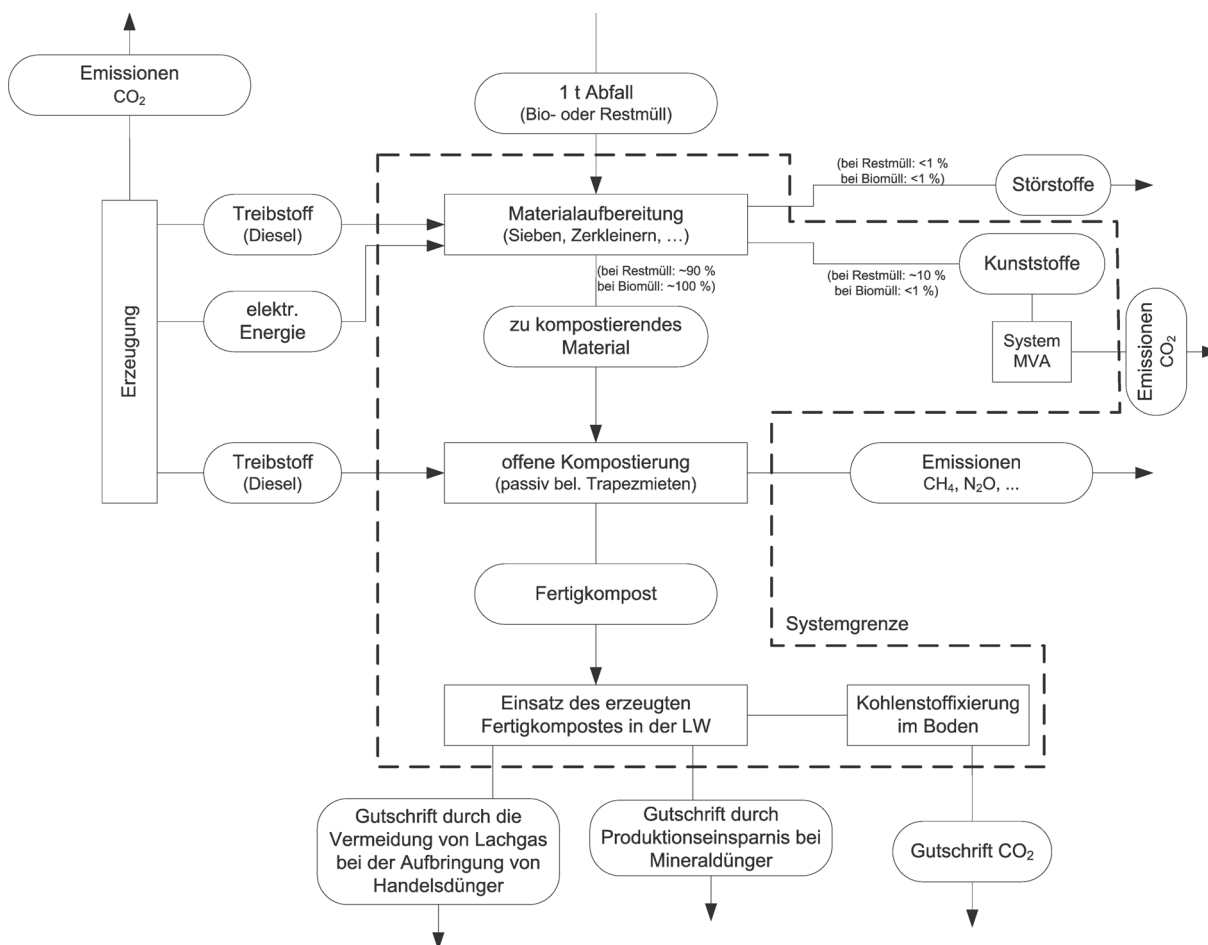


Abbildung 21: Referenzsystem Kompostierung

Im Folgenden wird die Bilanzierung der Treibhausgase für die drei Systemelemente der Kompostierung zuerst separat vorgenommen und dann zur Gesamtbilanz des Systems der Kompostierung zusammengefasst. Aufgrund des Fehlens von belastbarem Datenmaterial in der Literatur für die Kompostierung von Restmüll und Biomüll aus Supermärkten werden vergleichbare Daten aus der Kompostierung von Bioabfällen sowohl für die Bilanzierung der Restmüll- als auch für die Biomülltonne aus Supermärkten verwendet. Einzig im Subsystem „Kohlenstofffixierung“ erfolgt eine eigene Berechnung auf den entsprechenden Untersuchungsdaten der Restmüll- und Biomülltonne.

Materialaufbereitung vor dem Prozess der Kompostierung

Für die Aufbereitung der Abfälle sind sowohl Treibstoff als auch elektrische Energie notwendig, welche zu klimarelevanten Emissionen führen. Die Literaturwerte für die Abfallaufbereitung von Kompostrohmaterial sind meist in den Energieeinsatz während des Kompostierungsprozesses eingerechnet. In einer Studie aus dem Jahr 2005 [65, S. 39 f.] wird der Energieeinsatz für die genannten Aufbereitungsschritte separat angegeben. Für die

Radlader und Zerkleinerer werden 0,99 l Diesel pro Tonne gesammelten Abfall und für die Aufbereitungsanlage 3,75 kWh Strom pro Tonne gesammelten Abfall benötigt. Die nachfolgende Tabelle 15 zeigt die Berechnung der CO₂-Äquivalente des Energieverbrauchs der Materialaufbereitung.

Tabelle 15: Berechnung der CO₂-Emissionen für den Energieverbrauch bei der Materialaufbereitung [65, S. 39]¹⁾, [65, S. 40]²⁾, [68]³⁾

Energieverbrauch pro t gesammelten Abfall	Emissionsfaktor	Emissionen in kg CO ₂ -eq/t Abfall
0,99 l Diesel ¹⁾	2,765 kg CO ₂ -eq/l ³⁾	2,737
3,75 kWh Strom ²⁾	0,274 kg CO ₂ -eq/kWh ³⁾	1,028
	SUMME	3,765

Somit werden pro Tonne angeliefertem Abfall, unabhängig ob Biomüll oder Restmüll aus dem Handelskettenbereich, 3,8 kg CO₂-eq in die Gesamtbilanz als Emission aufgenommen.

Bei dem betrachteten Biomüll sind die Fraktionen an Kunststoffen unter 1 Masse-%, somit wurde die Verbrennung der Kunststoffe vom Biomüll in der Grobbilanz nicht berücksichtigt. Die Fraktionen an Kunststoffen beinhalten „Kunststoffe (2-D)“, „Kunststoffe (3-D)“ und „Materialverbunde ohne Inhalt“ vollständig sowie anteilig ein Fünftel der Fraktion „Kunststoffbehältnisse mit Inhalt“. Für den Restmüll ergeben die soeben genannten Fraktionen an Kunststoffen einen Wert von 10,3 Masse-%, daher wird die Verbrennung von Kunststoffen in das System der Restmüll-Kompostierung mit einem gerundeten Massenanteil von 10 % aufgenommen. Somit werden 90 % des Abfallinputs beim Restmüll im Prozess der Kompostierung und der Verwendung des Produktes berücksichtigt.

Die Berechnung der CO₂-Emission aus der Verbrennung der im Restmüll enthaltenen Kunststoffe ist im Anhang in Tabelle VIII (Berechnungsgrundlage siehe Kapitel 8.3.3) angeführt und ergibt für dieses Subsystem eine Emission von 147,72 kg CO₂-eq/t Restmüllinputmaterial.

Prozess der Kompostierung

Emissionen während des Kompostierungsprozesses sind jene aus dem Verbrauch von Dieselmotorkraftstoff und jene aus dem aeroben biologischen Abbau der organischen Ausgangsstoffe. Für das Umsetzen der Mieten und die Verwendung der dieselbetriebenen Trommelsiebe werden in Summe 2,16 l pro Tonne angeliefertem Abfall angesetzt [65, S. 42 u. 52]. Die Berechnung der CO₂-Äquivalente ist in Tabelle 16 verdeutlicht.

Tabelle 16: Berechnung der CO₂-Emissionen für den Energieverbrauch bei der Kompostierung [65, S. 42 u. 52]¹⁾, [68]²⁾

Energieverbrauch pro t gesammelten Abfall	Emissionsfaktor	Emissionen in kg CO ₂ -eq/t Abfall
2,16 l Diesel ¹⁾	2,765 kg CO ₂ -eq/l ²⁾	5,972
	SUMME	5,972

Die Emissionen von rund 6 kg CO_{2-eq}/t angeliefertem Biomüll aus Supermärkten werden für das Umsetzen der Mieten in der Gesamtbilanz angeführt. Für die Gesamtbilanz des angelieferten Restmülls werden 90 % der Emissionen und somit 5,375 kg CO_{2-eq}/t angesetzt.

Die Methanemissionen sind von der Dimensionierung der Mieten und von der Struktur des Materials abhängig [65, S. 46]. Die Lachgasfrachten steigen mit der Mietengröße, dies wird in der Literatur aufgrund von Messungen abgeleitet [65, S. 48]. Zur Bilanzierung werden aus der Literatur die Frachten 0,65 kg CH₄ pro Tonne Abfall (FS) und 0,06 kg N₂O pro Tonne Abfall (FS) verwendet [65, S. 50]. Diese Werte sind Mittelwerte einer Studie, die auf belastbaren Daten aus weiteren Literaturstellen beruhen. Die Berechnung der klimarelevanten Emissionen aus dem Kompostierungsprozess ist in Tabelle 17 angeführt.

Tabelle 17: Berechnung der klimarelevanten Emissionen (CH₄, N₂O) aus dem Kompostierungsprozess [65, S. 50]¹⁾, [67, S. 223, Table 2.14]²⁾

Emissionen offener Mietenkompostierung	Emission in kg/t angelieferter Abfall	Äquivalenzfaktor GWP 100	Emissionen in kg CO _{2-eq} /t Abfall
CH ₄	0,65 ¹⁾	25 ²⁾	16,25
N ₂ O	0,06 ¹⁾	298 ²⁾	17,88
		SUMME	34,13

Die Methan- und Lachgasemissionen der offenen Mietenkompostierung beziffern sich mit 34,13 kg CO_{2-eq}/t Biomüll-Inputmaterial und 30,72 kg CO_{2-eq}/t Restmüll-Inputmaterial (90 % Anteil). Folglich ergibt sich für den gesamten Kompostierungsprozess des Biomülls eine Emission von rund 40 kg CO_{2-eq}/t Biomüll-Inputmaterial und für den Restmüll eine Emission von rund 35 kg CO_{2-eq}/t Restmüll-Inputmaterial.

Einsatz der Erzeugnisse

Durch den Einsatz des Erzeugnisses „Kompost“ erfolgen eine Kohlenstofffixierung im Boden, eine Mineraldüngereinsparung sowie eine Vermeidung von Lachgasemissionen bei der Aufbringung von Handelsdünger. Der Transportweg vom Kompostwerk zur landwirtschaftlichen Fläche wird nicht mitbilanziert. Es ist davon auszugehen, dass die Transportdistanz möglichst gering gehalten wird. Die Methanemissionen bei der Anwendung von Frischkompost werden in die Bilanzierung nicht aufgenommen, da der deutsche Umweltforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zum Thema „Optimierung der Verwertung organischer Abfälle“ aus dem Jahr 2012 [71, S. 41] folgendes besagt: *„Bei der Anwendung von Frischkompost wird nunmehr nicht mehr davon ausgegangen, dass es bei Anwendungen auf dem Feld zu weiteren Methanfreisetzungen kommt, da im Gegensatz zur Nachrotte bei flächiger Ausbringung i.d.R. nicht mit anaeroben Verhältnissen zu rechnen ist.“*

Zu einer Kohlenstofffixierung im Boden kommt es, wenn Kompost aufgebracht wird. Über 90 % des im Kompost gebundenen Kohlenstoffs werden innerhalb von 100 Jahren mineralisiert. Etwa 8 % des Kohlenstoffs werden im Boden fixiert und es wird angenommen,

dass dieser über einen 100 Jahreshorizont im Boden verbleibt. Diese Langzeitspeicherung von Kohlenstoff ist aufgrund von nicht ausreichend langfristigen Untersuchungen noch nicht belegt und folglich deren Beitrag zum Klimaschutz nicht gänzlich bewiesen [66, S. 46]. Da die Kohlenstofffixierung in einer Studie des österreichischen Umweltbundesamtes [31, S. 42 f.] in die Klimabilanz aufgenommen wurde, erfolgt dies auch im Rahmen der gegenwärtigen Bilanzierung.

Die Berechnungen und die Datenbasis der Kohlenstofffixierung im Boden aus dem Kompost sind im Anhang Tabelle IX ersichtlich. Somit werden aus einer Tonne Restmüll 22,9 kg CO₂ im Boden fixiert und bei einer Tonne Biomüll 7,8 kg CO₂, welche als Emissionsgutschrift beim System Kompostierung eingerechnet werden. Diese eigens berechneten Werte sind vergleichbar mit dem angesetzten Wert des Umweltbundesamtes von 13,3 kg gespeichertem CO₂ pro Tonne biogenem Abfall [31, S. 46].

Durch die landwirtschaftliche Verwertung von Kompost kann mineralischer Handelsdünger, welcher energieintensiv in der Erzeugung ist, eingespart werden [31, S. 43]. In der Studie von Lechner et. al. [65, S. 107 ff.] wurde aus den Nährstoffgehalten des Wiener Kompostes, den langfristig düngewirksamen Mengen an Nährstoffen und den Emissionen aus der Mineraldüngererzeugung die vermiedenen Emissionen aus der Anwendung von Kompost ermittelt [65, S. 107 ff.]. Auf Basis von Untersuchungsergebnissen, Erfahrungswerten und Literaturdaten wird in der genannten Studie ein Mittelwert von 46 kg CO₂-Äquivalent pro Tonne Fertigkompost als vermiedene Emissionen bezüglich dem Handelsdünger herangezogen. Vom österreichischen Umweltbundesamt wird angegeben, dass aus einer Tonne Abfallausgangsmaterial ca. 350 kg Fertigkompost entstehen [31, S. 43]. Somit ergeben sich 16,1 kg CO₂-Äquivalent pro Tonne Biomüll-Ausgangsmaterial als vermiedene Emissionen durch die Substitution von Handelsdünger (Berechnung siehe Anhang Tabelle X). Für die Restmüll-Gesamtbilanz wird anteilig (90 %) 14,5 kg CO₂-Äquivalent pro Tonne Restmüll-Ausgangsmaterial berücksichtigt.

Bei der Aufbringung von Stickstoff-Handelsdünger entstehen N₂O-Emissionen, welche durch die Verwendung von Kompost substituiert werden. Es wird angenommen, dass 1,25 % des eingebrachten verfügbaren Stickstoffs (N) substituiert werden [31, S. 45]. Die Berechnung der vermiedenen Lachgasemissionen sowie die Annahme aus der Literatur ist in Tabelle 18 angeführt.

Tabelle 18: Vermeidung von Lachgasemissionen durch die Substitution von Stickstoff-Handelsdünger [31, S. 44]¹⁾, [67, S. 223, Table 2.14]²⁾

Düngewirksame Menge an Stickstoff (N) in kg/t Abfall	N ₂ O-Emissionen Substitution von 1,25 % in kg/t Abfall	Äquivalenzfaktor GWP 100 für N ₂ O	Gutschrift in kg CO ₂ -eq/t Abfall
0,93 ¹⁾	0,012 kg N ₂ O/t	298 ²⁾	-3,46

Die vermiedenen Lachgasemissionen von 3,46 kg CO_{2-eq}/t Abfall werden in die Gesamtbilanz für den Biomüll aus Supermärkten zu 100 % und für den Restmüll aus Supermärkten zu 90 % (3,12 kg CO_{2-eq}/t Abfall) als Gutschrift eingetragen.

Die Zusammenfassung der drei Systemelemente ergibt die nachfolgenden Gesamtbilanzen für die Kompostierung von Rest- und Biomüll aus Supermärkten.

Tabelle 19: Gesamtbilanz für die Behandlung von einer Tonne Restmüll aus Supermärkten in einer Kompostierung [65, S. 39]¹⁾, [65, S. 40]²⁾, [65, S. 42 u. 52]³⁾, [65, S. 50]⁴⁾, [68]⁵⁾, [67, S. 223, Table 2.14]⁶⁾

	Energieverbrauch bzw. Emission	Emissionsfaktor bzw. Äquivalenzfaktor GWP 100	CO ₂ -Äquivalente in kg/t Restmüll
1. Materialaufbereitung			
Dieselmotorkraftstoff	0,99 l Diesel ¹⁾	2,765 kg CO _{2-eq} /l ⁵⁾	2,737
Elektrische Energie	3,75 kWh Strom ²⁾	0,274 kg CO _{2-eq} /kWh ⁵⁾	1,028
Emission durch die Verbrennung der im Restmüll enthaltenen Kunststoffe	-	-	147,72
2. Prozess			
Dieselmotorkraftstoff	2,16 l Diesel ³⁾	2,765 kg CO _{2-eq} /l ⁵⁾	5,375 *
Methan	0,65 kg ⁴⁾	25 ⁶⁾	14,63 *
Lachgas	0,06 kg ⁴⁾	298 ⁶⁾	16,09 *
3. Erzeugnis			
Kohlenstofffixierung	-	-	-22,9
Mineraldüngereinsparung	-	-	-14,5 *
Vermeidung von Lachgas bei der Aufbringung von N-Handelsdünger	0,012 kg	298 ⁶⁾	-3,12 *
EMISSION (Summe der Emissionen aus der Materialaufbereitung und dem Prozess abzüglich der Gutschriften aus dem Erzeugnis)			147,06

* unter Berücksichtigung des 90 %-Anteils, welcher ausgehend vom Inputstrom ab dem Prozess der Kompostierung angenommen wird.

Die Treibhausgasbilanz berechnet für eine Tonne Restmüll aus dem Handelskettenbereich ergibt mit den angenommenen und berechneten Werten eine Emission von rund 147 kg CO_{2-eq} (vgl. Tabelle 19). Ebenso ergibt die Kompostierung von Biomüll eine Emission von rund 17 kg CO_{2-eq}/t Input (vgl. Tabelle 20). Die Gutschriften ergeben sich bei beiden Abfallinputmaterialien durch das Erzeugnis. Die Emissionen beruhen auf der Materialaufbereitung und dem Prozess. Den Unterschied der beiden Inputmaterialien ergibt sich aufgrund der Kohlenstofffixierung und der Emissionen hervorgerufen durch die Verbrennung des Kunststoffanteils im Restmüll.

Tabelle 20: Gesamtbilanz für die Behandlung von einer Tonne Biomüll aus Supermärkten in einer Kompostierung [65, S. 39]¹⁾, [65, S. 40]²⁾, [65, S. 42 u. 52]³⁾, [65, S. 50]⁴⁾, [68]⁵⁾, [67, S. 223, Table 2.14]⁶⁾

	Energieverbrauch bzw. Emission	Emissionsfaktor bzw. Äquivalenzfaktor GWP 100	CO ₂ - Äquivalente in kg/t Biomüll
1. Materialaufbereitung			
Dieselmotorkraftstoff	0,99 l Diesel ¹⁾	2,765 kg CO ₂ -eq/l ⁵⁾	2,737
Elektrische Energie	3,75 kWh Strom ²⁾	0,274 kg CO ₂ -eq/kWh ⁵⁾	1,028
2. Prozess			
Dieselmotorkraftstoff	2,16 l Diesel ³⁾	2,765 kg CO ₂ -eq/l ⁵⁾	5,972
Methan	0,65 kg ⁴⁾	25 ⁶⁾	16,25
Lachgas	0,06 kg ⁴⁾	298 ⁶⁾	17,88
3. Erzeugnis			
Kohlenstofffixierung	-	-	-7,8
Mineraldüngereinsparung	-	-	-16,1
Vermeidung von Lachgas bei der Aufbringung von N-Handelsdünger	0,012 kg	298 ⁶⁾	-3,46
EMISSION (Summe der Emissionen aus der Materialaufbereitung und dem Prozess abzüglich der Gutschriften aus dem Erzeugnis)			16,51

6.2 Vergärung

Biogene Abfälle werden in einem biologischen Prozess anaerob abgebaut. Als Produkt entstehen Biogas, Gärrest und Flüssigdünger. Biogas besteht zu ca. 60 % aus Methan und zu ca. 40 % aus Kohlendioxid. In einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage kann das Biogas zu Strom und Wärme umgesetzt werden oder alternativ zu Erdgasqualität aufbereitet als Treibstoff genutzt werden. Der Wirkungsgrad bei Vergärungsanlagen ist von der bakteriellen Tätigkeit und damit im Zusammenhang stehend von der Substratzusammensetzung abhängig. Daher ist der biologische Abbaugrad (der Anteil der zugegebenen organischen Substanz, der bakteriell abgebaut werden kann) die bestimmende Größe bei der Vergärung [70, S. 4 f.].

CO₂-äquivalente Emissionen entstehen durch den energetischen Eigenbedarf der Vergärungsanlage und den Methanschlupf im Blockheizkraftwerk sowie durch Methanemissionen bei der Überführung des Gärrestes in die Nachrotte. Für die Beheizung der Reaktoren und die Hygienisierungsstufe wird die Abwärme des Blockheizkraftwerkes verwendet. [73, S. 40].

Als Modellanlage für die Berechnungen wurde folgende Anlage (vgl. Abbildung 22) herangezogen: Nassvergärung ohne Separierung der Feststoffe (d.h. Ausbringung des Gärrestes in die Landwirtschaft), Verstromung des Biogases mit Nutzung der Abwärme. Die während der Materialaufbereitung abgetrennte Kunststofffraktion des Restmülls wird in einer Müllverbrennungsanlage behandelt, da der Anteil an Kunststoffen im Anlageninput nicht

vernachlässigbar ist. Hingegen werden die Transportemissionen von der Vergärungsanlage zur Müllverbrennungsanlage nicht berücksichtigt, da diese vernachlässigbar gering sind.

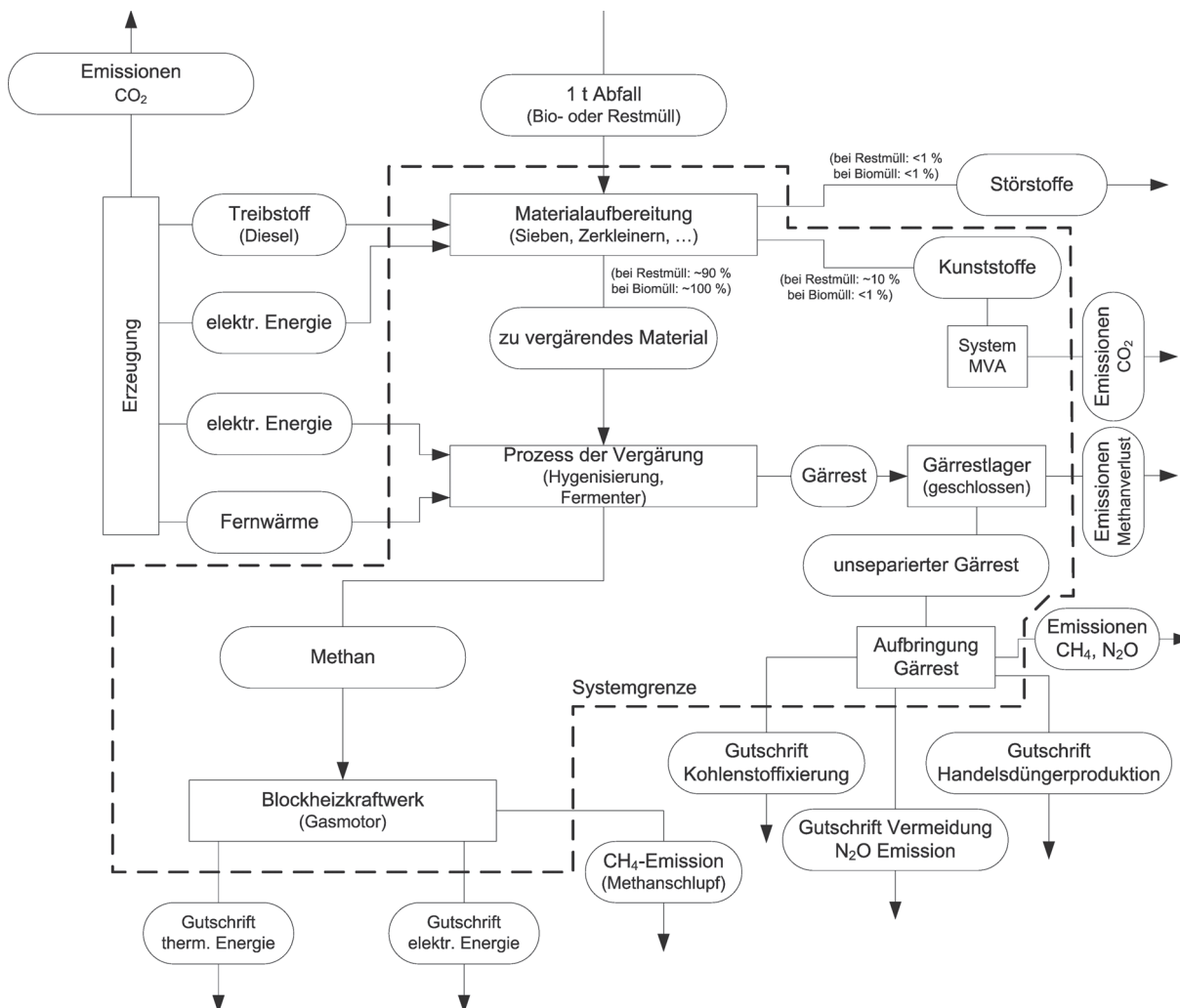


Abbildung 22: Referenzsystem Vergärung

Nachfolgend wird die Bilanzierung der Treibhausgase für die drei Systemelemente der Vergärung (Materialaufbereitung vor dem Prozess, Prozess, Einsatz der Erzeugnisse) zuerst separat vorgenommen und anschließend zur Gesamtbilanz des Systems zusammengefasst. Die Bilanzierung erfolgt sowohl für den Restmüll als auch für den Biomüll aus Supermärkten. Betreffend der Einheit Kubikmeter sei angemerkt, dass in dieser Arbeit immer von Normkubikmeter (Nm³) gesprochen wird (Bedingungen bei 0°C und 1,01235 bar).

Materialaufbereitung vor dem Prozess der Vergärung

In dieser Arbeit wird definiert, dass die Emissionen der Materialaufbereitung und des Subsystems für die Verbrennung der im Restmüll enthaltenen Kunststoffe gleich wie bei der Kompostierung sind (siehe Kapitel 8.3.1 – Unterpunkt „Materialaufbereitung vor dem Prozess der Kompostierung“ sowie Tabelle 15 und Tabelle VIII im Anhang).

Prozess der Vergärung

Vergärungsanlagen benötigen für die Erzeugung von Biogas Wärmeenergie und elektrische Energie. Die Wärmeenergie dient zum Anwärmen der zugeführten Substratmenge auf das Temperaturniveau im Fermenter und zum Aufrechterhalten der Reaktortemperatur. Für die Einbringung des Substrats, für Pumpen, für das Durchmischen der Gärreaktoren und für den Betrieb des Blockheizkraftwerkes wird Strom eingesetzt [31, S. 21]. Für die Koppelung des Eigenstrombedarfs mit dem Gasertrag in Abhängigkeit vom Gärsubstrat sind in der Literatur keine belastbaren Daten vorhanden. Somit wird der Eigenstrombedarf des Biomülls als auch des Restmülls aus Supermärkten für die Berechnung unabhängig von der gebildeten Gasmenge mit 70 kWh/t Inputmaterial bei der Nassvergärung angenommen [31, S. 22]. Des Weiteren wird der Wärmeeigenbedarf mit 90 kWh/t Inputmaterial unabhängig von der gebildeten Gasmenge verwendet. Das Verdünnen der Abfälle bei der Nassvergärung erfolgt mit Prozesswasser, welches nicht separat erwärmt werden muss. Weiters wird der Wärmebedarf für die Hygienisierung von Speiseresten mit 50 kWh/t Inputmaterial unabhängig vom Abfall angesetzt [31, S. 24]. Die Berechnung der CO₂-Äquivalente des Eigenenergieverbrauchs ist in Tabelle 21 aufgezeigt.

Tabelle 21: Berechnung der CO₂-Emissionen für den Eigenenergieverbrauch bei der Nassvergärung [31, S. 22]¹⁾, [31, S. 24]²⁾, [68]³⁾, [69]⁴⁾

Energieverbrauch pro t gesammelten Abfall	Emissionsfaktor	Emissionen in kg CO _{2-eq} /t Abfall
70 kWh Strom ¹⁾	0,274 kg CO _{2-eq} /kWh ³⁾	19,18
90 kWh Wärme (Fermenter) ¹⁾	0,213 kg CO _{2-eq} /kWh ⁴⁾	19,17
50 kWh Wärme (Hygienisierung) ²⁾	0,213 kg CO _{2-eq} /kWh ⁴⁾	10,65
	SUMME	49,00

Für den Prozess der Vergärung des angelieferten Biomülls aus Supermärkten werden 49 kg CO_{2-eq}/t Abfall in die Grobbilanzierung als Emission eingerechnet. Für die Gesamtbilanz des angelieferten Restmülls werden 90 % der Emissionen und somit 44,10 kg CO_{2-eq}/t angesetzt.

Einsatz der Erzeugnisse

Der Energieinhalt des erzeugten Biogases hängt von der Zusammensetzung des eingesetzten Abfallstroms ab. In Anlehnung an die Publikation von Scherer „Bestimmung der Abbauraten von Biogasanlagen“ wird in dieser Bilanzierung folgender Ansatz für die Berechnung des Biogaspotentials herangezogen. „1 kg Kohlenstoff als Ausgangsmaterial ergibt rechnerisch 1,81 Normkubikmeter Biogas, was wiederum auf dem chemischen Gesetz des konstanten Molvolumens von Gasen basiert ... Der Wert 1,181 NL/g C ist eigentlich theoretisch 3 % größer ... wurde daher bereits um 3 % nach unten korrigiert, da ein Teil des Kohlenstoffs während dem Gärvorgang in neu gebildete, bakterielle Biomasse übergeht und dann dem Biogas nicht mehr zur Verfügung steht ...“ [74, S. 138].

Die Berechnung der praktischen Biogasausbeute pro Tonne Inputmaterial sowie die Berechnungsgrundlagen sind dem Anhang Tabelle XI zu entnehmen. Der Methangehalt im Biogas wird im Rahmen dieser Arbeit mit 60 % je Tonne Inputmaterial unabhängig von der Abfallart des Inputmaterials angenommen [31, S. 30]. Dabei beträgt der Energieinhalt für Methan $9,94 \text{ kWh/m}^3$. Der Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerkes zur Erzeugung von Strom bzw. Wärme wird mit 35 % elektrisch und 45 % thermisch angesetzt unabhängig von der Größe der Anlage [31, S. 30]. Die Berechnung der CO_2 -Äquivalente aus der erzeugten Energie sind in Tabelle 22 aufgezeigt. Weiters wird angenommen, dass Strom und Wärme jeweils abzüglich des Eigenverbrauchs der Biogasanlage ins Stromnetz bzw. ins Fernwärmenetz eingespeist werden.

Tabelle 22: Berechnung der Energie des erzeugten Biogases je Tonne Biomüll und Restmüll aus den Supermärkten [68]¹⁾, [69]²⁾

Energieinhalt pro t gesammelten Abfall [Berechnung siehe Anhang Tabelle XI]	Emissionsfaktor	Gutschrift in kg $\text{CO}_{2\text{-eq}}$/t Abfall
165,20 kWh Strom	0,274 kg $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ /kWh ¹⁾	-45,26
212,40 kWh Wärme	0,213 kg $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ /kWh ²⁾	-45,24
BIOMÜLL	SUMME	-90,50
263,00 kWh Strom	0,274 kg $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ /kWh ¹⁾	-72,06
338,14 kWh Wärme	0,213 kg $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ /kWh ²⁾	-72,02
RESTMÜLL	SUMME	-144,10

Das aus den Bioabfällen der Handelsketten produzierte Biogas ergibt eine Emissionsgutschrift von rund 90 kg $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ /t Biomüll. Hingegen berechnete sich die Emissionsgutschrift für das Biogas aus dem Restmüll der Handelsketten mit über 140 kg $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ /t Restmüll. Die geringere Emissionsgutschrift beim Biomüll im Vergleich zum Restmüll ist zurückzuführen auf die sehr hohe Feuchte (> 80 %) des Biomülls und die damit verbundene Berechnung des biogenen Kohlenstoffs.

Bei der Lagerung von Gärresten können in unterschiedlichem Ausmaß relevante Methanemissionen auftreten. Im Gärrest sind je nach Verweilzeit des Gärsubstrats im Fermenter methanbildende Mikroorganismen vorhanden, die in unbeheizten Lagerbehältern einen Abbau verbliebener organischer Substanz und eine Freisetzung von Biogas hervorrufen. Die Literatur zeigt, dass aufgrund zu kurzer Verweilzeiten bis zu 25 % Methanverlust im Gärrestlager auftreten können. Unter der Annahme, dass das Endlager der Modellanlage geschlossen ist, wird mit einem Methanverlust von 2 % bezogen auf den Biogasertrag des jeweiligen Inputmaterials gerechnet (vgl. Tabelle 23) [31, S. 33 f.].

Tabelle 23: Berechnung des Methanverlustes im Gärrestlager bei der Vergärung von einer Tonne Inputmaterial

Methangehalt pro t gesammelten Abfall	2 % Methanverlust im Gärrestlager	Methanverlust in kg**	Emissionen in kg CO ₂ -eq/t Abfall***
47,48 m ³ (Biomüll)*	0,950 m ³	0,680 kg	17,00
75,60 m ³ (Restmüll)*	1,512 m ³	1,083 kg	27,06

* basierend auf den Berechnungen der Tabelle XI im Anhang

** berechnet mit der Dichte von Methan: 0,716 kg/m³

*** berechnet mit einem Äquivalenzfaktor GWP 100 für Methan von 25 [67, S. 223, Table 2.14]

Die Berechnung ergibt für den Biomüll aus Supermärkten eine Emission von 17 kg CO₂-eq/t Biomüll und rund 27 kg CO₂-eq/t Restmüll.

Durch unvollständige Verbrennung im Gasmotor des Blockheizkraftwerks und durch Ventilüberschneidungen bei Viertakt-Motoren entstehen Kohlenwasserstoffemissionen aus dem Gasmotor (Methanschleupf). Die Höhe der Methanemissionen ist abhängig von der Motorenart und dem Methangehalt des Biogases. In dieser Arbeit wird ein Methanschleupf von einem Prozent der erzeugten Biogasmenge angenommen [31, S. 35]. Die Berechnung ist der nachfolgenden Tabelle 24 zu entnehmen.

Tabelle 24: Berechnung des Methanschleupfs bei der Verbrennung von Biogas aus einer Tonne Inputmaterial

Methangehalt pro t gesammelten Abfall	1 % Methanschleupf bei der Verbrennung mittels Gasmotor	Methanverlust in kg**	Emissionen in kg CO ₂ -eq/t Abfall***
47,48 m ³ (Biomüll)*	0,475 m ³	0,340 kg	8,50
75,60 m ³ (Restmüll)*	0,756 m ³	0,541 kg	13,53

* basierend auf den Berechnungen der Tabelle XI im Anhang

** berechnet mit der Dichte von Methan: 0,716 kg/m³

*** berechnet mit einem Äquivalenzfaktor GWP 100 für Methan von 25 [67, S. 223, Table 2.14]

Der Methanschleupf beläuft sich beim Biomüll auf 8,5 kg CO₂-eq/t und beim Restmüll auf 13,5 kg CO₂-eq/t und stellt jeweils eine Emission dar.

Die Gärrückstände werden direkt als Dünger auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht. Für die Ausbringung von unsepariertem Gärrest werden in Anlehnung an die Literatur unabhängig von der Art des Abfalls die in der Tabelle 25 folgenden Emissionsfaktoren angenommen [31, S. 41].

Tabelle 25: Klimarelevante Emissionen durch die Aufbringung von unsepariertem Gärrest je Tonne Inputmaterial [31, S. 41]¹⁾, [67, S. 223, Table 2.14]²⁾

Emissionen Aufbringung von unsepariertem Gärrest	Emission in kg/t angelieferter Abfall	Äquivalenzfaktor GWP 100	Emissionen in kg CO _{2-eq} /t Abfall
CH ₄	0,007 ¹⁾	25 ²⁾	0,175
N ₂ O	0,085 ¹⁾	298 ²⁾	25,33
		SUMME	25,51

Durch die Aufbringung von Gärrest auf landwirtschaftliche Flächen ergibt sich eine Emission von 25,5 kg CO_{2-eq}/t Bioabfall und eine Gutschrift in Folge der Kohlenstoffbindung im Boden von 5,5 kg CO_{2-eq}/t Bioabfall-Inputmaterial [31, S. 46]. Die Kohlenstoffbindung im Boden wurde direkt aus der zitierten Literatur übernommen. Für die Grobbilanzierung des Restmülls werden von den soeben genannten Emissionen und Gutschriften 90 % angerechnet, da 10 % des Restmüll-Inputs in die Verbrennung von Kunststoffen gelangt. Die Aufbringung von Gärrest auf landwirtschaftliche Flächen beziffert eine Emission von 22,96 kg CO_{2-eq}/t Restmüll und die Kohlenstoffbindung im Boden eine Gutschrift von 4,95 kg CO_{2-eq}/t Restmüll-Inputmaterial.

Des Weiteren ist eine Gutschrift anwendbar, da durch die Verwendung des Gärrestes als landwirtschaftlicher Dünger die Produktion von mineralischem Handelsdünger vermieden wird. Der Nährstoffgehalt von nicht-separiertem Gärrest aus einer Tonne Inputmaterial beträgt 2,7 kg Stickstoff (N) und 0,57 kg Phosphor (P) [31, S. 45]. Die erzielbare Gutschrift für die Substitution von Handelsdünger ist in der nachfolgenden Tabelle 26 ersichtlich.

Tabelle 26: Gutschriften durch die Vermeidung der Handelsdüngerproduktion [31, S. 45]¹⁾, [31, S. 43]²⁾

Düngewirksame Menge an Nährstoffen in kg/t Abfall	Gutschrift für die Substitution von 1 kg Nährstoff in Handelsdüngern	Gutschrift in kg CO _{2-eq} /t Abfall
2,7 N ¹⁾	7,56 kg CO _{2-eq} ²⁾	-20,41
0,57 P ¹⁾	1,15 kg CO _{2-eq} ²⁾	-0,66
	SUMME	-21,07

Die Gutschrift, basierend auf der Vermeidung von Handelsdünger, beträgt 21 kg CO_{2-eq}/t Biomüll. Für den Restmüll wird ein Anteil von 90 % und somit 18,96 kg CO_{2-eq}/t angenommen.

Bei der Aufbringung von Stickstoff-Handelsdünger entstehen N₂O-Emissionen, welche durch die Verwendung von Gärrest substituiert werden. Es wird angenommen, dass 1,25 % des eingebrachten verfügbaren Stickstoffs (N) substituiert werden [31, S. 45]. Die Berechnung der vermiedenen Lachgasemissionen sowie die Annahme aus der Literatur ist in Tabelle 27 angeführt.

Tabelle 27: Vermeidung von Lachgasemissionen durch die Substitution von Stickstoff-Handelsdüngeraufbringung [31, S. 45]¹⁾, [67, S. 223, Table 2.14]²⁾

Düngewirksame Menge an Stickstoff (N) in kg/t Abfall	N ₂ O-Emissionen Substitution von 1,25 % in kg/t Abfall	Äquivalenzfaktor GWP 100 für N ₂ O	Gutschrift in kg CO ₂ -eq/t Abfall
2,7 ¹⁾	0,034 kg N ₂ O/t	298 ²⁾	-10,06

Die Vermeidung von Lachgasemissionen durch die Substitution von Handelsdünger ergibt eine Gutschrift von rund 10 kg CO₂-eq/t Bioabfall bzw. rund 9 kg CO₂-eq/t Restmüll (90 %-Anteil).

Die Zusammenfassung der drei Systemelemente ergibt die folgenden Gesamtbilanzen für die Vergärung von Restmüll (vgl. Tabelle 28) und Biomüll (vgl. Tabelle 29) aus den Supermärkten.

Betreffend der Bilanzierung der Vergärung sei vorausgeschickt, dass es sich um eine Grobbilanz handelt, die auf bestimmten Annahmen beruht. Strom wird abzüglich des Eigenverbrauchs der Biogasanlage ins Stromnetz eingespeist. Wärme wird abzüglich des Wärmeeigenverbrauchs zu 100 % an externe Verbraucher abgegeben.

Tabelle 28: Gesamtbilanz für die Behandlung von einer Tonne Restmüll aus Supermärkten in einer Biogasanlage [65, S. 39]¹⁾, [65, S. 40]²⁾, [31, S. 22]³⁾, [31, S. 24]⁴⁾, [31, S. 41]⁵⁾, [68]⁶⁾, [69]⁷⁾, [67, S. 223, Table 2.14]⁸⁾

	Energieverbrauch, -gewinn bzw. Emission	Emissionsfaktor bzw. Äquivalenzfaktor GWP 100	CO ₂ - Äquivalente in kg/t Restmüll
1. Materialaufbereitung			
Dieselmotorkraftstoff	0,99 l Diesel ¹⁾	2,765 kg CO _{2-eq} /l ⁶⁾	2,74
Elektrische Energie	3,75 kWh Strom ²⁾	0,274 kg CO _{2-eq} /kWh ⁶⁾	1,03
Emissionen durch die Verbrennung der im Restmüll enthaltenen Kunststoffe	-	-	147,72
2. Prozess			
Strom	70 kWh ³⁾	0,274 kg CO _{2-eq} /kWh ⁶⁾	17,26 *
Wärme (Fermenter)	90 kWh ³⁾	0,213 kg CO _{2-eq} /kWh ⁷⁾	17,25 *
Wärme (Hygienisierung)	50 kWh ⁴⁾	0,213 kg CO _{2-eq} /kWh ⁷⁾	9,59 *
3. Erzeugnis			
Strom	263,00 kWh	0,274 kg CO _{2-eq} /kWh ⁶⁾	-72,06
Wärme	338,14 kWh	0,213 CO _{2-eq} /kWh ⁷⁾	-72,02
Methanverlust im Gärrestlager	1,083 kg	25 ⁸⁾	27,06
Methanschlupf im BHKW	0,541 kg	25 ⁸⁾	13,53
CH ₄ -Emissionen durch die Aufbringung von unsepariertem Gärrest	0,007 kg ⁵⁾	25 ⁸⁾	0,158 *
N ₂ O-Emissionen durch die Aufbringung von unsepariertem Gärrest	0,085 kg ⁵⁾	298 ⁸⁾	22,80 *
Kohlenstofffixierung	-	-	-4,95 *
Mineraldüngereinsparung	-	-	-18,96 *
Vermeidung von Lachgas bei der Aufbringung von N- Handelsdünger	0,034 kg	298 ⁸⁾	-9,05 *
EMISSION (Summe der Emissionen aus der Materialaufbereitung, dem Prozess, dem Methanverlust, Methanschlupf aus dem Erzeugnis sowie Emissionen durch die Aufbringung von unsepariertem Gärrest sowie der Gutschriften aus dem Strom und der Wärme des Erzeugnisses, der Kohlenstofffixierung, Mineraldüngereinsparung und Vermeidung von Lachgas bei der Aufbringung von N-Handelsdünger.)			82,09

* unter Berücksichtigung des 90 %-Anteils, welcher ausgehend vom Inputstrom ab dem Prozess der Vergärung angenommen wird.

Die Grobbilanz der anaeroben Behandlung von Restmüll aus Supermärkten ergibt eine Emission von rund 80 kg CO_{2-eq}/t Restmüll. Hingegen ergibt die Gesamtbilanz des Biomülls aus Supermärkten eine Gutschrift von rund 20 kg CO_{2-eq}/t Biomüll. Die CO₂-Emission der Vergärung des Restmülls kommen zu einem großen Teil aufgrund den Emissionen, verursacht durch die Verbrennung des Kunststoffanteils (10 Masse-%) im Restmüll-Input, zustande.

Tabelle 29: Gesamtbilanz für die Behandlung von einer Tonne Biomüll aus Supermärkten in einer Biogasanlage [65, S. 39]¹⁾, [65, S. 40]²⁾, [31, S. 22]³⁾, [31, S. 24]⁴⁾, [31, S. 41]⁵⁾, [68]⁶⁾, [69]⁷⁾, [67, S. 223, Table 2.14]⁸⁾

	Energieverbrauch, -gewinn bzw. Emission	Emissionsfaktor bzw. Äquivalenzfaktor GWP 100	CO ₂ - Äquivalente in kg/t Biomüll
1. Materialaufbereitung			
Dieselmotorkraftstoff	0,99 l Diesel ¹⁾	2,765 kg CO _{2-eq} /l ⁶⁾	2,74
Elektrische Energie	3,75 kWh Strom ²⁾	0,274 kg CO _{2-eq} /kWh ⁶⁾	1,03
2. Prozess			
Strom	70 kWh ³⁾	0,274 kg CO _{2-eq} /kWh ⁶⁾	19,18
Wärme (Fermenter)	90 kWh ³⁾	0,213 kg CO _{2-eq} /kWh ⁷⁾	19,17
Wärme (Hygienisierung)	50 kWh ⁴⁾	0,213 kg CO _{2-eq} /kWh ⁷⁾	10,65
3. Erzeugnis			
Strom	165,20 kWh	0,274 kg CO _{2-eq} /kWh ⁶⁾	-45,26
Wärme	212,40 kWh	0,213 kg CO _{2-eq} /kWh ⁷⁾	-45,24
Methanverlust im Gärrestlager	0,680 kg	25 ⁸⁾	17,00
Methanschlupf im BHKW	0,340 kg	25 ⁸⁾	8,50
CH ₄ -Emissionen durch die Aufbringung von unsepariertem Gärrest	0,007 kg ⁵⁾	25 ⁸⁾	0,175
N ₂ O-Emissionen durch die Aufbringung von unsepariertem Gärrest	0,085 kg ⁵⁾	298 ⁸⁾	25,33
Kohlenstofffixierung	-	-	-5,5
Mineraldüngereinsparung	-	-	-21,1
Vermeidung von Lachgas bei der Aufbringung von N- Handelsdünger	0,034 kg	298 ⁸⁾	-10,06
GUTSCHRIFT (Summe der Emissionen aus der Materialaufbereitung, dem Prozess, dem Methanverlust, Methanschlupf aus dem Erzeugnis sowie Emissionen durch die Aufbringung von unsepariertem Gärrest sowie der Gutschriften aus dem Strom und der Wärme des Erzeugnisses, der Kohlenstofffixierung, Mineraldüngereinsparung und Vermeidung von Lachgas bei der Aufbringung von N-Handelsdünger.)			-23,36

6.3 Müllverbrennungsanlage

Müllverbrennungsanlagen haben unterschiedliche Verbrennungstechnologien. Vom Heizwert des Abfalls und der Ausgestaltung des energieerzeugenden Anlagenteils der Müllverbrennungsanlage sind die Kilowattstunden Strom bzw. die Auskopplung der Wärmemenge abhängig. Die Wärme der Verbrennung wird normalerweise über einen Dampfturbinenkreislauf zur Stromerzeugung genutzt und zur Wärmenutzung als Prozessdampf, Heizdampf, Heißwasser oder Fernwärme verwendet. Der nutzbare Bereich der Brutto-Wärmeleistung einer Müllverbrennungsanlage wird durch die Auslegung des Abhitzekeessels bestimmt. Der Mülldurchsatz ist durch die Auslegung des Rostes mit seiner thermischen und mechanischen Belastbarkeit vorgegeben. [70, S. 2 f.] Durch die thermische

Leistung, den Heizwert des Substrats und den Durchsatz wird die Kesselauslegung beeinflusst, die in einem Feuerungsleistungsdiagramm dargestellt wird [22, S. 310 f.].

Die Strom- und Wärmeproduktion einer Müllverbrennungsanlage berechnet sich aus dem Heizwert und dem Strom- bzw. Wärmeproduktionswirkungsgrad. Bei den Abfällen mit geringer Trockensubstanz muss der große Wassergehalt zuerst verdampft werden. Anschließend erfolgen die eigentliche Verbrennung und die Energieabgabe. Somit ist die verfügbare Energie (H_u feucht) wesentlich kleiner als bei der Vergärung. Die benötigte Verdampfungsenergie stammt von den energiereichen Fraktionen des Abfalls [70, S. 6].

Als Modellanlage für die Berechnungen wird eine Rostfeuerungsanlage mit einer Kraft-Wärmekopplung mit einem durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad von 20 % und einem durchschnittlichen thermischen Wirkungsgrad von 40 % gewählt [64, S. 13]. Diese Werte werden, bezogen auf die eingebrachte Brennstoffwärmeleistung jeweils nach Abzug des Eigenverbrauchs, angesetzt. Für eine selbstgängige Verbrennung (ohne Stützfeuerung) ist auf Basis des Abfalldreiecks nach Tanner ein Mindestheizwert von ≥ 5.000 kJ/kg erforderlich [22, S. 304]. Weiters wird auf Basis von Literaturwerten angenommen, dass bei einem Wassergehalt im Abfall von rund 88 % der Energieaufwand für die Wasserverdampfung gleich hoch wie der untere Brennwert ist [70, S. 6]. Diese Annahme führt dazu, dass beim ggst. Szenario „Biomüll“ die Verbrennung theoretisch keine Energie erzeugt.

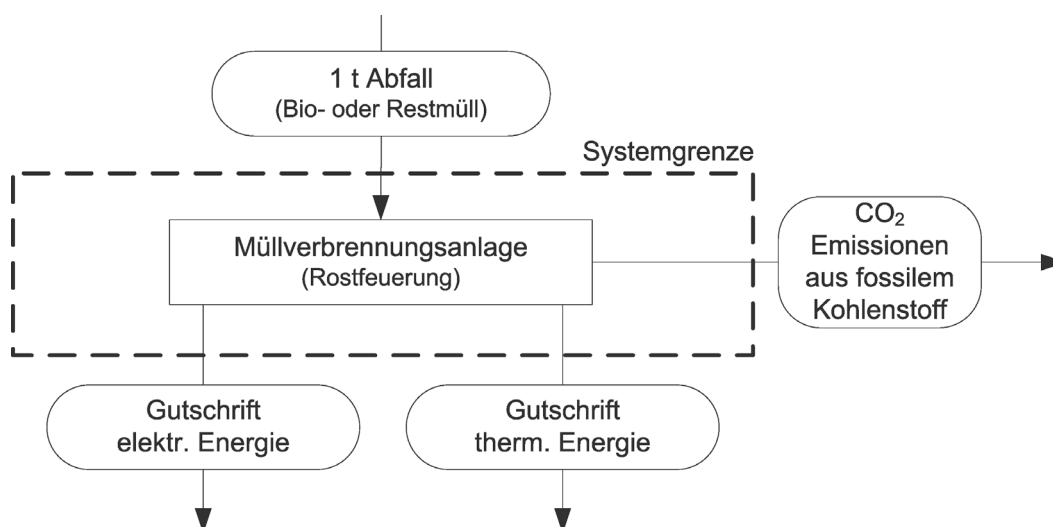


Abbildung 23: Referenzsystem Müllverbrennungsanlage

Anschließend wird die Bilanzierung der Treibhausgase für die drei Systemelemente der Müllverbrennung zuerst separat und dann die Gesamtbilanz tabellarisch angeführt. Eine Gutschrift ergibt sich durch die Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie zur Abgabe an Dritte. Als CO_2 -Emissionen aus der MVA fallen die fossilen Anteile im Abfall ins Gewicht.

Materialaufbereitung vor dem Prozess der Müllverbrennung

Dieses Systemelement beinhaltet keine Werte, da keine für die Grobbilanzierung relevante Materialaufbereitung bei der Müllverbrennungsanlage durchgeführt wird.

Prozess der Müllverbrennung

Basierend auf dem analysierten biogenen Kohlenstoffanteil wird der fossile Kohlenstoffanteil berechnet und anschließend die Summe der CO₂-Emissionen gebildet (vgl. Tabelle 30).

Tabelle 30: Berechnung der CO₂-Emissionen aus der Verbrennung des fossilen Anteils des Rest- bzw. Biomülls aus den Supermärkten

fossiler Kohlenstoffgehalt pro t gesammelten Abfall	Emissionen in kg CO _{2-eq} /t Abfall**
8,15 kg (Biomüll)*	29,9
26,02 kg (Restmüll)*	95,4

* basierend auf den Berechnungen der Tabelle XII im Anhang

** berechnet mit dem Faktor 3,67

Auf Basis des fossilen Kohlenstoffgehalts ergeben sich Emissionen von rund 30 kg CO_{2-eq}/t Biomüll und rund 95 kg CO_{2-eq}/t Restmüll.

Einsatz der Erzeugnisse

Bei wärmegeführter Kraft-Wärme-Kopplung (d.h. bei voller Nutzung der Abwärme) ist ein theoretischer Gesamtwirkungsgrad von 80 % möglich [72, S. 54]. In der Bilanzierung wird mit 40 % Nutzwärmeabgabe und 20 % Abgabe elektrischer Energie bezogen auf die zugeführte Energie und nach Abzug des Eigenenergiebedarfs gerechnet. Diese CO₂-Äquivalente bedeuten eine Gutschrift, da hierdurch Emissionen für die herkömmliche Energieproduktion vermieden werden. Im Fall des Biomülls mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von 87,05 % sowie einem unteren Heizwert von 590 kJ/kg OS ist keine selbstgängige Verbrennung möglich. Der Energieaufwand für die Stützfeuerung wird mit dem Heizwert gleichgesetzt, wodurch sich keine abzugebende Energie ergibt. Die berechneten Energieinhalte sowie die damit verbundenen Gutschriften werden in Tabelle 31 verdeutlicht.

Tabelle 31: Berechnung der Gutschriften aus der Nutzung der Wärme und der elektrischen Energie bei der Verbrennung von Biomüll und Restmüll aus Supermärkten [68]¹⁾, [69]²⁾

Energieinhalt	Emissionsfaktor	Gutschrift in kg CO _{2-eq} /t Abfall
590 MJ/t OS Biomüll [Mittelwert aus Laboranalytik – siehe Anhang Tabelle VII]		
0 kWh/t Strom u. Wärme (Annahme: Energieaufwand für die Stützfeuerung aufgrund des hohen Wassergehalts entspricht dem Heizwert des Biomülls)	-	0
BIOMÜLL	SUMME	0
5450 MJ/t OS Restmüll [Mittelwert aus Laboranalytik – siehe Anhang Tabelle VII]		
302,78 kWh/t Strom (bei 20 % elektrischen Wirkungsgrad)	0,274 kg CO _{2-eq} /kWh ¹⁾	-82,96
605,56 kWh/t Wärme (bei 40 % thermischen Wirkungsgrad)	0,213 kg CO _{2-eq} /kWh ²⁾	-128,98
RESTMÜLL	SUMME	-211,94

Mit der getroffenen Annahme für die Verbrennung von Biomüll wird keine CO₂-Gutschrift in die Grobbilanz eingerechnet. Für den Restmüll ergibt sich mit den angenommenen Wirkungsgraden eine Gutschrift von 211,94 kg CO_{2-eq}/t.

Die Zusammenfassung der drei Systemelemente ergibt die folgenden Gesamtbilanzen für die Verbrennung von Restmüll (vgl. Tabelle 32) und Biomüll (vgl. Tabelle 33) aus den Supermärkten.

Tabelle 32: Gesamtbilanz für die Behandlung von einer Tonne Restmüll aus Supermärkten in einer Müllverbrennungsanlage [68]¹⁾, [69]²⁾

	Energieverbrauch, -gewinn bzw. <i>Emission</i>	Emissionsfaktor bzw. <i>Äquivalenzfaktor</i> <i>GWP 100</i>	CO ₂ - Äquivalente in kg/t Restmüll
1. Materialaufbereitung			-
2. Prozess			
CO ₂ -Emission durch die Verbrennung von fossilen Anteilen im Input	-	-	95,40
3. Erzeugnis			
Strom	302,78 kWh/t	0,274 kg CO _{2-eq} /kWh ¹⁾	-82,96
Wärme	605,56 kWh/t	0,213 kg CO _{2-eq} /kWh ²⁾	-128,98
GUTSCHRIFT (Summe der Emissionen aus dem Prozess abzüglich der Gutschriften aus dem Strom- und Wärmeerzeugnis)			-116,54

Die thermische Behandlung von Restmüll aus den Handelsketten ergibt in der Grobbilanz eine Gutschrift von rund 120 kg CO₂-eq/t Restmüll. Eine Emission von rund 30 kg CO₂-eq/t Biomüll ergibt hingegen die Verbrennung von Biomüll aus dem Handelskettenbereich. Aufgrund der hohen Feuchte des Biomülls ist keine Energieabgabe möglich, sondern Energieaufwand notwendig um das im Inputmaterial enthaltene Wasser zu verdampfen. Der Verbrennung des Restmülls aus dem Handelskettenbereich kommt der im Gegensatz zum Bioabfall geringere Wassergehalt und höhere Kunststoffanteil zu Gute.

Tabelle 33: Gesamtbilanz für die Behandlung von einer Tonne Biomüll aus Supermärkten in einer Müllverbrennungsanlage

	Energieverbrauch, -gewinn bzw. Emission	Emissionsfaktor bzw. Äquivalenzfaktor GWP 100	CO ₂ - Äquivalente in kg/t Biomüll
1. Materialaufbereitung			-
2. Prozess			
CO ₂ -Emission durch die Verbrennung von fossilen Anteilen im Input	-	-	29,90
3. Erzeugnis			
Strom	0 kWh/t	-	0
Wärme	0 kWh/t	-	0
EMISSION (Summe der Emissionen aus dem Prozess abzüglich der Gutschriften aus dem Strom- und Wärmeerzeugnis)			29,90

7 Abschließende Interpretation der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zu Beginn die Ergebnisse der Sortierung sowie der Laboranalysen zusammengefasst und darauf aufbauend die Behandlungsmöglichkeiten mit den rechtlichen Rahmenbedingungen in Beziehung gesetzt. Anschließend wird versucht die Treibhausgasbilanzen für die aerobe, anaerobe und thermische Verwertung des Rest- und Biomülls aus den Supermärkten zu vergleichen. Eine Diskussion betreffend der Schlüsselnummernzuordnung des Restmülls aus Supermärkten bildet den Abschluss dieses Kapitels.

7.1 Sortierung

Das Hauptaugenmerk bei der Durchführung der Untersuchungen gilt der Ermittlung des biogenen Anteils.

Die Menge am biogenen Anteil in der Restmüll- sowie in der Biomülltonne ist aufgrund unterschiedlicher Trennsysteme (Vorhandensein von mehreren verschiedenen Sammelbehältern) sehr marktspezifisch. Anschließend werden die biogenen Anteile anhand der Abfallzusammensetzung der untersuchten Märkte angeführt.

Den größten Anteil an Organik in den Restmülltonnen stellen die Küchenabfälle (Obst- und Gemüseschalen) und Speisereste (Essensreste, Fleisch, verdorbene und überlagerte Lebensmittel) dar. Gartenabfälle finden sich nur bei zwei Stichproben in größeren Mengen: zum einen großhandelsbedingt (größere Mengen an nicht mehr verkaufsfähigen Schnittblumen und Topfpflanzen), zum anderen angebotsbedingt. Die biogene Feinfraktion (kleinteilige Organik wie Schalen, Laub, Brotbrösel, Kehricht, Kaffeesatz) haben einen geringfügigen Anteil am biogenen Gesamtaufkommen. Märkte ohne Vorhandensein bzw. ohne Verwendung der Biomülltonnen haben den mit Abstand größten Anteil an Organik in den Restmülltonnen.

Die Biomülltonnen bestehen nur zu rund 70 Masse-% aus der Fraktion „rein Biogenes“. Die Fraktion „Biogenes verpackt“ nimmt einen durchschnittlichen Anteil von rund 23 Masse-% ein. Daher bleiben für Altstoffe und den Sortierrest in Biomülltonnen weniger als 7 Masse-%. Die Biomülltonnen der Supermärkten enthalten somit nicht nur organische Anteile sondern aufgrund der Fehlwürfe auch nicht-biogene Anteile.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in den Restmülltonnen aus dem Handelskettenbereich ein hoher Anteil an biogenem Material mit einem vergleichsweise geringen Altstoffanteil (z.B. Papier, Kunststofffolien, Glas, Metall) vorzufinden ist. Die biogenen Fraktionen dominieren mit über 50 % in der Restmülltonne. Hingegen enthalten die Biomülltonnen nicht nur „rein Biogenes“ sondern auch Verpackungen und Altstoffe. Anzumerken ist auch, dass die Biomülltonnen vereinzelt nicht in Anspruch genommen wurden.

Auf Basis der Sortierungen kann festgehalten werden, dass es keine gravierenden Unterschiede in der Zusammensetzung der Abfälle aufgrund der Saison und der untersuchten Handelsketten gab.

7.2 Laboranalysen

Die Laboranalysen sollen Aufschluss über die chemisch-physikalischen Charakteristiken der Bio- und Restmülltonnen aus Supermärkten geben, insbesondere Aussagen über den enthaltenen biogenen Anteil liefern. Für die Wahl der Behandlung im Sinne der gesetzlichen Vorschriften ist die Einhaltung von chemischen und physikalischen Parametern relevant.

Aus den Ergebnissen der Analytik ist erkennbar, dass der Biomüll und auch der Restmüll aus dem Handelskettenbereich (im Vergleich zum kommunalen Restmüll) sehr feucht und energiearm ist.

7.2.1 Behandlungsmöglichkeiten auf Basis der Laboranalysen

Die Abfallhierarchie sieht nach der Abfallvermeidung eine (stoffliche) Verwertung vor. Aufgrund des hohen biogenen Anteil des Rest- und Biomülls aus dem Handelskettenbereich, wäre nach einer Störstoffabtrennung eine Kompostierung andenkbar. Der hohe Feuchtegehalt (bis 88,5 %) insbesondere beim Biomüll bedarf einer gezielten Roffeführung zur Geruchsreduktion, die aufwendiger und energieintensiver als bei Grüngut ist. Kommunale Bioabfälle in Deutschland weisen im Vergleich nur eine Feuchte zwischen 52-80 % auf [22, S. 561].

Eine Verwertung des gegenständlichen Abfalls in einer Müllverbrennungsanlage ist primär heizwertabhängig. Restmüll aus Haushalten weist laut Literatur Werte zwischen 9.000 und 11.000 kJ/kg OS auf [64, S. 12]. Der analysierte Heizwert liegt bei den Proben der „Restmülltonnen gesamt“ bei 4.100 bis 6.800 kJ/kg OS, bei den „Biomülltonnen gesamt“ geht der Heizwert gegen Null. Für eine effiziente Verbrennung enthält der untersuchte Abfall einen zu geringen Heizwert bzw. einen zu hohen Wassergehalt. Die Heizwerte üblicher Brennstoffe liegen meist ca. 10 % unter ihren Brennwerten. Dieser Zusammenhang ist bei den untersuchten Abfällen nicht gegeben.

Strukturarme und wasserreiche Abfälle können in Biogasanlagen anteilig stofflich und energetisch verwertet werden. Durch eine mechanische Vorbehandlung der Abfälle ist eine Vergärung in Biogasanlagen prinzipiell möglich. Die anaerobe Vergärung für halb feste biogene Abfälle hat sich in der Praxis bewährt, da biogene Abfälle mit Wassergehalten von über 70 % in klassischen Kompostierungen meist zu Geruchsproblemen und Methanbildung führen. Hingegen werden bei der Vergärung in geschlossenen Behältern Geruchs- und Schadstoffemissionen über die Luft bei entsprechender Biogasverwertung vermieden [21, S. 1]. Bei der Vergärung von festen oder flüssigen organischen Stoffen entstehen ein stabilisierter Reststoff und ein Gasmischung aus Methan und Kohlendioxid. Die im organischen Material enthaltene Energie wird auf das Biogas übertragen, welches zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie in Form von Biomethan als Treibstoff genutzt werden kann. Die Gärreste enthalten verwertbare Nährstoffe und können als Sekundärrohstoffdünger eingesetzt werden [22, S. 232].

Eine Deponierung des untersuchten Materials ist auf Basis der Vorgaben der Deponieverordnung (TOC-Kriterium, Glühverlust, pH-Wert und Brennwert) nicht möglich. Eine Ablagerung von Abfällen, deren Anteil an organischem Kohlenstoff (TOC) im Feststoff mehr als 5 Masse-% beträgt, ist verboten [11, § 7, Z. 7]. So beträgt der TOC im Feststoff bei den Restmüllproben als auch bei den Biomüllproben jeweils über 45 Masse-% (zwischen 45,5 und 49 Masse-%). Der TOC im Eluat ist mit 2.500 mg/kg TS für die Annahme von Abfällen auf Massenabfalldeponien begrenzt [11, Anhang 1, Tabelle 10]. Die o.g. Proben zeigten einen TOC im Eluat über 84.000 mg/kg TS. Bei einem Glühverlust von nicht größer als 8 Masse-% ist eine Ablagerung auf einer Massenabfalldeponie möglich [11, Anhang 1, Tabelle 9]. Untersuchungen lieferten Glühverluste zwischen 87 und 95 Masse-%. Der pH-Wert-Bereich für die Annahme von Abfällen auf der Massenabfalldeponie liegt zwischen 6 bis 13 [11, Anhang 1, Tabelle 10] und somit deutlich über den untersuchten pH-Werten der Proben, die zwischen 3,3 und 4,8 liegen. Für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle ist auf einer Massenabfalldeponie ein Brennwert von 6.600 kJ/kg TM einzuhalten [11, Anhang 1, Tabelle 9]. Die analysierten Proben zählen nicht zu mechanisch-biologisch behandelten Abfällen gem. DVO 2008, § 7, Z 7, lit. f. Denn Brennwerte liegen über 18.000 kJ/kg TS.

7.3 Treibhausgasbilanz – Vergleich der Szenarien

Für die Behandlung von Abfällen mit hohen biogenen Anteilen, wie es der Rest- und Biomüll aus Supermärkten darstellt, werden drei verschiedene Verfahrensalternativen betrachtet. Die Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Führung von Nährstoffen in biologischen Kreisläufen und ihrer energetischen Verwertung.

Die damit verbundenen ökologischen Effekte der Abfallbehandlung liefern unterschiedliche Beiträge zum Klimaschutz. Eine grobe Treibhausgasbilanz bezogen auf CO₂-Äquivalente ist Gegenstand dieser Arbeit. Weitere ökologische Aspekte wie beispielsweise die Bodenfruchtbarkeit, die Biodiversität und der Schutz gegen die Bodenerosion werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Grundsätzlich veranschaulicht die in Kapitel 6 durchgeführte Grobbilanzierung, dass alle drei Verfahren auf unterschiedliche Weise zum Klimaschutz beitragen, indem sie entweder CO₂-Emissionen aus konventionellen Prozessen der Energieproduktion vermeiden, bzw. Kohlenstoff im Boden binden.

In Tabelle 34 werden die Ergebnisse der Treibhausgasbilanz zusammenfassend dargestellt und in weiterer Folge für Restmüll und Biomüll aus Handelsketten getrennt von einander diskutiert.

Tabelle 34: Zusammenfassung der Treibhausgasbilanz (gerundet)

	Kompostierung	Vergärung	Müllverbrennung
	[kg CO ₂ -eq/ t Abfall-Inputmaterial]	[kg CO ₂ -eq/ t Abfall-Inputmaterial]	[kg CO ₂ -eq/ t Abfall-Inputmaterial]
Restmüll aus Supermärkten	147	82	-117
Biomüll aus Supermärkten	17	-23	30

Emissionen: positive Werte

Gutschriften: negative Werte (-)

- Die Variante der Müllverbrennung des Restmülls aus Supermärkten erzielt mit rund 117 kg CO₂-eq/t Inputmaterial die größte CO₂-Gutschrift der drei Szenarien. Bei der Verbrennung ist anzumerken, dass die festen Rückstände, wie Aschen und Schlacken, im Vergleich zu den Rückständen aus der Kompostierung und Vergärung in der Landwirtschaft nicht eingesetzt werden können. Somit gehen wertvolle Pflanzennährstoffe verloren und müssen durch mineralische und chemische Düngemittel kompensiert werden. Bei dieser Verfahrensvariante wurde eine Monoverbrennung angenommen, in der Praxis wird meist eine Mitverbrennung mit dem Restmüll aus Haushalten durchgeführt. Somit gibt es keine Erfahrungswerte bzw. belastbaren Literaturwerte für die Monoverbrennung eines sehr feuchten und energiearmen Mülls. Zudem konnte auch die Frage nicht geklärt werden, ob eine selbstgängige Verbrennung von Abfällen mit Heizwerten von rund 5.000 kJ/kg den gleichen Wirkungsgrad erzielt wie kommunaler Restmüll mit Heizwerten von rund 10.000 kJ/kg Abfall. Es kann daher kein abschließender Vergleich der Behandlungsmöglichkeiten auf Basis der Treibhausgasbilanz erfolgen.
- Aus dem verfahrensbedingt niedrigen Gesamtenergienutzungsgrad der Variante Vergärung sowie aus dem verhältnismäßig großen Anteil an Emissionen verursacht durch die Verbrennung des Kunststoffanteils (10 % vom Restmüll) resultiert für den Abfallinput Restmüll aus Supermärkten eine CO₂-Emission von rund 82 kg CO₂-eq/t. Im Vergleich zur hier angenommenen Szenario der Kompostierung sind die Emissionen bei dieser Vergärungsvariante geringer, da beim Prozess der Vergärung Energie in Form von Wärme und Strom gewonnen werden kann, während bei der Kompostierung der im Abfall enthaltene Energieinhalt ungenutzt bleibt.
- Mit einer CO₂-Emission von rund 147 kg CO₂-eq/t Restmüll-Inputmaterial verursacht die Variante Kompostierung, im Hinblick auf die Klimarelevanz, den höchsten CO₂-Ausstoß.
- Beim Biomüll aus Supermärkten erzielt die Verfahrensvariante Vergärung mit rund 23 kg CO₂-eq/t Inputmaterial die größte CO₂-Gutschrift. Bei der anaeroben Behandlung bauen Methanbakterien die organische Substanz im wässrigen Substrat der Abfälle ab und es

entsteht Biogas, welches energetisch genutzt werden kann. Aus Biogas können sowohl Strom und Wärme als auch Treibstoff erzeugt werden.

- Die Kompostierung des Biomülls aus Supermärkten ergibt eine CO₂-Emission von rund 17 kg CO_{2-eq}/t Inputmaterial. Basierend auf den zitierten Quellen, die für die Grobbilanzierung der Behandlungsvarianten herangezogen worden sind, hat die Kompostierung hinsichtlich der Kohlenstoffbindung im Boden einen Vorteil gegenüber der Vergärung mit anschließender Aufbringung auf landwirtschaftlichen Flächen des Gärrückstandes.
- Beim theoretischen Szenario der Verbrennung von Biomüll aus Supermärkten wird eine CO₂-Emission von rund 30 kg CO_{2-eq}/t Inputmaterial errechnet. Im Vergleich zur Kompostierung und Vergärung ist eine stoffliche Nutzung der Abfälle beispielsweise in Form der Kohlenstoffbindung im Boden nicht möglich. Anders als bei der Vergärung muss in Müllverbrennungsanlagen der Wassergehalt erst verdampft werden, bevor die Abfälle verbrennen und dabei Energie liefern. Aus der Literatur [75, S. 4] ist bekannt, dass bei der Monoverbrennung von Abfällen mit einem Wassergehalt von 88 % keine Energie gewonnen werden kann. Eine thermische Behandlung des Biomülls aus Handelsketten ist aufgrund des niedrigen Heizwertes nicht effizient.

Anhand der Treibhausgasbilanz (Grobbilanzierung) wurde versucht einen Vergleich der drei Verwertungsmöglichkeiten (aerob, anaerob und thermisch) zu erstellen, um der Frage der effizientesten Nutzung der gegenständlichen Abfälle (Rest- und Biomüll aus Supermärkten) nachzugehen. Dazu sei folgendes angemerkt:

- Die Berechnung der Treibhausgasbilanzen basieren auf Daten aus verschiedenen Quellen jeweils mit unterschiedlichen Annahmen und Qualitäten. Die Untersuchung der Sensitivität der Systeme gegenüber Variationen der Prozesskennzahlen (z.B. offene Kompostierung, geschlossene Kompostierung, Nass- und Trockenvergärung, Drehrohr und Rostfeuerung) und der zugrunde gelegten Zusammensetzung des Abfalls (Bestimmung der Nährstoffe im Input sowie im Kompost und Gärrückstand) bleiben weiteren Betrachtungen vorbehalten und sind somit nicht mehr Teil dieser Arbeit.

Um eine abfallwirtschaftliche Entscheidung betreffend der Verwertung der gegenständlichen Abfälle treffen zu können ist nicht nur die Treibhausgasbilanz ausschlaggebend. Auch andere Randbedingungen gilt es zu beachten, die im Folgenden kurz angeführt werden, jedoch nicht tiefer diskutiert werden:

- Die Arbeit handelt von Abfällen, die einen sehr großen Anteil an Fehlwürfen aufweisen. Daraus stellt sich die Frage aus welchem Grund Fehlwürfe zustande kommen. Wäre ein Minimieren der Fehlwürfe aus ökonomischer Sicht effizient umsetzbar? Steht der Entsorgungspreis für die Mehrmenge an Restmüll in Relation zum personellen Aufwand, der nötig wäre um die Fehlwurfrate zu minimieren? Gibt es somit einen wirtschaftlichen Anreiz für Supermärkte ihre Sammlung/Trennung zu verbessern? Ist das Gebührensystem individuell an das tatsächliche Mengenaufkommen angepasst, oder gibt es eine behälterbezogene (volumenbezogene) Abrechnung?

- Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurden die Abfälle aus dem Handelskettenbereich gemeinsam mit Abfällen aus Haushalten abgeholt und entsorgt. Folgende Fragen ergeben sich aus dieser Tatsache heraus: Ist eine getrennte Sammlung abseits der kommunalen Entsorgung möglich? Beispielsweise ist es effizient in Wien im ersten Bezirk eigene Sammelfahrzeuge für die Entsorgung der Bio- und Restabfälle aus Supermärkten einzusetzen? Wie sieht in diesem Falle die verkehrstechnische Situation aus (z.B.: Zeitaufwand für die Anfahrten zu den Standorten)?
- Für den Betrieb einer Verwertungsanlage ist auch das Vorhandensein eines Marktes für die erzeugten Produkte ausschlaggebend. Im Fall der Kompostierung stellt sich die Frage, ob Kompost in diesen Mengen benötigt wird? Bei der Vergärung der biogenen Abfälle und der damit einhergehenden Produktion von Methan stellt sich die Frage der Abnehmer von Biogas.
- Sind entsprechende Anlagenkapazitäten bereits vorhanden oder müssen diese erst geschaffen werden? Wenn ja, wo und in welcher Entfernung vom Anfallsort des Abfalls?

8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde jener Teilstrom des Rest- und Biomülls, welcher im Handelskettenbereich anfällt, stofflich und chemisch-physikalisch charakterisiert. Hauptaugenmerk wurde dabei auf den biogenen Anteil sowie auf die Prüfung möglicher alternativer Verwertungswege gelegt. Die Untersuchung der Situation erfolgte anhand einer repräsentativen Anzahl an Supermärkten in Wien sowie im direkten Einzugsgebiet von Wien in den Jahren 2009 und 2010.

Hintergrund dieser Untersuchung ist, dass in Österreich haumüllähnliche Gewerbeabfälle je nach gesetzlicher Lage bundeslandspezifisch entweder gemeinsam mit der kommunalen Systemmüllabfuhr oder getrennt behandelt werden. Tatsache ist, dass aber kaum Datenmaterial zur umfassenden stofflichen und chemisch-physikalischen Charakterisierung von Restmüll und Biomüll einzelner Branchen existiert, wodurch wiederum eine entsprechende Argumentationsbasis in Bezug auf den Andienungszwang und eine nachfolgende effiziente Verwertung bzw. Behandlung fehlt.

Beginnend mit der Abfallrahmenrichtlinie des europäischen Parlaments werden im Kapitel 2 die rechtlichen Rahmenbedingungen betreffend der Abfallwirtschaft in Österreich aufgezeigt. Maßgeblich für Österreich ist das Bundesabfallwirtschaftsgesetz 2002 i.d.g.F. mit den neun Landesabfallwirtschaftsgesetzen, die die Grundlage für das österreichische Abfallrecht bilden. Die österreichische Verordnung über die getrennte Sammlung biogener Abfälle regelt bundesweit, welche biologisch abbaubaren Abfälle getrennt gesammelt werden müssen. In der Abfallverzeichnisverordnung sind das Abfallverzeichnis sowie die Kriterien für die Zuordnung von Abfällen zu Schlüsselnummern geregelt. Der zweite Teil des Kapitels 2 beinhaltet jene Regelwerke, die in der Erstellung der vorliegenden Arbeit von Relevanz sind. Dies sind die ÖNORMEN für die Sortieranalyse von Abfällen und die Probenahmepläne für Abfälle.

Die Grundlagen der anaeroben Behandlung von Abfällen ist Thema von Kapitel 3, wo im Speziellen auf den anaeroben Abbauprozess und die verfahrenstechnischen Prozesse bei der Bioabfallvergärung eingegangen wird. Weiters werden die Co-Vergärung sowie ein Vergleich zwischen Vergärung und Kompostierung dargestellt.

Im Rahmen von Kapitel 4 wird auf die Situation der Abfallentsorgung aus Handelsketten im Untersuchungsgebiet eingegangen, wobei zuerst der Lebensmitteleinzelhandel in Österreich und anschließend fokussiert auf den Großraum Wien anhand von Literaturdaten aufgegriffen wird. Es folgen Daten zu nicht mehr verkehrsfähigen Lebensmitteln und zum Abfallaufkommen im Lebensmitteleinzelhandel. Ein wichtiger rechtlicher Punkt bei der Entsorgung des Bio- und Restmülls aus Supermärkten wird unter dem Punkt „Andienungszwang“ erläutert, wo ersichtlich ist, dass es in Österreich in jedem Bundesland eine andere Definition gibt. Folglich werden Daten des Untersuchungsgebietes zum Sammelsystem und der damit verbundenen Logistik aufgezeigt. Die charakterisierten Abfälle aus dem Lebensmitteleinzelhandel werden in Österreich mengenmäßig nicht gesondert erfasst, somit erfolgt im letzten Abschnitt des Kapitels 4 ein Überblick über das Abfallaufkommen an Restmüll und getrennt gesammelten biogenen Abfälle aus Haushalten

und ähnlichen Einrichtungen sowie dessen derzeitige Behandlungsmöglichkeiten mit den Anlagenkapazitäten in Österreich.

Der zu Beginn des Kapitels 5 abgehandelte Untersuchungsrahmen wird im Anschluss sowohl graphisch als auch tabellarisch ausgewertet. Demzufolge wird auf die Sortieranalyse und die Laboranalytik der beiden Untersuchungskampagnen des Rest- und Biomülls aus dem Lebensmitteleinzelhandel eingegangen.

Im Kapitel 6 wird die Treibhausgasbilanz anhand von drei angenommenen Szenarien (aeroben, anaeroben und thermischen Verwertung des Rest- und Biomülls aus den Supermärkten) ausgeführt. Die Grobbilanzierung basiert auf Literaturdaten, Analyseergebnissen und entsprechend getroffenen Annahmen.

Abschließend werden im Kapitel 7 die Ergebnisse der Sortierung sowie der Laboranalysen zusammengefasst, folglich die Behandlungsmöglichkeiten mit den rechtlichen Rahmenbedingungen in Beziehung gesetzt und versucht Treibhausgasbilanzen für die aerobe, anaerobe und thermische Verwertung des Rest- und Biomülls aus Supermärkten einander gegenüberzustellen.

9 Verzeichnisse

9.1 Literatur

- [1] BGBl. I 2002/102 i.d.F. BGBl. I 2013/103: Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002).
- [2] BGBl. II 2003/570 i.d.F. BGBl. II 2008/498: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über ein Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnisverordnung).
- [3] ÖNORM S 2100: Abfallverzeichnis. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 01.10.2005.
- [4] Laner, D., Brunner, P. H.: Kriterien zur Trennung von Siedlungsabfall aus Industrie und Gewerbe als Voraussetzung zur Zuordnung zu Behandlungsverfahren – KRIGEZ. Graz: Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 19 D Abfall- und Stoffflusswirtschaft (Hrsg.), 2009 – Studie.
- [5] BGBl. II 1992/68 i.d.F. BGBl. II 1994/456: Verordnung des Bundesministers für Umwelt, Jugend und Familie über die getrennte Sammlung biogener Abfälle.
- [6] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011. Wien: BMLFUW, 2011.
- [7] Europäische Union: Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. In: Amtsblatt Nr. L312/3 vom 22.11.2008.
- [8] Europäische Union: Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien. In: Amtsblatt Nr. L182 vom 16.07.1999.
- [9] BGBl. 685/1988 i.d.F. BGBl. I 2013/164: Bundesverfassungsgesetz vom 29. November 1988, mit dem das Bundes-Verfassungsgesetz in der Fassung von 1929 geändert wird (Bundes-Verfassungsgesetz-Novelle 1988).
- [10] BGBl. II 1996/648 i.d.F. BGBl. II 2006/364: Verordnung des Bundesministers für Umwelt, Jugend und Familie über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen und bestimmten Warenresten und die Einrichtung von Sammel- und Verwertungssystemen (VerpackVO 1996).
- [11] BGBl. II 2008/39 i.d.F. BGBl. II 2011/455: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008).

- [12] Österreichisches Parlament (Hrsg.): Erläuterungen zum Gesetzesentwurf zur Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie. Online im WWW unter URL: http://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXIV/ME/ME_00156/fnameorig_184215.html. (letzter Zugriff: 27.10.2012)
- [13] LGBl. 1994/13 i.d.F. LGBl. 2012/49: Gesetz über die Vermeidung und Behandlung von Abfällen und die Einhebung einer hierfür erforderlichen Abgabe im Gebiete des Landes Wien (Wiener Abfallwirtschaftsgesetz – Wr. AWG).
- [14] Magistratsabteilung 48 – Abfallwirtschaft Straßenreinigung und Fuhrpark (Hrsg.): Wiener Abfallwirtschaftskonzept 2007. Wien: Eigenverlag, 2007.
- [15] ÖNORM S 2097-1: Sortieranalyse von Abfällen – Teil 1: Begriffe. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 01.04.2005.
- [16] ÖNORM S 2097-2: Sortieranalyse von Abfällen – Teil 2: Probenahme. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 01.04.2005.
- [17] ÖNORM S 2097-3: Sortieranalyse von Abfällen – Teil 3: Sortierung. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 01.04.2005.
- [18] ÖNORM S 2097-4: Sortieranalyse von Abfällen – Teil 4: Auswertung der Messergebnisse und Analysenbericht. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 01.04.2005
- [19] ÖNORM S 2123-1: Probenahmepläne für Abfälle - Teil 1: Beprobung von Haufen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 01.11.2003.
- [20] ÖNORM S 2123-3: Probenahmepläne für Abfälle - Teil 3: Beprobung fester Abfälle aus Stoffströmen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 01.11.2003.
- [21] Braun, R.: Prinzipien und Systeme von Vergärungsanlagen für biogene Kommunalabfälle. Tulln: IFA Tulln. Online im WWW unter URL: <http://www.wien.gv.at/umweltschutz/abfall/pdf/braun.pdf>. (letzter Zugriff: 22.11.2012).
- [22] Kranert, M., Cord-Landwehr K. (Hrsg.): Einführung in die Abfallwirtschaft. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010. – ISBN 978-3-8351-0060-2
- [23] Bayer. Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Biogashandbuch Bayern – Materialienband, Kapitel 1.1-1.5, Stand Juli 2007, Augsburg.
- [24] Grooterhorst, A.: Mögliche Prozeßentwicklungen bei der Vergärung organischer Materialien im Hinblick auf eine optimale Biogasnutzung – Vergärung 2020 – integriert, fraktal, dynamisch. In: Fachagentur Nachachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, Gölzower Fachgespräche Band 15. Weimar: 2000, S. 68-86.

- [25] Kollmann, U.: Grundlagen der anaeroben Behandlung von Abfällen. Berlin: Technische Universität Berlin, Institut für Technischen Umweltschutz, 1993. - Projektarbeit
- [26] Bilitewski, B., Härdtle, G., Marek, K.: Abfallwirtschaft – Eine Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1991.
- [27] Gosch, A.: Grundlagen und Anwendungsbereich der Anaerobtechnik. In: Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.): Biologische Abfallbehandlung. Witzhausen: M.I.C. Baeza-Verlag, 1993.
- [28] Bayer. Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): Mikrobiologische Prozesse in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Freising-Weihenstephan: 2009.
- [29] Weiland, P.: Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland. In: Fachagentur Nachschende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, Gülzower Fachgespräche Band 15. Weimar: 2000, S. 8-27.
- [30] Koch, M.: Ökologische und ökonomische Bewertung von Co-Vergärungsanlagen und deren Standortwahl. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.
- [31] Lampert, C., Tesar, M. Thaler P.: Klimarelevanz und Energieeffizienz der Verwertung biogener Abfälle (KEVBA). Wien: Umweltbundesamt GmbH, 2011.
- [32] Schneider, R., Quicker, P., Anzer, T., Prechtel, S., Faulstich, M.: Grundlegende Untersuchungen zur effektiven, kostengünstigen Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Biogas. In: Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Biogasanlagen – Anforderungen zur Luftreinhaltung. Augsburg: 2002, S. 25-41.
- [33] Hoppenheidt, K., Hisch, P., Kottmair, A., Nordsieck, H., Swerev, M., Mücke, W.: Gemeinsame Vergärung von Bio- und Gewerbeabfall – Ergebnisse einer wissenschaftlichen Begleituntersuchung. LfU-Fachtagung „Vergärung von Bioabfällen“, 9.12.1998, Wackersdorf.
- [34] Hoppenheidt, K., Hisch, P., Kottmair, A., Nordsieck, H., Mücke, W., Kübler, H., Nimmrichter, R.: Co-Vergärung von Bioabfällen und organischen Gewerbeabfällen – Ergebnisse eines großtechnischen Pilotvorhabens. VDI-Seminar „Biogene Abfälle/Holz/Klärschlamm – Verwertung/Behandlung/Beseitigung“, 13.4-15.4.2000, Bamberg.
- [35] Ibrahim, H. A.: Untersuchungen zu In- und Outputströmen bei der Restabfallvergärung und Vergleich mit der Kompostierung. Paderborn: Universität Paderborn, 1998.

- [36] Hupe, K., Heyer, K.-U., Stegman, R.: Biologische Bioabfallverwertung: Kompostierung kontra Vergärung. Hamburg: IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft. Online im WWW unter URL: <http://www.ifas-hamburg.de/pdf/bioabfal.pdf>. (letzter Zugriff: 22.11.2012).
- [37] Hempel, C.: Corporate Social Responsibility (CSR) und dessen Verbreitung im österreichischen Lebensmitteleinzelhandel. Graz: Eigenverlag Karl-Franzens-Universität Graz, 2011.
- [38] Barth, M., Kreindl, G., Pomberger, R.: Charakterisierung von Abfällen aus dem Handelskettenbereich. In: Lorber, K. E., Adam, J., Aldrian, A., Arnberger, A., Bezama, A., Kreindl, G., Müller, P., Sager, D., Sarc, R., Wruss, K. (Hrsg.): DepoTech 2010. Leoben: Eigenverlag Institut für Nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik, 2010, S. 173-176.
- [39] ACNielsen (Hrsg.): Handel in Österreich – Basisdaten 2011. Wien: Eigenverlag, 2012. Online im WWW unter URL: http://at.nielsen.com/pubs/documents/Nielsen_Universen_OE_Komplett.pdf (letzter Zugriff: 24.09.2013).
- [40] ACNielsen (Hrsg.): Handel in Österreich – Basisdaten 2009. Wien: Eigenverlag, 2010. Online im WWW unter URL: http://at.nielsen.com/site/documents/Nielsen_Jahrbuch_2009.pdf (letzter Zugriff: 24.09.2013).
- [41] Raith, D., Ungericht, B.: Nachhaltigkeit und CSR im österreichischen Lebensmitteleinzelhandel – Endbericht. Graz, Oktober 2011. Online im WWW unter URL: http://csr-st.org/nahaleh/nahaleh_endbericht.pdf (letzter Zugriff: 28.10.2012).
- [42] „die Umweltberatung“ Wien (Hrsg.): Abfallumrechnungstabelle. Wien, Juli 2012. Online im WWW unter URL: http://images.umweltberatung.at/html/abfallumrechnungstabelle_wien.pdf (letzter Zugriff: 29.11.2012).
- [43] LGBl. 1992/89 i.d.F. LGBl. 2009/145: NÖ Abfallwirtschaftsgesetz 1992 (NÖ AWG 1992).
- [44] LGBl. 1994/10 i.d.F. LGBl. 2009/76: Gesetz vom 29. November 1993 über die Vermeidung, Sammlung, Beförderung und Behandlung von Abfällen (Bgl. Abfallwirtschaftsgesetz 1993).
- [45] LGBl. 2004/65 i.d.F. LGBl. 2006/56: Gesetz vom 6. Juli 2004 über eine nachhaltige Abfall und Stoffflusswirtschaft in der Steiermark (Steiermärkisches Abfallwirtschaftsgesetz 2004 – StAWG 2004).
- [46] LGBl. 2004/17 i.d.F. LGBl. 2012/89: Kärntner Abfallwirtschaftsordnung 2004 – K-AWO.

- [47] LGBl. 2009/71 i.d.F. LGBl. 2011/32: Landesgesetz über die Abfallwirtschaft im Land Oberösterreich (Oö. Abfallwirtschaftsgesetz 2009 – OÖ. AWG 2009).
- [48] LGBl. 1999/35 i.d.F. LGBl. 2013/45: Gesetz vom 10. Dezember 1998 über die Vermeidung, Erfassung und Behandlung von Abfällen (Salzburger Abfallwirtschaftsgesetz 1998 – S. AWG).
- [49] LGBl. 2008/3 i.d.F. LGBl. 2011/28: Gesetz vom 21. November 2007, mit dem die Abfallwirtschaft in Tirol geregelt wird (Tiroler Abfallwirtschaftsgesetz).
- [50] LGBl. 2006/1 i.d.F. LGBl. 2006/1: Gesetz über die Vermeidung und Erfassung von Abfällen (Vorarlberger Abfallwirtschaftsgesetz – V-AWG).
- [51] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht 2012. Wien: BMLFUW, 2012.
- [52] DIN 38404-5: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C) - Bestimmung des pH-Wertes (C 5). Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Ausgabe: Jänner 1984
- [53] DIN 38404-5: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C) – Teil 5: Bestimmung des pH-Wertes (C 5). Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Ausgabe: Juli 2009.
- [54] ÖNORM EN 12880: Charakterisierung von Schlämmen – Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehaltes. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 01.12.2000.
- [55] DIN EN 12879: Charakterisierung von Schlämmen – Bestimmung des Glühverlustes der Trockenmasse. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Ausgabe: Februar 2001.
- [56] ÖNORM M 6295: Untersuchung von Klärschlamm – Bestimmung des Glührückstandes und des Glühverlustes. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 01.10.1993.
- [57] DIN 51900-1: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes - Teil 1: Allgemeine Angaben, Grundgeräte, Grundverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Ausgabe: April 2000.

- [58] ÖNORM EN 13137: Charakterisierung von Abfall – Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) in Abfall, Schlämmen und Sedimenten. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 01.12.2001.
- [59] EN 1484: Anleitung zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC). Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Ausgabe: August 1997.
- [60] ASTM D6866-12: Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, DOI: 10.1520/D6866-12, www.astm.org.
- [61] ÖNORM EN 14039: Charakterisierung von Abfällen – Bestimmung des Gehalts an Kohlenwasserstoffen von C₁₀ bis C₄₀ mittels Gaschromatographie. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 01.01.2005.
- [62] ÖNORM S 2124: Bestimmung von BTEX/LHKW in Feststoffproben nach Lösungsmittlextraktion. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausgabe: 01.07.2006.
- [63] DIN 38414-S23 Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Teil 23: Bestimmung von 15 polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) durch Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie (HPLC) und Fluoreszenzdetektion (S 23): Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Ausgabe: Februar 2002.
- [64] Mauschitz, G.: Klimarelevanz der Abfallwirtschaft IV. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien: Februar 2009. Online im WWW unter URL: http://www.bmlfuw.gv.at/publikationen/umwelt/archiv/klimarelevanz_der_abfallwirtschaft_iv.html (letzter Zugriff: 04.05.2014).
- [65] Lechner, P., Linzer, R., Mostbauer, P., Binner, E., Smidt, E.: Klimarelevanz der Kompostierung unter Berücksichtigung der Verfahrenstechnik und Kompostanwendung. Studie im Auftrag der MA 48. Wien: März 2005. Online im WWW unter URL: https://tcg.boku.ac.at/rol/KliKo_Endbericht.pdf (letzter Zugriff: 04.05.2014).
- [66] Dehoust, G., Schüler, D., Vogt, R., Giegrich, J.: Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft – Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Umweltbundesamt und Bundesverband der deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft E. V. Wirtschafts- und Arbeitgeberverband. Darmstadt/Heidelberg/Berlin: Januar 2010. Online im WWW unter URL:

- <http://www.bde-berlin.org/wp-content/pdf/2010/klimaschutzpotentiale.pdf> (letzter Zugriff: 04.05.2014).
- [67] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg.): Climate Change 2007 – The Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [68] Umweltbundesamt (Hrsg.): Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger. Online im WWW unter URL: <http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mom/co2mom.htm> (letzter Zugriff: 20.01.2014).
- [69] Statistik Austria (Hrsg.): Gesamtenergiebilanz Österreich (1970 bis 2012) – Energieklassifikation „Fernwärme“. Letzte Änderung der Homepage: 20. 12. 2013. Online im WWW unter URL: http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/ (letzter Zugriff: 21.01.2014).
- [70] Wellinger, A., Edelman, W., Schmid, M., Wochele, J., Angele, H.: Energieproduktion aus Küchenabfällen – Ein Vergleich der Vergärung mit der Verbrennung in KVA. Aadorf: BiomasseSchweiz, 2006.
- [71] Knappe, F., Vogt, R.: Optimierung der Verwertung organischer Abfälle. Endbericht für das Umweltbundesamt. Heidelberg: Januar 2012. Online im WWW unter URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/3709_33_340_abfaelle_bf.pdf (letzter Zugriff: 04.05.2014).
- [72] Stubenvoll, J., Böhmer, S., Szednyj, I.: Stand der Technik bei Abfallverbrennungsanlagen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien: September 2002. Online im WWW unter URL: http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/industrie/pdfs/endversion_deutsch.pdf (letzter Zugriff: 04.05.2014).
- [73] Hoffmann, G., Wünsch, C., Brunn, L., Schnapke, A., Schingnitz, D., Günther, M., Baumann, J., Wagner, J., Bilitewski, B.: Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Endbericht, Juli 2010. Online im WWW unter URL: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/iaa/publikationen/Endbericht_19072010.pdf (letzter Zugriff: 14.12.2012).
- [74] Scherer, P.: Effizienzberwachung und Bestimmung der Abbauraten von Biogasanlagen über die Bilanzierung der Kohlenstofffracht. In: Fachverband Biogas e.V. (Hrsg.): Jahrestagung 2008. Nürnberg: 2008, S. 137-145.

- [75] Mairitsch, K., Wimmer, W., Aigner, S., Drosig, B., Zweiler, R., Toppel, W., Krawinkler, R., Kamarad, L., Doczekal, C., Diaz, A.: Studie über die Erschließung des Potenzials biogener Haushaltsabfälle und Grünschnitt zum Zwecke der Verwertung in einer Biogasanlage zur optimierten energetischen und stofflichen Verwertung – Anwendungsbeispiel Modellregion Mödling. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2011.

9.2 Abkürzungsverzeichnis

§	Paragraph
%	Prozent
<	kleiner
>	größer
°C	Grad Celsius
AA	Arbeitsanweisung (Hausverfahren)
Abs.	Absatz
AG	Aktiengesellschaft
AQS-Richtlinie	Arbeits-Qualitäts-Sicherheits-Richtlinie
Art.	Artikel
ASTM	Internationale Standardisierungsorganisation mit Sitz in den USA (ursprünglich: American Society for Testing and Materials)
atm	physikalische Atmosphäre
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
B	Biomüll
BAWP	Bundes-Abfallwirtschaftsplan
bel.	belüftete
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BMLFUW	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
BTEX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol
BV	Biogenes verpackt
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
ca.	zirka
CaCO ₃	Calciumcarbonat
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
CO _{2-eq}	Kohlendioxid-Äquivalent
CSR	Corporate Social Responsibility
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DVO	Deponieverordnung
EDM	Elektronisches Datenmanagement
EG	Europäische Gemeinschaft
elektr.	elektrische
EN	Europäische Norm
EPA	US Environmental Protection Agency
et al.	et alius („und andere“)
etc.	et cetera („und so weiter“)
EU	Europäische Union

F	Fraktion
FS	Feuchtsubstanz
g	Gramm
GV	Glühverlust
GWP	Global Warming potential (Treibhausgaspotential)
h	Stunde
H	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
H ₂	Wasserstoff
H ₃ O ⁺	Oxonium-Ion
H _o	Brennwert (oberer Heizwert)
HPLC	high performance liquid chromatography (Hochleistungsflüssigkeitschromatographie-Verfahren)
Hrsg.	Herausgeber
H _u	Heizwert (unterer Heizwert)
i.d.F.	in der Fassung
i.d.g.F.	in der geltenden Fassung
i.d.R.	in der Regel
IKA	Firmenname (IKA-Labortechnik)
inkl.	inklusive
IPPC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Jän.	Jänner
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
kWh	Kilowattstunde
KW-Index	Kohlenwasserstoff-Index
l	Liter
LGBl.	Landesgesetzblatt
lit.	littera (Buchstabe)
lt.	laut
LW	Landwirtschaft
m ³	Kubikmeter
Masse-%	Masseprozent
mg/kg	Milligramm pro Kilogramm
mg/l	Milligramm pro Liter
min.	mindestens
MJ	Megajoule
mm	Millimeter
MVA	Müllverbrennungsanlage
N	Stickstoff
n.a.	nicht angegeben

NE	Nichteisen
NH ₃	Ammoniak
NL	Normliter
Nm ³	Normkubikmeter
Nr.	Nummer
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
O	Sauerstoff
OS	Originalsubstanz
oTS	organische Trockensubstanz
ÖNORM	eine vom Austrian Standards Institute veröffentlichte nationale Norm
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
Pkt.	Punkt
R	Restmüll
RB	rein Biogenes
S	Sortierung
SDAG	Saubermacher Dienstleistungs AG
Sept.	September
SOP	Standard Operating Procedure
t	Tonne
TC	total carbon
TIC	total inorganic carbon
TOC	total organic carbon (gesamter organischer Kohlenstoff)
TS	Trockenrückstand
u.	und
u.a.	unter anderen
usw.	und so weiter
v.a.	vor allem
vgl.	vergleiche
Vol-%	Volumsprozent
Wr.	Wiener
Z	Ziffer
z.B.	zum Beispiel
2-D	zweidimensional
3-D	dreidimensional

9.3 Tabellen

Tabelle 1: Stoffumsetzungen in der hydrolytischen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen	24
Tabelle 2: Stoffumsetzungen in der acidogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen	25
Tabelle 3: Stoffumsetzungen in der acetogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen	25
Tabelle 4: Stoffumsetzungen in der methanogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen	26
Tabelle 5: Reaktorkonfigurationen	31
Tabelle 6: Zusammensetzung von Biogas	33
Tabelle 7: Gaserträge und Methangehalte biogener Abfälle je Tonne biogener Abfall]	34
Tabelle 8: Inhaltsstoffe der verwendeten Substrate sowie Methanausbeute	37
Tabelle 9: Vergleich der Vergärung und Kompostierung am Beispiel von Bioabfall.....	39
Tabelle 10: Stoffgruppeneinteilung für die Sortierung der Restmülltonnen.....	51
Tabelle 11: Analysenmethoden.....	54
Tabelle 12: Stichprobenumfang der Sortierung.....	57
Tabelle 13: Zusammensetzung des Restmülls in Masseanteilen der beiden Sortierungen.	59
Tabelle 14: Zusammensetzung des Biomülls in Masseanteilen der beiden Sortierungen...	61
Tabelle 15: Berechnung der CO ₂ -Emissionen für den Energieverbrauch bei der Materialaufbereitung.....	75
Tabelle 16: Berechnung der CO ₂ -Emissionen für den Energieverbrauch bei der Kompostierung	75
Tabelle 17: Berechnung der klimarelevanten Emissionen (CH ₄ , N ₂ O) aus dem Kompostierungsprozess	76
Tabelle 18: Vermeidung von Lachgasemissionen durch die Substitution von Stickstoff-Handelsdünger	77
Tabelle 19: Gesamtbilanz für die Behandlung von einer Tonne Restmüll aus Supermärkten in einer Kompostierung.....	78
Tabelle 20: Gesamtbilanz für die Behandlung von einer Tonne Biomüll aus Supermärkten in einer Kompostierung	79
Tabelle 21: Berechnung der CO ₂ -Emissionen für den Eigenenergieverbrauch bei der Nassvergärung	81

Tabelle 22: Berechnung der Energie des erzeugten Biogases je Tonne Biomüll und Restmüll aus den Supermärkten	82
Tabelle 23: Berechnung des Methanverlustes im Gärrestlager bei der Vergärung von einer Tonne Inputmaterial.....	83
Tabelle 24: Berechnung des Methanschlupfs bei der Verbrennung von Biogas aus einer Tonne Inputmaterial.....	83
Tabelle 25: Klimarelevante Emissionen durch die Aufbringung von unsepariertem Gärrest je Tonne Inputmaterial.....	84
Tabelle 26: Gutschriften durch die Vermeidung der Handelsdüngerproduktion.....	84
Tabelle 27: Vermeidung von Lachgasemissionen durch die Substitution von Stickstoff-Handelsdüngeraufbringung	85
Tabelle 28: Gesamtbilanz für die Behandlung von einer Tonne Restmüll aus Supermärkten in einer Biogasanlage.....	86
Tabelle 29: Gesamtbilanz für die Behandlung von einer Tonne Biomüll aus Supermärkten in einer Biogasanlage.....	87
Tabelle 30: Berechnung der CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung des fossilen Anteils des Rest- bzw. Biomülls aus den Supermärkten.....	89
Tabelle 31: Berechnung der Gutschriften aus der Nutzung der Wärme und der elektrischen Energie bei der Verbrennung von Biomüll und Restmüll aus Supermärkten	90
Tabelle 32: Gesamtbilanz für die Behandlung von einer Tonne Restmüll aus Supermärkten in einer Müllverbrennungsanlage	90
Tabelle 33: Gesamtbilanz für die Behandlung von einer Tonne Biomüll aus Supermärkten in einer Müllverbrennungsanlage	91
Tabelle 34: Zusammenfassung der Treibhausgasbilanz (gerundet).....	95

9.4 Abbildungen

Abbildung 1:	Abfallhierarchie.....	15
Abbildung 2:	Phasen der Biogasentstehung	24
Abbildung 3:	Relative Biogasmenge in Abhängigkeit von Temperatur und Verweilzeit	28
Abbildung 4:	Prozessablauf der Vergärung organischer Abfälle.....	29
Abbildung 5:	Nachbehandlungsverfahren	33
Abbildung 6:	Verwendungsmöglichkeiten von Biogas.....	34
Abbildung 7:	Verfahrensschema der Co-Vergärungsanlage.....	36
Abbildung 8:	Lebensmitteleinzelhändler in Österreich	42
Abbildung 9:	Beprobungsschema der Restmülluntersuchung	52
Abbildung 10:	Vergleich der Restmüllzusammensetzung vom September 2009 (1. Versuch) und Jänner 2010 (2. Versuch) in Masseanteilen.....	58
Abbildung 11:	Vergleich der Biomüllzusammensetzung vom September 2009 (1. Versuch) und Jänner 2010 (2. Versuch) in Masseanteilen.....	60
Abbildung 12:	Vergleich der mittleren Zusammensetzung der Restmülltonnen und der Biomülltonnen in Masseanteilen.....	62
Abbildung 13:	pH-Werte der Eluate.....	63
Abbildung 14:	Trockenrückstand und Wassergehalt.....	64
Abbildung 15:	Brennwert und Heizwert.....	65
Abbildung 16:	Glühverlust und TOC im Feststoff.....	66
Abbildung 17:	TOC im Eluat und im Feststoff.....	67
Abbildung 18:	biogener Kohlenstoffanteil	68
Abbildung 19:	Kohlenwasserstoff-Index im Feststoff	69
Abbildung 20:	Referenzsystem zur Berechnung der Grobbilanz inkl. Systemgrenze.....	72
Abbildung 21:	Referenzsystem Kompostierung.....	74
Abbildung 22:	Referenzsystem Vergärung	80
Abbildung 23:	Referenzsystem Müllverbrennungsanlage.....	88

Anhang

Tabelle I: Angaben zur Anzahl an Entleerungen des Saubermacher-Standortes Wien bei diversen Handelsketten [Datenquelle: E-mail von Hrn. Ing. Kazda vom 14.10.2009]

Firma	Filialanzahl*	Restmüll [1.100 l/a]**	Biomüll [240 l/a]***	Biomüll [770 l/a]****
Billa	63	9.885	4.393	
Penny	25	994	1.178	
Lidl	25	2.040		
Merkur	12	8.891	6.276	
Hofer	84	13.441		8.107
SUMME	209	35.251	11.847	8.107

Anmerkungen:

* Filialanzahl: Anzahl der entsorgten Filialen im Bereich des Standortes Wien.

** Restmüll [1.100l/a]: Anzahl der innerhalb eines Jahres entleerten Restmüllbehälter mit 1.100l Volumen.

*** Biomüll [240 l/a]: Anzahl der innerhalb eines Jahres entleerten Biomüllbehälter mit 240 l Volumen.

**** Biomüll [770 l/a]: Anzahl der innerhalb eines Jahres entleerten Biomüllbehälter mit 770 l Volumen.

Tabelle II: Berechnungen zur Entsorgungsmenge der Handelsketten des Saubermacher-Standortes Wien

	Restmüll (1.100 l-Behälter)	Biomüll (240 l-Behälter)	Biomüll (770 l- Behälter)
Gesamtvolumen je Behältervariante [l/a]	38.776.100	2.843.280	6.242.390
Durchschnittsfüllmenge je Behältervariante berechnet aus den Versuchsdaten vom Sept. 2009 und Jän. 2010 [kg/Behälter]	92,8	43	170,8
Entsorgungsmenge [t/a]	3271,29	509,42	1384,68

Fotodokumentation

Die folgenden Abbildungen I bis XVIII zeigen Beispiele der Sortierfraktionen, die im Zuge der durchgeführten Sortierungen im Restmüll und im Biomüll von Lebensmittelmärkten vorgefunden wurden.

Abbildungen XIX und XX zeigen Blicke in die Restmülltonnen und Abbildungen XXI und XXII zeigen einen Auszug der Biomülltonneninhalte von Supermärkten. Beispiele vollständiger 240-l-Biomülltonneninhalte sind in den Abbildungen XXIII und XXIV ersichtlich.



Abbildung I: Sortierfraktion „Rein Biogenes“



Abbildung II: Sortierfraktion „Biogenes verpackt“



Abbildung III: Sortierfraktion „Holz“



Abbildung IV: Sortierfraktion „Papier/Karton“



Abbildung V: Sortierfraktion „Kunststoffe (2-D)“



Abbildung VI: Sortierfraktion „Kunststoffe (3-D)“



Abbildung VII: Sortierfraktion „Kunststoffbehältnisse mit Inhalt“



Abbildung VIII: Sortierfraktion „Glas ohne Inhalt“



Abbildung IX: Sortierfraktion „Glas mit Inhalt“



Abbildung X: Sortierfraktion „Textilien“



Abbildung XI: Sortierfraktion
„Metalle ohne Inhalt“



Abbildung XII: Sortierfraktion
„Metalle mit Inhalt“

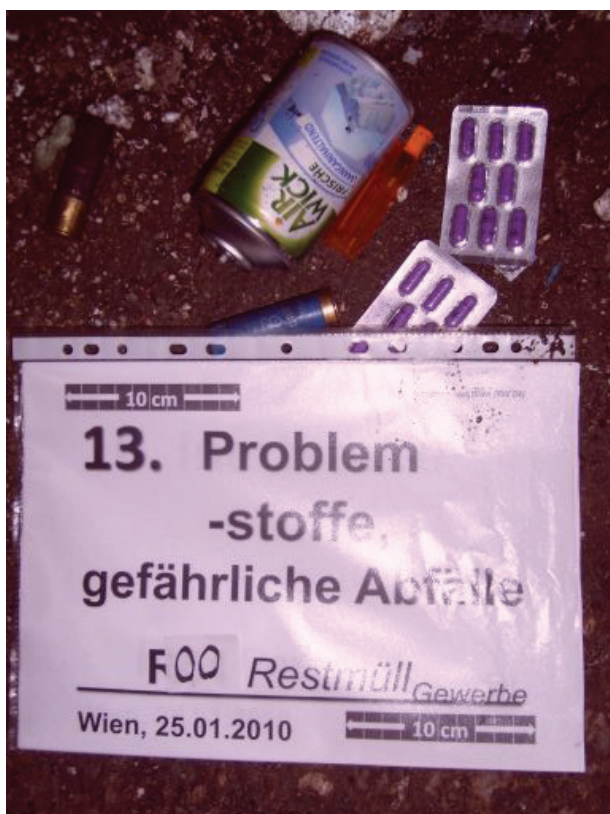


Abbildung XIII: Sortierfraktion
„Problemstoffe“



Abbildung XIV: Sortierfraktion
„Materialverbunde ohne Inhalt“



Abbildung XV: Sortierfraktion „Materialverbunde mit Inhalt“



Abbildung XVI: Sortierfraktion „Inertstoffe“



Abbildung XVII: Sortierfraktion „Feinanteil“

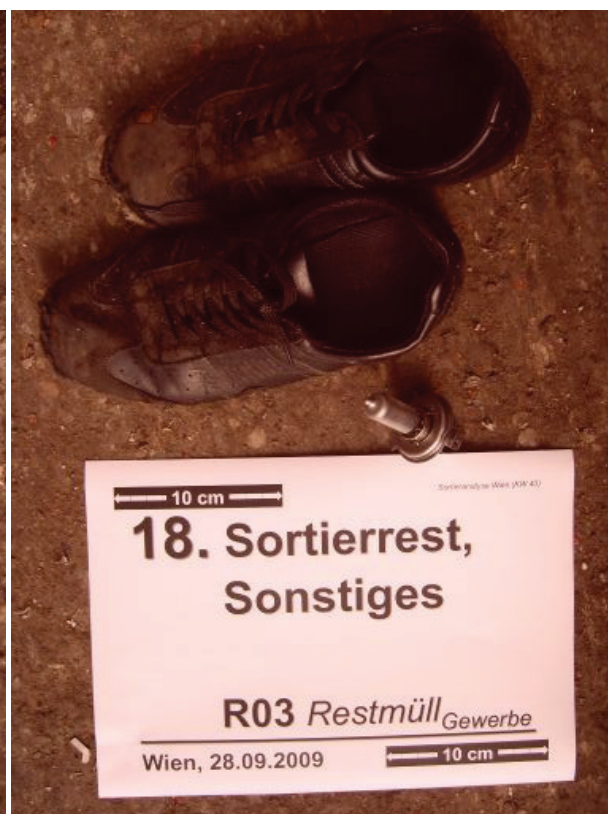


Abbildung XVIII: Sortierfraktion „Sortierrest“



Abbildung XIX: Blick in eine Restmülltonne



Abbildung XX: Blick in eine Restmülltonne



Abbildung XXI: Blick in eine Biomülltonne



Abbildung XXII: Blick in eine Biomülltonne



Abbildung XXIII: Inhalt einer 240-l-Biomülltonne



Abbildung XXIV: Inhalt einer 240-l-Biomülltonne

Tabelle III: Daten der Restmüllsortierungen

Nr.	Versuchsnummer_ Restmülltonnennummer	1_R01		1_R02		1_R03		1_R04		1_R05		1_R06	
		Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]
1.	Rein Biogenes	25,5	26,42	37,0	26,5	6,5	7,4	6,0	21,4	1,5	13,6	11,5	39,7
2.	Biogenes verpackt	36,5	37,82	94,0	67,4	56,0	64,0	11,0	39,3	6,0	54,5	3,0	10,3
3.	Holz	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4.	Papier / Karton	8,0	8,29	3,0	2,2	9,5	10,9	4,0	14,3	1,0	9,1	7,0	24,1
5.	Kunststoffe (2-D)	8,0	8,29	1,0	0,7	1,5	1,7	2,5	8,9	2,0	18,2	3,5	12,1
6.	Kunststoffe (3-D)	1,0	1,04	0,5	0,4	1,5	1,7	1,0	3,6	0,0	0,0	0,5	1,7
7.	Kunststoffbehältnisse mit Inhalt	1,0	1,04	0,0	0,0	0,5	0,6	1,0	3,6	0,5	4,5	0,0	0,0
8.	Glas ohne Inhalt	0,0	0,00	0,5	0,4	1,0	1,1	0,5	1,8	0,0	0,0	0,5	1,7
9.	Glas mit Inhalt	0,0	0,00	0,0	0,0	1,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10.	Textilien	0,0	0,00	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11.	Metall ohne Inhalt	0,5	0,52	0,5	0,4	0,5	0,6	0,5	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0
12.	Metall mit Inhalt	0,5	0,52	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13.	Problemstoffe	0,0	0,00	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14.	Materialverbunde ohne Inhalt	3,5	3,63	0,0	0,0	0,5	0,6	1,0	3,6	0,0	0,0	1,0	3,4
15.	Materialverbunde mit Inhalt	11,0	11,40	2,0	1,4	7,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16.	Inertstoffe	0,0	0,00	0,0	0,0	0,5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17.	Feinanteil	0,5	0,52	0,0	0,0	1,0	1,1	0,5	1,8	0,0	0,0	2,0	6,9
18.	Sortierrest	0,5	0,52	0,0	0,0	0,5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Summe	96,5	100,0	139,5	100,0	87,5	100,0	28,0	100,0	11,0	100,0	29,0	100,0

Tabelle IV: Daten der Restmüllsortierungen

Nr.	Fraktionen - Restmüll	1_R07		1_R08		1_R09		2_R01		2_R02		2_R03	
		Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]
1.	Rein Biogenes	21,0	44,0	37,1	4,0	29,6	9,0	21,7	21,5	11,9	5,0	4,5	
2.	Biogenes verpackt	27,5	39,0	32,9	0,5	3,7	7,0	16,9	116,0	64,4	63,5	57,2	
3.	Holz	0,0	4,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,6	0,0	0,0	
4.	Papier / Karton	24,0	11,0	9,3	4,0	29,6	8,5	20,5	10,0	5,6	6,5	5,9	
5.	Kunststoffe (2-D)	3,0	4,0	3,4	2,5	18,5	4,5	10,8	2,5	1,4	1,5	1,4	
6.	Kunststoffe (3-D)	2,5	0,5	0,4	0,5	3,7	1,5	3,6	2,5	1,4	0,5	0,5	
7.	Kunststoffbehältnisse mit Inhalt	3,5	3,5	3,0	0,5	3,7	0,5	1,2	4,0	2,2	0,0	0,0	
8.	Glas ohne Inhalt	2,5	1,0	0,8	0,0	0,0	0,5	1,2	1,0	0,6	2,5	2,3	
9.	Glas mit Inhalt	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,4	10,0	5,6	8,0	7,2	
10.	Textilien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,8	0,0	0,0	
11.	Metall ohne Inhalt	1,5	1,0	0,8	0,0	0,0	0,5	1,2	0,0	0,0	0,5	0,5	
12.	Metall mit Inhalt	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,3	0,0	0,0	
13.	Problemstoffe	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14.	Materialverbunde ohne Inhalt	3,0	0,0	0,0	0,5	3,7	2,0	4,8	1,0	0,6	0,0	0,0	
15.	Materialverbunde mit Inhalt	3,5	8,5	7,2	0,0	0,0	3,5	8,4	4,0	2,2	13,0	11,7	
16.	Inertstoffe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,3	9,5	8,6	
17.	Feinanteil	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
18.	Sortierrest	1,5	2,0	1,7	1,0	7,4	3,0	7,2	4,0	2,2	0,5	0,5	
	Summe	97,5	100,0	118,5	100,0	100,0	41,5	100,0	180,0	100,0	111,0	100,0	

Tabelle V: Daten der Restmüllsortierungen

Nr.	Fraktionen - Restmüll	2_R05		2_R07		2_R08		2_R00	
		Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]
1.	Rein Biogenes	39,5	42,7	22,5	31,0	35,5	40,8	2,0	4,7
2.	Biogenes verpackt	5,5	5,9	8,0	11,0	17,0	19,5	5,0	11,6
3.	Holz	0,0	0,0	0,5	0,7	2,0	2,3	0,0	0,0
4.	Papier / Karton	22,0	23,8	20,5	28,3	9,0	10,3	19,0	44,2
5.	Kunststoffe (2-D)	7,0	7,6	3,5	4,8	3,0	3,4	6,0	14,0
6.	Kunststoffe (3-D)	2,0	2,2	3,5	4,8	1,5	1,7	2,0	4,7
7.	Kunststoffbehältnisse mit Inhalt	4,0	4,3	3,5	4,8	2,5	2,9	1,0	2,3
8.	Glas ohne Inhalt	1,0	1,1	2,0	2,8	0,0	0,0	1,5	3,5
9.	Glas mit Inhalt	1,5	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10.	Textilien	1,5	1,6	0,5	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
11.	Metall ohne Inhalt	0,5	0,5	1,0	1,4	0,0	0,0	1,5	3,5
12.	Metall mit Inhalt	0,0	0,0	0,5	0,7	0,0	0,0	1,0	2,3
13.	Problemstoffe	1,5	1,6	1,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0
14.	Materialverbunde ohne Inhalt	1,5	1,6	1,0	1,4	0,5	0,6	1,5	3,5
15.	Materialverbunde mit Inhalt	0,0	0,0	2,5	3,4	16,0	18,4	1,0	2,3
16.	Inertstoffe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17.	Feinanteil	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18.	Sortierrest	5,0	5,4	2,0	2,8	0,0	0,0	1,5	3,5
Summe		92,5	100,0	72,5	100,0	87,0	100,0	43,0	100,0

Tabelle VI: Daten der Biomüllsortierungen

Nr.	Fraktionen - Biomüll	1_B01		1_B02		1_B04		2_B01		2_B03		2_B04	
		Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]	Fraktions- masse [kg]	Anteil an Sortiertem [%]
1.	Rein Biogenes	11,5	29,9	3,5	10,9	221,0	82,8	19,0	69,1	26,0	51,0	184,0	73,9
2.	Biogenes verpackt	16,0	41,6	10,5	32,8	39,0	14,6	4,5	16,4	22,0	43,1	62,5	25,1
3.	Holz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,2
4.	Papier / Karton	0,0	0,0	2,5	7,8	3,0	1,1	0,0	0,0	1,5	2,9	1,0	0,4
5.	Kunststoffe (2-D)	0,5	1,3	0,5	1,6	1,0	0,4	0,5	1,8	0,5	1,0	0,5	0,2
6.	Kunststoffe (3-D)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7.	Kunststoffbehältnisse mit Inhalt	1,5	3,9	3,5	10,9	0,5	0,2	0,0	0,0	0,5	1,0	0,0	0,0
8.	Glas ohne Inhalt	1,5	3,9	0,0	0,0	0,5	0,2	0,5	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0
9.	Glas mit Inhalt	0,0	0,0	0,5	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10.	Metall ohne Inhalt	0,0	0,0	0,5	1,6	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11.	Metall mit Inhalt	0,5	1,3	2,0	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12.	Materialverbunde ohne Inhalt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13.	Materialverbunde mit Inhalt	0,5	1,3	1,0	3,1	0,0	0,0	3,0	10,9	0,5	1,0	0,0	0,0
14.	Feinanteil	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15.	Sortierrest	6,0	15,6	7,5	23,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
16.	Textilien	0,5	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Summe	38,5	100,0	32,0	100,0	267,0	100,0	27,5	100,0	51,0	100,0	249,0	100,0

Tabelle VII: Analyseergebnisse der Laborproben der beiden Untersuchungstermine

Parameter	Kurzbezeichnung	Bestimmungsgrenze	Einheit	Biogenes verpackt (30.09.2009)	Biogenes verpackt (26.01.2010)	rein biogene Fraktion (30.09.2009)	rein biogene Fraktion (26.01.2010)	Restmülltonne gesamt (30.09.2009)	Restmülltonne gesamt (26.01.2010)	Biomülltonne gesamt (30.09.2009)	Biomülltonne gesamt (26.01.2010)
				+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
pH-Wert im Eluat	pH	1 bis 14		3,27 bei 25°C	4,3 bei 24,7°C	3,65 bei 25°C	3,8 bei 24,1°C	4,19 bei 25°C	4,0 bei 26°C	3,3 bei 25°C	4,8 bei 24,5°C
Trockenrückstand	TS	0,001 %	%	18,1	40,7	31	29,5	45,1	31,3	11,5	14,4
Glühverlust	GV	0,02%	% TS	94,02	96,85	85,19	92,24	87,04	94,72	89,67	92,69
Brennwert (oberer Heizwert)	Ho	-	kJ/kg TS	20.000	20.300	18.600	19.500	19.500	20.100	18.000	20.200
Heizwert (unterer)	Hu	-	kJ/kg OS	1.320	6.200	3.800	3.600	6.800	4.100	16.600 kJ/kg TS	590 kJ/kg OS
Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff (Feststoff)	TOC	0,50%	% TS	45	45,0	49	44,0	49,0	45,5	48,1	47,0
Gesamtkohlenstoff (Feststoff)	TC	0,50%	% TS	45,6	45,0	49,2	44,0	49,1	45,5	48,4	47,0
Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff (Eluat)	TOC	5 mg/kg	mg/kg TS	119.538	248.917	111.231	36.403	84.229	84.717	179.047	97.892
biogener Kohlenstoffanteil	xBTC	-	%	76,7	87,3	n.a.	90,8	83,1	88,1	88,8	84,8
Kohlenwasserstoff-Index (Feststoff)	KW-Index	100 mg/kg	mg/kg TS	480	3.600	5.300	2.000	19.000	3.900	12.000	3.000
BTEX (Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole)	BTEX	-	mg/kg TS	<2,5	n.a.*	<2,5	n.a.*	<2,5	n.a.*	<2,5	n.a.*
Summe der 16 PAKs nach EPA (Feststoff)	PAK 16	0,4 mg/kg	mg/kg TS	<0,4	n.a.**	<0,4	n.a.**	<0,4	n.a.**	<0,4	n.a.**

n.a. nicht analysiert

n.a.* nicht analysiert, da bei der ersten Versuchsreihe der Messwert kleiner als die Nachweisgrenze (<2,5 mg/kg TS) war

n.a.** nicht analysiert, da bei der ersten Versuchsreihe der Messwert kleiner als die Nachweisgrenze (<0,4 mg/kg TS) war

Kurzbeschreibung der einzelnen Laborproben:

Biogenes verpackt ist die Fraktion der verpackten Lebensmittel aus den Biomülltonnen und den Restmülltonnen gemeinsam.Die **rein biogene Fraktion** ist der biogene Anteil (Lebensmittel ohne jegliche Verpackung) aus den Biomülltonnen und den Restmülltonnen gemeinsam.**Restmülltonne gesamt** betrifft den gesamten Inhalt der Restmülltonnen von den Handelsketten (vor der Sortierung).**Biomülltonne gesamt** betrifft eine repräsentative Probe aus dem gesamten Inhalt aller angelieferten Biomülltonnen der Handelsketten (vor der Sortierung).

Tabelle VIII: Berechnung der CO₂-Emissionen durch die Verbrennung von Kunststoffen in einer Müllverbrennungsanlage [22] ¹⁾

Parameter	Datenbasis	Einheit	Kunststoffe
Heizwert (unterer)	Mittelwert lt. Literatur Kranert et al. S. 308 ¹⁾	MJ/t OS	43.100
Anteil an Kunststoffen im Restmüll	Gerundete Summe der Mittelwerte aus den Sortierfraktionen der Restmüllsortierung: „Kunststoffe (2-D)“, „Kunststoffe (3-D)“, „Materialverbunde ohne Inhalt“ und 1/5 „Kunststoffbehältnisse mit Inhalt“	Masse-%	10
Heizwertanteil für die Berechnung der Grobbilanz der Kompostierung	Berechnung	MJ/100 kg OS	4.310
Abgabe elektrischer Energie	Annahme: 20 % elektrischer Wirkungsgrad bezogen auf die zugeführte Energie unter Berücksichtigung des Eigenenergiebedarfs (siehe Pkt. 8.3.3)	kWh/100 kg	239,44
Emissionsfaktor	(siehe Pkt. 8.3)	kg CO ₂ -eq/kWh	0,274
Gutschrift durch die Abgabe elektrischer Energie	Berechnung	kg CO₂-eq/100 kg Kunststoffe	-65,61
Nutzwärmeabgabe	Annahme: 40 % thermischer Wirkungsgrad bezogen auf die zugeführte Energie unter Berücksichtigung des Eigenenergiebedarfs (siehe Pkt. 8.3.3)	kWh/100 kg	478,89
Emissionsfaktor	(siehe Pkt. 8.3 – Berechnung über den österreichischen Fernwärmemix)	kg CO ₂ -eq/kWh	0,213
Gutschrift durch die Nutzwärmeabgabe	Berechnung	kg CO₂-eq/100 kg Kunststoffe	-102,00
fossiler Kohlenstoffanteil in Kunststoffen	Lt. Literatur Kranert et al. S. 308 ¹⁾	%	86
Trockensubstanz Kunststoffe	Lt. Literatur Kranert et al. S. 308 ¹⁾	%	100
fossiler Kohlenstoffgehalt für die Berechnung der Grobbilanz der Kompostierung	Berechnung	kg C _{fossil} /100 kg Kunststoffe	86
Umrechnungsfaktor von C auf CO ₂	Umrechnungsfaktor durch Berechnung über die Stöchiometrie: 12 g C => 44 g CO ₂ ; 1 g C = 3,67 g CO ₂	-	3,67
CO₂-Emissionen durch die Verbrennung des fossilen Kohlenstoffanteils	Berechnung (fossiler Kohlenstoffgehalt x Umrechnungsfaktor)	kg CO₂/100 kg Kunststoffe	315,33
EMISSION	Berechnung (CO ₂ -Emissionen – Gutschrift elektrische Energie – Gutschrift Nutzwärmeabgabe)	kg CO₂-eq/100 kg Kunststoffe	147,72

Tabelle IX: Berechnung der Kohlenstofffixierung im Boden bei der Kompostierung der Restmüll- und Biomülltonnen aus den Supermärkten [65]¹⁾, [66]²⁾

Parameter	Datenbasis	Einheit	Restmülltonnen	Biomülltonnen
Trockenmasse/ Trockensubstanz	Mittelwert aus der Laboranalytik	%	38,2	12,95
Trockenmasse	Berechnung (1.000 kg x Trockensubstanz)	kg/t Abfall	382,0	129,5
organische Substanz (bestimmt als Glühverlust)	Mittelwert aus der Laboranalytik	%	90,9	91,2
organische Trockenmasse	Berechnung (Trockenmasse x organische Substanz)	kg/t Abfall	347,2	118,1
Abbaugrad	lt. Literatur Lechner et al. S. 43 ¹⁾ (Abbaugrad wird als Massenverlust der organischen Substanz im biologischen Prozess angegeben.)	%	50	50
organische Trockenmasse, die mineralisiert wird	Berechnung (organische Trockenmasse x Abbaugrad)	kg/t Abfall	173,6	59,1
Kohlenstoffgehalt	lt. Literatur Lechner et al. S. 43 ¹⁾ enthält die organische Trockenmasse zwischen 40 % und 50 % Kohlenstoff. Somit wird mit 45 % berechnet.	%	45	45
Kohlenstoffertrag	Berechnung (organische Trockenmasse, die mineralisiert wird x Kohlenstoffgehalt)	kg C/t Abfall	78,1	26,6
Kohlenstoffgehalt, der im Boden fixiert wird	lt. Literatur Dehoust et al. S. 46 ¹⁾	%	8	8
Kohlenstoffertrag, der im Boden fixiert wird	Berechnung (Kohlenstoffertrag x Kohlenstoffgehalt, der im Boden fixiert wird)	kg C/t Abfall	6,3	2,1
Umrechnungsfaktor von C auf CO ₂	Umrechnungsfaktor durch Berechnung über die Stöchiometrie: 12 g C => 44 g CO ₂ ; 1 g C = 3,67 g CO ₂	-	3,67	3,67
CO₂-Fracht, die im Boden fixiert wird	Berechnung (Kohlenstoffertrag, der im Boden fixiert wird x Umrechnungsfaktor)	kg CO₂/t Abfall	22,9	7,8

Tabelle X: Berechnung der Gutschrift durch die Substitution von Handelsdünger bei der Aufbringung von Kompost auf landwirtschaftliche Flächen [65]¹⁾

Parameter	Datenbasis	Einheit	Ergebnis
CO ₂ -Äquivalent pro Tonne Fertigkompost	lt. Literatur Lechner et al. S. 109 ¹⁾	kg CO ₂ /t Fertigkompost	46
Outputmenge an Fertigkompost bei der Kompostierung von 1 t Input-Abfall	Lt. Literatur Lampert et al. S. 43 ¹⁾	kg	350
CO ₂ -Äquivalent pro Tonne Input- Abfall	Berechnung (46/(1.000/350))	kg CO₂/t Abfall	16,1

Tabelle XI: Berechnung des Energieinhaltes des erzeugten Biogases pro Tonne Restmüll und Biomüll aus den Supermärkten [74]¹⁾, [65]²⁾

Parameter	Datenbasis	Einheit	Restmüll- tonnen	Biomüll- tonnen
Trockensubstanz	Mittelwert aus der Laboranalytik	%	38,2	12,95
TC fest	Mittelwert aus der Laboranalytik	% TS	47,30	47,70
TC bioverfügbar	bei Restmüll nur 75 % bioverfügbar, bei Biomüll 98 %; Werte anhand der stofflichen Zusammensetzung berechnet (Fraktionen Holz, Papier, Kunststoffe, Textilien und Materialverbunde wurden nicht miteingerechnet)	% TS	75	98
biogener Kohlenstoffanteil	Mittelwert aus der Laboranalytik	% TS	85,6	86,8
bioverfügbarer, biogener Kohlenstoffanteil	Berechnung (1.000 kg x _ % Trockensubstanz x _ % TC fest x _ % TC bioverfügbar x _ % biogener Kohlenstoffanteil)	kg/t Input	116,00	52,55
theoretisches Biogaspotential	lt. Literatur Scherer S. 2 ¹⁾ : 1 kg Kohlenstoff als Ausgangsmaterial ergibt rechnerisch 1,81 Nm ³ Biogas unter Berücksichtigung vom bakteriellen Biomasseeinbau während der Gasbildung von 3 %. Berechnung (bioverfügbarer, biogener Kohlenstoffanteil x 1,81 Nm ³)	Nm ³ /t Input	209,99	95,12
Effizienzgrad/ Abbaurrate der Biogasanlage	Abbaugrad für Restmülltonne in Anlehnung an Literatur Scherer S. 3 u. 6 ¹⁾ (Effizienzgrad zwischen 73,4 u. 93%; Mittelwert: 83,2 % angenommen) sowie in Anlehnung an das Fraunhofer Institut (http://www.igb.fraunhofer.de/de/kompetenzen/umweltbiotechnologie/bioenergie/biogas.html ; Letzter Zugriff: 03.05.2014), wo eine Versuchsanlage mit optimalen Bedingungen vorhanden ist, wo bei Biomüll ein max. erreichter Abbaugrad von > 92 % angegeben wird und bei Restmüll: ca. 80 % max. erreichter Abbaugrad => unter Berücksichtigung, dass meine Bilanzierungsanlage keine Forschungsanlage mit optimalen Bedingungen ist, wird ein Wert für den Restmüll mit 60 % Abbaurrate angenommen.	%	60,00	83,20
praktische Biogasausbeute	Berechnung (theoretisches Biogaspotential x Effizienzgrad)	Nm ³ /t Input	125,99	79,14
Methangehalt im Biogas	lt. Literatur Lechner et al. S. 30 ²⁾	%	60,00	60,00
Methanertrag	Berechnung (praktische Biogasausbeute x Methangehalt im Biogas)	Nm ³ /t Input	75,60	47,48
Energieinhalt von Methan		kWh/Nm ³	9,94	9,94
Energieertrag des Methans	Berechnung (Methanertrag x Energieinhalt von Methan)	kWh/t Input	751,43	471,99
elektrischer Wirkungsgrad BHKW	lt. Literatur Lechner et al. S. 30 ²⁾	%	35	35
thermischer Wirkungsgrad BHKW	lt. Literatur Lechner et al. S. 30 ²⁾	%	45	45
elektrische Energie (Strom)	Berechnung (Energieertrag des Methans x elektrischer Wirkungsgrad)	kWh/t Input	263,00	165,20
thermische Energie (Wärme)	Berechnung (Energieertrag des Methans x thermischer Wirkungsgrad)	kWh/t Input	338,14	212,40

Tabelle XII: Berechnung der CO₂-Emissionen durch die Verbrennung fossiler Anteile im Abfall in einer Müllverbrennungsanlage

Parameter	Datenbasis	Einheit	Restmüll-tonnen	Biomüll-tonnen
Trockenmasse / Trockensubstanz	Mittelwert aus der Laboranalytik	%	38,2	12,95
TC fest	Mittelwert aus der Laboranalytik	% TS	47,3	47,7
biogener Kohlenstoffanteil	Mittelwert aus der Laboranalytik	% TS	85,6	86,8
fossiler Kohlenstoffanteil	Berechnung aus dem biogenen Kohlenstoffanteil (100 % - % biogener Kohlenstoffanteil)	% TS	14,4	13,2
fossiler Kohlenstoffgehalt	Berechnung aus TS, TOC fest und fossilem Kohlenstoffanteil (1.000 kg x % Trockenmasse x % TC fest x % fossiler Kohlenstoffanteil)	kg C _{fossil} /t Abfall	26,02	8,15
Umrechnungsfaktor von C auf CO ₂	Umrechnungsfaktor durch Berechnung über die Stöchiometrie: 12 g C => 44 g CO ₂ ; 1 g C = 3,67 g CO ₂	-	3,67	3,67
CO₂-Emissionen durch die Verbrennung des fossilen Kohlenstoffanteils	Berechnung (fossiler Kohlenstoffgehalt x Umrechnungsfaktor)	kg CO₂/t Abfall	95,4	29,9