

Betrieb von Kompostierungsanlagen

mit geringen Emissionen
klimarelevanter Gase



BGK

Herausgeber

Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.
Von-der-Wettern-Straße 25, 51149 Köln
Email: info@kompost.de
Internet: www.kompost.de

Redaktion

Dr. Bertram Kehres,
Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.

Autoren

Dr. Bertram Kehres
Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Köln

Birte Mähl, Dr. Joachim Clemens, Dr. Carsten Cuhls,
Ingenieurgesellschaft für Wissenstransfer mbH, Troisdorf-Hannover

Dr. Jürgen Reinhold
Dr. Reinhold & Kollegen, Stahnsdorf

Dr. Joachim Müsken
Dr. Müsken + Partner, Stuttgart

Begleitende Arbeitsgruppe

Dr. Anke Boisch (Leitung),
SRH Stadtreinigung Hamburg, Tangstedt

Sebastian Böhme,
Kompotec, Gütersloh

Stefan Grüner,
Biogenes Zentrum Peine, Hohenhameln

Ulf Meyer zu Westerhausen,
aha Zweckverband, Hannover

Thomas von der Saal,
Humuswerk Main-Spessart, Gemünden

Hannelore Martin
Gütegemeinschaft Kompost Berlin/Brandenburg/Sachsen-Anhalt e.V., Nächst-Neuendorf

Ausgabe

1. Auflage November 2010

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
2 Emissionsarten	6
2.1 Staub- und Keimemissionen	6
2.2 Geruchsemissionen.....	7
2.3 Gasförmige Emissionen	8
2.3.1 Kohlenstoffverbindungen	8
2.3.1.1 Gesamtkohlenstoff (C-ges.)	8
2.3.1.2 Kohlendioxid (CO ₂)	8
2.3.1.3 Methan (CH ₄)	8
2.3.1.4 Flüchtige organische Verbindungen (VOC).....	8
2.3.1.5 Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC)	8
2.3.2 Stickstoffverbindungen.....	8
2.3.2.1 Ammoniak (NH ₃)	9
2.3.2.2 Lachgas, Distickstoffoxid (N ₂ O)	9
2.4 Klimawirksamkeit von Treibhausgasen.....	9
2.5. Ergebnisse von Emissionsmessungen	10
3 Rechtsbestimmungen und Regelwerke.....	14
3.1 TA-Luft	14
3.2 VDI-Richtlinie 3475	15
3.3 Anlagengenehmigung.....	15
4 Entstehung und Vermeidung klimarelevanter Gase	16
4.1 Grundlagen der aeroben Bioabfallbehandlung (Kompostierung)	16
4.2 Verfahrensbereiche der Bioabfallbehandlung	19
4.2.1 Annahme und Aufbereitung der Bioabfälle zur Kompostierung.....	19
4.2.2 Behandlung der Bioabfälle	20
4.2.3 Konfektionierung.....	20
4.2.4 Lager	20
4.3 Einflussfaktoren und Steuermechanismen	21
4.3.1 Ausgangsmaterial.....	21
4.3.2 Strukturmaterial	23
4.3.3 Rottegemisch und Rottekörper	23
4.3.3.1 Mietengeometrie	23
4.3.3.2 Struktur und Porenvolumen.....	24

4.3.3.3 Wassergehalt.....	24
4.3.3.4 Nährstoffe und C/N-Verhältnis	25
4.3.4 Rotteführung.....	26
4.3.4.1 Auf- und Umsetzen von Rottekörpern	26
4.3.4.2 Belüftung.....	27
4.3.4.3 Bewässerung	28
4.3.5. Technische Maßnahmen zur Emissionsverminderung.....	28
4.3.5.1 Abdeckung	28
4.3.5.2 Einhausung	28
4.3.5.3 Abgasreinigung.....	29
5 Internes Qualitätsmanagement	30
6 Zusammenfassung	32
Anhang 1 Begriffe und Definitionen	36
Anhang 2 Art und Beschaffenheit von Ausgangsstoffen	38
Anhang 3 Quellen	40

1. Einleitung

Die getrennte Erfassung und Verwertung von Bioabfällen hat sich in den vergangenen 20 Jahren als ein wichtiger Bestandteil der Kreislaufwirtschaft etabliert. Bioabfälle repräsentieren in Deutschland 30 bis 40 % des Siedlungsabfallaufkommens. Das Recycling von Bioabfällen dient der Wiedergewinnung von Pflanzennährstoffen sowie der Humusversorgung von Böden, deren Bedarf an organischer Substanz mit zunehmender Intensivierung des Ackerbaus steigt. Die stoffliche Verwertung von Bioabfällen dient auf diese Weise gleichermaßen der Schonung endlicher Ressourcen sowie dem Bodenschutz. Gezielte Humuswirtschaft sichert eine nachhaltige Bodenfruchtbarkeit, die ihrerseits Grundlage für den künftigen Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln, sowie für Energiepflanzen ist.

Bei der Kreislaufwirtschaft von Bioabfällen sind auch Schutzziele zu beachten. Das grundlegende Gebot der schadlosen Verwertung bezieht sich nicht nur auf die Qualität und Anwendung der Dünger, sondern auch auf Stoffe, die beim Produktionsprozess gebildet und emittiert werden können. Bei der Kompostierung handelt es sich dabei v.a. um Geruchsstoffe, deren Begrenzung bei der Genehmigung von Bioabfallbehandlungsanlagen eine besondere Bedeutung zukommt.

Den Emissionen klimarelevanter Gase galt bislang keine vorrangige Aufmerksamkeit, da Auswirkungen auf die direkte Umgebung der Anlagen nicht bestehen. Aufgrund der nationalen Bemühungen für eine weltweite Begrenzung klimarelevanter Gase hat die Relevanz des Beitrags einzelner Branchen zu diesen Emissionen inzwischen aber an Bedeutung gewonnen.

Im Zusammenhang mit der Emissionsberichterstattung Deutschlands zur Klimarahmenrahmenkonvention und zum Kyoto-Protokoll wurden erste Abschätzungen über klimarelevante Emissionen aus biologischen Abfallbehandlungsanlagen vorgenommen. Dabei wurde gezeigt, dass die Emissionen der Kompostierung deutlich niedriger sind, als bislang angenommen. Bezogen auf die Summe emittierter CO₂-Äquivalente in Deutschland beträgt der Beitrag aus der getrennten Sammlung und Verwertung von Bioabfällen nur 0,05 %.

Bei dieser Abschätzung wurden v.a. Kompostierungsanlagen untersucht. Untersuchungen von Vergärungsanlagen dauern derzeit noch an. Da für die Vergärung im Moment nur we-

nige Daten vorliegen, wird auf deren Darstellung zunächst verzichtet. Weitergehende Untersuchungen sind in verschiedenen Projekten jedoch nicht nur für die Vergärung, sondern auch für die Kompostierung veranlasst. Aus diesem Grunde sind die in Kapitel 2.5 dieser Schrift vorgestellten Werte als vorläufig zu betrachten.

Eines der wichtigsten Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen bezieht sich jedoch nicht auf die Höhe der Klimagasemissionen insgesamt oder von einzelnen Verfahrenstypen der Kompostierung, sondern darauf, dass die Streubreite bei Anlagen gleichen Typs verhältnismäßig groß sein kann. Dies bedeutet, dass - ungeachtet dem nach wie vor vergleichsweise geringen Beitrag der Bioabfallverwertung zu den Gesamtemissionen - die bestehenden Klimagasemissionen reduziert werden können. Evident ist auch, dass die wichtigsten Klimagase Methan und Lachgas über Biofilter nicht abgeschieden werden können. Für den Betrieb von Kompostierungsanlagen mit geringen Emissionen klimarelevanter Gase kommt es daher v.a. darauf an, dass diese Gase erst gar nicht entstehen bzw. auf ein unvermeidbares Maß reduziert werden.

Zweck dieses Handbuchs ist es, Betreibern von Kompostierungsanlagen (inkl. Kompostierung von Gärrückständen) eine Hilfestellung zu geben, die Ursachen von Emissionen klimarelevanter Gase zu verstehen, Risikofaktoren für erhöhte Emissionen zu erkennen und solche Emissionen mit vorbeugenden Maßnahmen und technischen Mitteln so weit als möglich zu vermeiden.

Die Vermeidung von Geruchsemissionen, denen im Praxisbetrieb eine hohe Bedeutung zukommt, sowie Fragen des Arbeitsschutzes, die im Zusammenhang mit Keimemissionen stehen, werden hier nur gestreift oder gar nicht behandelt. Die Schrift bezieht sich im Wesentlichen auf die Vermeidung klimarelevanter Gase bei der Kompostierung.

In künftigen Auflagen der Schrift ist beabsichtigt, die Daten von Klimagasemissionen für die Verfahren der Kompostierung zu aktualisieren, für die Verfahren der Vergärung zusätzlich aufzunehmen und auch andere Emissionen, wie die von Gerüchen, Keimen, Staub inkl. Maßnahmen ihrer Vermeidung und Begrenzung einzubeziehen.

2. Emissionsarten

Die Behandlung von Bioabfällen in Kompostierungsanlagen ist zwangsläufig mit Emissionen verbunden. Dazu zählen Staub- und Keimemissionen, Geruchsemissionen sowie andere gasförmige Emissionen etwa von klimarelevanten Gasen.

Die wesentlichen Einflussgrößen auf die Außenwirkung einer Kompostierungsanlage sind neben der Auswahl eines möglichst unkritischen Standortes und einer auf die örtlichen Gegebenheiten angepassten Planung

- der Anlagendurchsatz (Bearbeitungskapazität und Durchsatzleistung im Hinblick auf die Tages-Inputmenge),
- die Art der verarbeiteten Abfälle (Materialeigenschaften),
- das eingesetzte Verarbeitungsverfahren (technische Ausstattung),
- der Grad der Einhausung von geruchsemitierenden Anlagenteilen,
- die erzielte Reinigungsleistung (Abscheidung) von Abluftströmen aus eingehausten Anlagenteilen und

- die Qualität der Betriebsführung (betriebliche Maßnahmen des Materialmanagements und der Steuerung der Materialeigenschaften, die einen Einfluß auf die Entstehung von Emissionen haben).

Als gasförmige Emissionen sind im Wesentlichen CO₂, Geruchsstoffe, die klimarelevanten Stoffe Methan und Lachgas anzusprechen, sowie weitere geruchslose flüchtige organische Verbindungen und Ammoniak. Die Gase werden als Folge der mikrobiologischen Stoffwechselprozesse beim Abbau und Umbau der organischen Substanzen gebildet und über wirksame Kontaktzonen der jeweiligen Bioabfallbehandlungsanlagen an die Außenluft abgegeben.

2.1 Staub- und Keimemissionen

Unter dem Begriff 'Staub' werden feste Aerosole zusammengefasst. Die in der Luft verteilten festen Partikel sind dadurch gekennzeichnet, dass sie nach Aufwirbeln längere Zeit zur Ablagerung benötigen.

Abbildung 2.1: Emissionsrelevante Verfahrensteile bei der Kompostierung

Verfahrensschritt	Aggregat/Bauteil	Emissionen ²⁾ über		
		Wasser	Boden	Luft
Anlieferung	Übernahmebereich (z.B. Flachbunker)	Press-/Sickerwässer	keine	Gerüche, Lärm, Gase (Staub) (Keime)
Vorbehandlung Grobaufbereitung	Siebung, Störstoffabtrennung, Mischung etc.	Press-/Sickerwässer Kondenswässer aus Abluftbehandlung	keine	Gerüche, Lärm, Gase (Staub) (Keime)
Hauptrotte Intensivrotte³⁾	Reaktor, Tunnel, Trommel (Mieten)	Press-/Sickerwässer Kondenswässer	keine	Gerüche, Keime, Gase (Lärm)
Nachrotte	Mieten (event. eingehaust) (Reaktor, Tunnel)	Press-/Sickerwässer Kondenswässer	keine	Gerüche, Keime, Gase (Staub) (Lärm)
Konfektionierung Feinaufbereitung	Siebung, Hartstoffabscheidung etc.	keine	keine	Gerüche, Staub, Gase Keime, Lärm
Endprodukt	Kompostlager	Keine ¹⁾	Fremdstoffe, potentielle Schadstoffe	Gerüche, Staub, Gase (Keime) (Lärm)

¹⁾ in niederschlagsreichen Gebieten sinnvoller überdacht (Vernässung)

²⁾ Angaben in () bedeuten einen eingeschränkten bzw. verfahrensspezifischen Anfall

³⁾ Die Freisetzung sonstiger Luftschadstoffe ist hauptsächlich bei der Rotte zu erwarten

⁴⁾ Intensivrotte wird nur jener Rotteabschnitt der Hauptrotte bezeichnet, der unabhängig von der Selbsterhitzung des Rottegutes in technisch unterstützten (zwangsbelüfteten bzw. gekap-selten) Anlagenteilen durchgeführt wird.

Die Bedeutung des Staubs liegt neben der mechanischen Verunreinigung, die er verursachen kann, in seiner Transportfunktion für Keime und geruchsintensive Stoffe, sowie in seiner Eigenschaft als potentiell allergen.

'Keime' sind lebensfähige Mikroorganismen aller Art, insbesondere Bakterien, Pilze und Sporen. Aus hygienischer Sicht sind sowohl die aus den angelieferten Bioabfällen (Ausgangsmaterialien) stammenden, als auch die aus den einzelnen Verfahrensbereichen und Prozessabläufen freigesetzten möglichen Keimbelastungen zu beachten.

Das Auftreten von Staub- und Keimemissionen aus Bioabfällen steht in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit des Materials. Bei Wassergehalten weniger als 30 % nimmt das Risiko von Staub- und Keimemissionen deutlich zu.

Ursachen von Staub- und Keimemissionen sind z.B. trockenes lagerndes Strukturmaterial, abgetrocknete Oberflächen von Rottekörpern, die Umlagerung trockener Kompostmaterialien und abgabefertige Komposte, die Windeinfluss ausgesetzt sind, sowie Fahr- und Arbeitsflächen, die nicht gereinigt sind.

Anforderungen an die Begrenzung von Staub- und Keimemissionen aus Kompostierungs- und Vergärungsanlagen sind in der TA Luft [G4] bestimmt (Abbildung 3-1).

2.2 Geruchsemissionen

'Geruch' im hier verwendeten Zusammenhang bedeutet das Auftreten von geruchsintensiven Stoffen, die das menschliche Wohlbefinden beeinträchtigen können. Beim bio-

logischen Abbau organischer Materialien entstehen vorübergehend Stoffwechselprodukte, die ein hohes Geruchsemissionspotential aufweisen. Das Auftreten solcher Gerüche ist im Hinblick auf die Emissionen eine der Hauptursachen für Beschwerden aus der Bevölkerung.

Besonders geruchsintensive Stoffe, die im Verlauf der biologischen Abbau- und Umbauprozesse freigesetzt werden, sind Aldehyde, Alkohole, Alkane/Alkene, aromatische monozyklische Kohlenwasserstoffe, Karbonsäuren, Karbonsäureester, Ketone, sauerstoffhaltige Heterozyklen, organische Schwefelverbindungen, Terpene sowie Ammoniak.

Potentielle Geruchsquellen in Bioabfallbehandlungsanlagen sind die Anlieferung und Aufbereitung von Kompostrohstoffen, der gesamte Rottebereich (Auf- und Umsetzen von Rottekörpern, belüftete und unbelüftete Mieten in Ruhe), die Konfektionierung (Siebung) und Lagerung von Fertigprodukten, ungereinigte nasse Flächen und auf Flächen stehendes Schmutzwasser sowie das gesamte Abwassersammelsystem der Arbeitsflächen.

Der Rotteprozess kann aufgrund der Geruchsbildung in fünf Rottephasen unterteilt werden, die sich an den in diesen Phasen typischerweise entstehenden geruchsintensiven Stoffen orientieren.

Die Phasen, in der Gerüche entstehen, sind in Abbildung 2-2 zusammengestellt. Anforderungen an die Begrenzung von Geruchsemissionen aus biologischen Behandlungsanlagen sind in der TA Luft [2] bestimmt (Abbildung 3-1).

Abbildung 2-2: Phasen der Entstehung von geruchsintensiven Stoffen beim Rotteprozess

Rottephase; Temperaturbereich	Charakteristische geruchsintensive Stoffe ¹⁾	Bestimmender Geruchseindruck	Geruchsstoff- konzentration ²⁾ [GE/m ³ Abluft]	Dauer der Phase ³⁾	pH-Wert im Rotte- gut
Mesophile Startphase; 15 - 45 °C	Niedere Carbonsäuren, Aldehyde, Alkohole, Car- bonsäureester, Ketone, Terpene, auch Sulfide	alkoholisch- fruchtig bis käsig- schweißartig	6.000 - 25.000	wenige Tage bis max. eine Woche	4 - 6
Selbsterwärmungsphase; Temperaturanstieg auf 45 - 65 °C	Niedere Carbonsäuren, Aldehyde, Alkohole, Car- bonsäureester, Ketone, Terpene, auch Sulfide	alkoholisch- fruchtig bis käsig- schweißartig	Spitzenwerte > 30.000	wenige Tage bis max. eine Wo- che	4 - 6
Hochtemperaturphase; > 65 °C lokal bis zu > 70 °C	Ketone, schwefelorgani- sche Verbindungen, Ter- pene, Pyrazine, Pyridine, HDMF, auch Ammoniak	süßlich-pilzig, Heißrottegeruch, unangenehm muffig	1.000 - 9.000 bis zu > 10.000	wenige Tage bis zu mehreren Wochen	6 - > 7
Abkühlungsphase; 65 - 45 °C	Sulfide, Ammoniak, auch Terpene	muffig-stechend, ammoniakalisch	150 - 3.000	bis zu 12 Wochen	bis > 8
Reifungsphase; < 45 °C	Huminstoffe	pilzig, erdig	< 500	mehrere Wochen	> 7

¹⁾ Wesentliche charakteristische geruchsintensive Stoffe, ohne Anspruch auf Vollständigkeit. ²⁾ Literaturdaten [1; 11; 12; 14]

³⁾ Dauer der jeweiligen Phase wesentlich abhängig von dem Rotteverfahren

2.3 Gasförmige Emissionen

Gasförmige Emissionen können während des Rotteprozesses zu unterschiedlichen Zeiten und in unterschiedlichen Mengen auftreten.

2.3.1 Kohlenstoffverbindungen

2.3.1.1 Gesamtkohlenstoff (C-ges.)

Die organischen Stoffe im Abgas, ausgenommen staubförmige organische Stoffe, werden als Gesamtkohlenstoff (C-ges.) angegeben. Der Parameter Gesamtkohlenstoff umfasst die flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC) sowie den Anteil des Kohlenstoffs im Methan (CH₄-C). Er fasst damit die flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) zusammen.

2.3.1.2 Kohlendioxid (CO₂)

Kohlendioxid (CO₂) ist das Endprodukt der biologischen Oxidation und wird als solches gasförmig freigesetzt.

Da CO₂-Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung nicht fossilen Ursprungs sind, bleiben sie bei der Bilanzierung der klimarelevanten Gase unberücksichtigt (klimaneutral).

2.3.1.3 Methan (CH₄)

Methan (CH₄) ist in dem Summenparameter Gesamtkohlenstoff (C-ges.) die größte organische Einzelkomponente. Es ist geruchlos und explosionsfähig. Ein Methan-Luft-Gemisch ist im Bereich zwischen 4,4 und 16,5 % explosiv.

2.3.1.4 Flüchtige organische Verbindungen (VOC)

Die flüchtigen organischen Verbindungen (volatile organic compounds, VOC) umfassen eine Vielzahl von Stoffen, die alle ein Kohlenstoffgrundgerüst haben. Sie können die unterschiedlichsten Einwirkungen auf die Umwelt haben: Als Bildner von Photooxidantien führen sie zusammen mit Stickstoffoxiden zur Ozonbildung; darüber hinaus sind sie als Träger von geruchsintensiven und gesundheitsschädlichen Stoffen von Bedeutung.

2.3.1.5 Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC)

Die flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (non methane volatile organic compounds, NMVOC) bilden den Summenparameter für organische d.h. kohlenstoffhaltige Stoffe, die leicht verdampfen oder bereits bei geringer Temperatur als Gas vorliegen, wobei das Gas Methan (CH₄) ausgenommen wird.

Der Parameter NMVOC wird aus der Differenz von Gesamtkohlenstoff (Ges.-C) und dem Anteil des Kohlenstoffs im Methan (Methankohlenstoff, CH₄-C) ermittelt.

NMVOC entstehen zu einem wesentlichen Anteil als Stoffwechselprodukte beim aeroben und anaeroben Abbau biogener Stoffe. Darüber hinaus können sie in Spuren aus Lösemitteln und lösemittelhaltigen Stoffen freigesetzt werden.

NMVOC-Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung setzen sich hauptsächlich aus folgenden Komponenten zusammen: Schwefelverbindungen (Schwefelkohlenstoff, Dimethylsulfid, Dimethyldisulfid), Stickstoffverbindungen (basische Amine), Aldehyde (Acetaldehyd, 3-Methylbutanal), Ketone (Aceton, 2-Butanon, 2-Pentanon), Alkohole (Ethanol, 2-Propanol, 2-Butanol, 2-Methylpropano) Karbonsäuren (Methansäure, Ethansäure, Propansäure, Valeriansäure), Ester (Methylacetat, Ethylacetat), Terpene (Myrcen, α -Pinen, β -Pinen, Limonen, α -Thujon). Die vorgenannten Stoffe stellen einen Anteil von mehr als 90 % des NMVOC.

2.3.2 Stickstoffverbindungen

Gasförmige Stickstoffemissionen treten bei der aerob geführten Kompostierung während der Intensivrotte meist als Ammoniak, bei der Nachrotte oft als Lachgas (N₂O) auf. Die gasförmigen Stickstofffreisetzungen entstammen letztendlich aus dem Ab- und Umbau der organischen Substanzen der Bioabfälle. Hier ist jedoch, anders als beim Kohlenstoff, eine Umwandlungskette zu berücksichtigen, die wie folgt beschrieben werden kann:

1. Ammonifikation von organischem Stickstoff \Rightarrow [Ammoniak](#)
2. Nitrifikation von Ammoniumstickstoff (Oxidationsprozesse)
 - 2.1 Nitritation von Ammonium: \Rightarrow Nitrit (auch weiter zu 3.2)
 - 2.1 Nitratation von Nitrit: \Rightarrow Nitrat
3. Denitrifikation von Nitrat (Reduktionsprozesse)
 - 3.1 Nitratreduktase: \Rightarrow Nitrit
 - 3.2 Nitritreduktase: \Rightarrow Stickstoffmonoxid
 - 3.3 Stickstoffmonoxidreduktase: \Rightarrow [Distickstoffmonoxid](#) (Lachgas)
 - 3.4 Distickstoffmonoxidreduktase: \Rightarrow Stickstoff (N₂)

Die klimarelevanten gasförmigen Stickstoffverbindungen sind unterstrichen und werden im folgenden beschrieben.

2.3.2.1 Ammoniak (NH₃)

Ammoniak (NH₃) wird beim Abbau organischer Stickstoffverbindungen durch den Prozess der Ammonifikation gebildet.

Ammoniak entsteht bei der mikrobiologischen Zersetzung von organischen Stickstoffverbindungen wie Eiweiß oder Harnstoff. Es steht in einem vom pH-Wert und der Rottegutfeuchte abhängigen Gleichgewicht zum Ammonium-Ion (NH₄⁺). Die Emissionen an Ammoniak erhöhen sich bei einem Anstieg des pH-Wertes > 7, bei Temperaturen > 45 °C oder bei hohen Belüftungsraten und sinken bei vergleichsweise hohen C/N-Verhältnissen.

Eigenschaften von Ammoniak:

- Ammoniak ist flüchtig, so dass ein Teil durch Verdampfen, insbesondere aus stark alkalischen Materialien, in die Atmosphäre gelangen kann, bemerkbar aufgrund des stechenden salmiakartigen Geruchs von Ammoniak.
- Ammoniak existiert bei etwa neutralem pH-Wert und ausreichender Feuchte in Form des Ammoniumions (NH₄⁺).
- Ammoniak löst sich in Wasser unter Einstellung eines Gleichgewichts
- NH₃ + H₂O ↔ NH₄⁺ + OH⁻, das vom pH-Wert abhängt und sich mit sinkendem pH-Wert nach rechts in Richtung der in Wasser gelösten Phase verschiebt.
- Ammoniak bzw. Ammoniumionen (NH₄⁺) sind kationisch und werden aufgrund ihrer positiven Ladung stark an negativ geladene Tonminerale absorbiert.

Die Anforderungen an gasförmige Emissionen der Stoffe Gesamtkohlenstoff und Ammoniak sind in der TA Luft [G4] festgelegt (Abbildung 3-1).

2.3.2.2 Lachgas, Distickstoffoxid (N₂O)

Lachgas (N₂O) kann sowohl unter aeroben als auch unter anaeroben (anoxischen) Milieubedingungen entstehen.

Lachgas kann sich unter aeroben Verhältnissen bilden, wenn Ammonium (NH₄⁺) vorliegt bzw. freigesetzt wird. Ammonium wird im Rottegut aus der Umwandlung von Eiweißen gebildet.

Das Ammonium wird bei Temperaturen unter etwa 45 °C und bei Anwesenheit von Luftsauerstoff zu Nitrit (NO₂) und Nitrat (NO₃) oxidiert

(Nitrifikation). Während der NO₂-Bildung kann es zu N₂O-Emissionen kommen, insbesondere wenn sich NO₂ akkumuliert..

Anoxische Bedingungen liegen vor, wenn kein freier Sauerstoff, sondern Sauerstoff lediglich in gebundener Form beispielsweise in Form von Nitrat (NO₃⁻) vorhanden ist. NO₃⁻ dient vielen Mikroorganismen als Sauerstoffquelle (anaerobe Atmung), um Kohlenstoffverbindungen zu oxidieren. Sofern der gesamte Sauerstoff zur Oxidation benutzt wird, entsteht elementarer Stickstoff (N₂), der nicht klimawirksam ist (Denitrifikation). In der Regel wird jedoch nicht der gesamte Sauerstoff des NO₃⁻ genutzt, so dass N₂O entsteht (unvollständige Denitrifikation) und in die Atmosphäre entweichen kann.

2.4 Klimawirksamkeit von Treibhausgasen

Als klimarelevante Gase gelten im wesentlichen Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). Eine indirekte Klimawirkung entfaltet auch Ammoniak (NH₃), da etwa ein Tausendstel des emittierten Ammoniaks (NH₃) in der Atmosphäre zu Lachgas (N₂O) umgesetzt wird.

Obgleich Kohlendioxid (CO₂) zu den wichtigsten in die Atmosphäre emittierenden anthropogenen Treibhausgasen zählt, wird es im Zusammenhang mit der Freisetzung aus biogenen Materialien als klimaneutral eingestuft, weil die aus Bioabfällen freigesetzte Menge an CO₂ der Menge CO₂ entspricht, die zuvor von Pflanzen aus der Umwelt entnommen und in ihre organische Substanz eingebaut wurde.

Abbildung 2-3: GWP-Werte der klimawirksamen Gase Kohlendioxid, Methan und Lachgas (für einen Zeitraum von 100 Jahren)

	GWP-Werte		
	SAR, 1996 ¹⁾	TAR, 2001 ²⁾	AR4, 2007 ³⁾
Kohlendioxid (CO₂)	1	1	1
Methan (CH₄)	21	23	25
Lachgas (N₂O)	310	296	298

GWP-Werte gemäß Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [8]. ¹⁾ Second Assessment Report (SAR), 1996. ²⁾ Third Assessment Report (TAR), 2001. ³⁾ Fourth Assessment Report (AR4), 2007

Zur Quantifizierung der Klimawirksamkeit der verschiedenen Treibhausgase werden die freigesetzten Mengen nach ihrem unter-

schiedlich hohen klimawirksamen Potenzial gewichtet. Als Wichtungsgröße wird das so genannte GWP (Global Warming Potential) verwendet. Kohlendioxid ist dabei die Referenzsubstanz, so dass der GWP-Wert von Kohlendioxid (CO₂) gleich Eins gesetzt wird (Abbildung 2-3). Nachfolgende Angaben beziehen sich auf die Angaben des Fourth Assessment Reports (AR4, 2007).

2.5 Ergebnisse von Emissionsmessungen

Im Zusammenhang mit der Emissionsberichterstattung Deutschlands zur Klimarahmenkonvention und dem Kyoto-Protokoll hat das Umweltbundesamt (UBA) Untersuchungen zur quantitativen Einschätzung klimarelevanter Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung veranlasst.

Im Ergebnis wurde gezeigt, dass die Emissionen der Kompostierung deutlich niedriger sind als bislang angenommen. Bezogen auf die Summe emittierter CO₂-Äquivalente in Deutschland beträgt der Beitrag aus der getrennten Sammlung und Verwertung von Bioabfällen nur 0,05 %.

Die Bundesgütegemeinschaft Kompost hat darauf hin bei 'Gewitra' eine Studie in Auftrag gegeben, mit dem Ziel, auf Basis bestehender Erkenntnisse, Möglichkeiten der Vermeidung von Klimagasemissionen zu beschreiben.

Bei den Untersuchungen werden hauptsächlich folgende Verfahren betrachtet:

- Geschlossene und teilgeschlossene Kompostierungsanlagen (inkl. Kompostierung unter semipermeablen Membranen)
- Offene bzw. offen/überdachte Kompostierungsanlagen

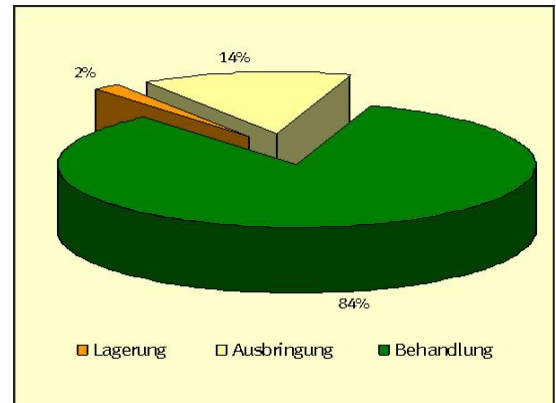
In Anlehnung an die Richtlinie VDI 3475 Blatt I und Blatt 2 [T5] können sowohl geschlossene Anlagen als auch offene bzw. offen/überdachte Anlagen dem Stand der Technik entsprechen. Neben den hauptsächlichen klimarelevanten Gasen Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) wurden auch Emissionen von Ammoniak (NH₃) und NMVOC (nicht methanhaltige organische Verbindungen) untersucht.

Die Emissionsfaktoren der Bioabfallverwertung wurden für die Bereiche Behandlungsprozess bzw. die Behandlungstechnik, sowie für die Lagerung und Anwendung der erzeugten Komposte als Dünge- und Bodenverbesserungsmittel jeweils separat abgeleitet. Der überwiegende Anteil der Emissionen (84 %) stammt aus dem Behandlungsprozess (Abbildung 2-4).

Bei den aus dem Behandlungsprozess stam-

menden Emissionen wurden der Gesamtkohlenstoff (C-ges.), Methan (CH₄), Lachgas

Abbildung 2-4: Anteil der Emissionen bei Behandlung, Lagerung und Ausbringung von Bioabfällen [6]



(N₂O), Ammoniak (NH₃) sowie flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) untersucht. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 2-5 bis 2-10 zusammengestellt.

Die in den Abbildungen 2-5 bis 2-10 dargestellten Mittelwerte beziehen sich auf die nachfolgend genannten Verfahrenstypen V1 bis V6:

- V1 Geschlossene Kompostierung
- V2 Teilgeschlossene Kompostierung
- V3 Kompostierung unter semipermeabler Membran
- V4 Offene Kompostierung von Bioabfällen (Biotonne) zusammen mit Grünabfällen
- V5 Offene Kompostierung von Grünabfällen

Die in den Säulen der Abbildungen befindlichen Striche geben die Spannweiten der Messergebnisse wieder, die bei Untersuchungen verschiedener Anlagen des gleichen Verfahrenstyps festgestellt worden sind.

Dabei zeigt sich, dass die Unterschiede innerhalb der Verfahren größer sind, als die Unterschiede zwischen den Verfahren. Für die Kompostierung bedeutet dies, dass es bei den klimarelevanten Gasen bezüglich der Höhe der zu erwartenden Emissionen nicht so sehr auf das eingesetzte Verfahren selbst, sondern vielmehr darauf ankommt, dass in der Prozessführung jeweiligen Verfahrens darauf hingewirkt wird, dass die Prozessbedingungen so eingestellt und gesteuert werden, dass klimawirksame Emissionen, insbesondere von Methan und Lachgas, erst gar nicht entstehen, bzw. auf ein unvermeidliches Maß reduziert werden.

Die damit angesprochene Relevanz einer gu-

ten Betriebs- und Rotteführung ist bei der Vermeidung von Klimagasemissionen auch deshalb besonders relevant, weil technische Maßnahmen wie Abluftfassung und Reinigung über Biofilter in Bezug auf Methan und Lachgas praktisch wirkungslos sind. Entscheidend für die Vermeidung vermeidbarer Klimagasemissionen sind daher die Prozessbedingungen im Rottekörper, der Material-

mix, die Strukturstabilität, die Porenvolumina für Luft und Wasser und die Sauerstoffversorgung

Abbildung 2-5: Durchschnittliche Emissionsfaktoren an Gesamtkohlenstoff (Ges.-C) bei der Verwertung von Bioabfällen in Abhängigkeit von dem eingesetzten Verfahren (V 1-5)

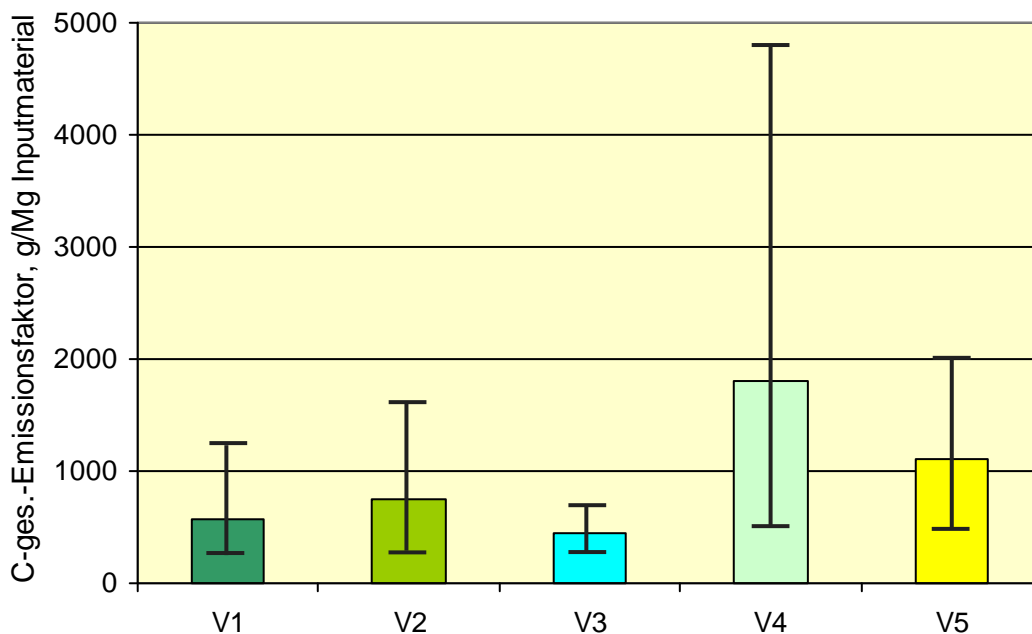


Abbildung 2-6: Durchschnittliche Emissionsfaktoren an Methan (CH₄) bei der Verwertung von Bioabfällen in Abhängigkeit von dem eingesetzten Verfahren (V 1-5)

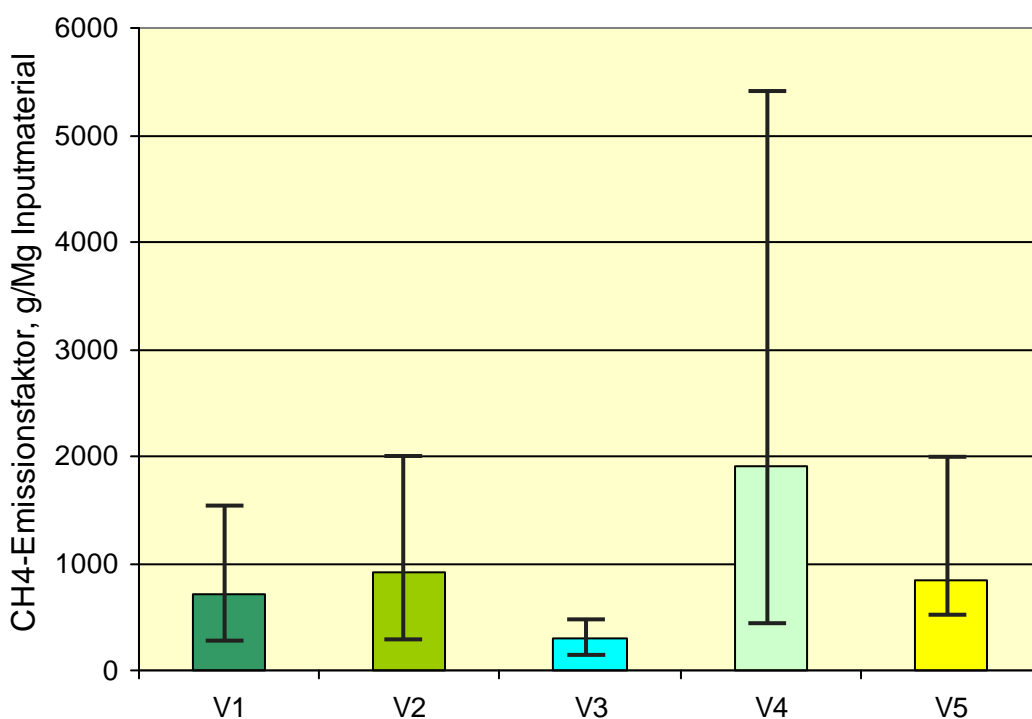


Abbildung 2-7: Durchschnittliche Emissionsfaktoren an Lachgas (N_2O) bei der Verwertung von Bioabfällen in Abhängigkeit von dem eingesetzten Verfahren (V1-5)

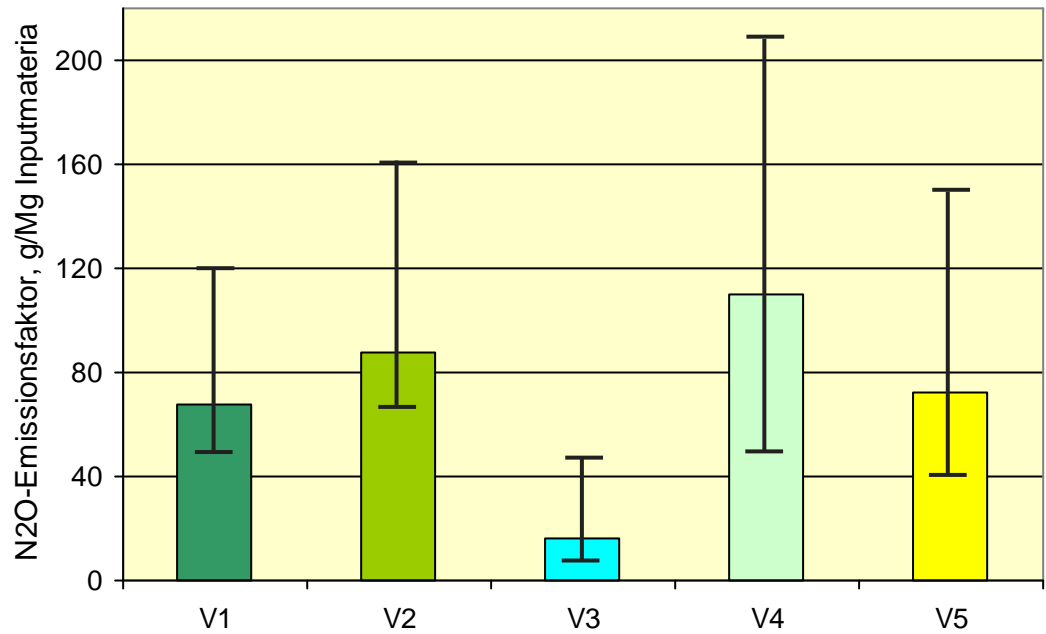


Abbildung 2-8: Durchschnittliche Emissionsfaktoren an Ammoniak (NH_3) bei der Verwertung von Bioabfällen in Abhängigkeit von dem eingesetzten Verfahren (V 1-5)

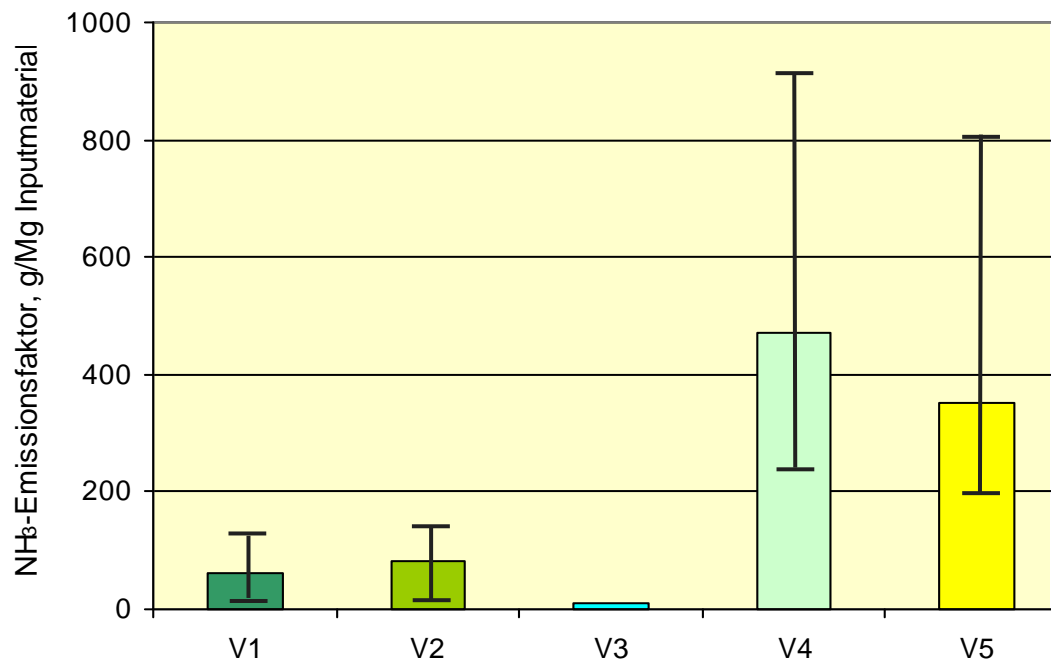


Abbildung 2-9: Durchschnittliche Emissionsfaktoren an flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC) bei der Verwertung von Bioabfällen in Abhängigkeit von dem eingesetzten Verfahren (V 1-5)

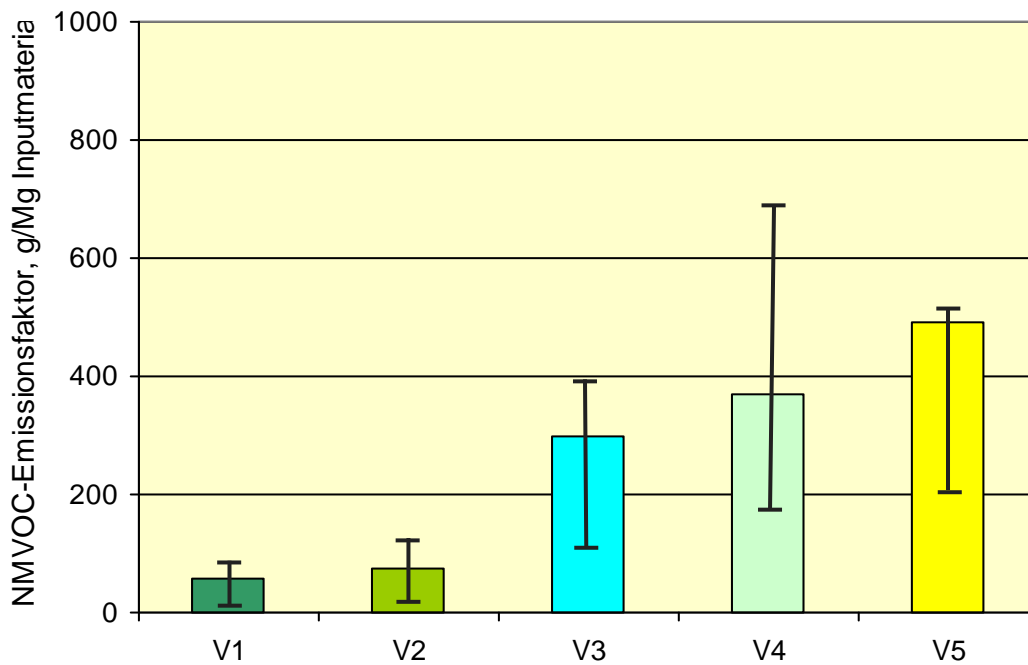
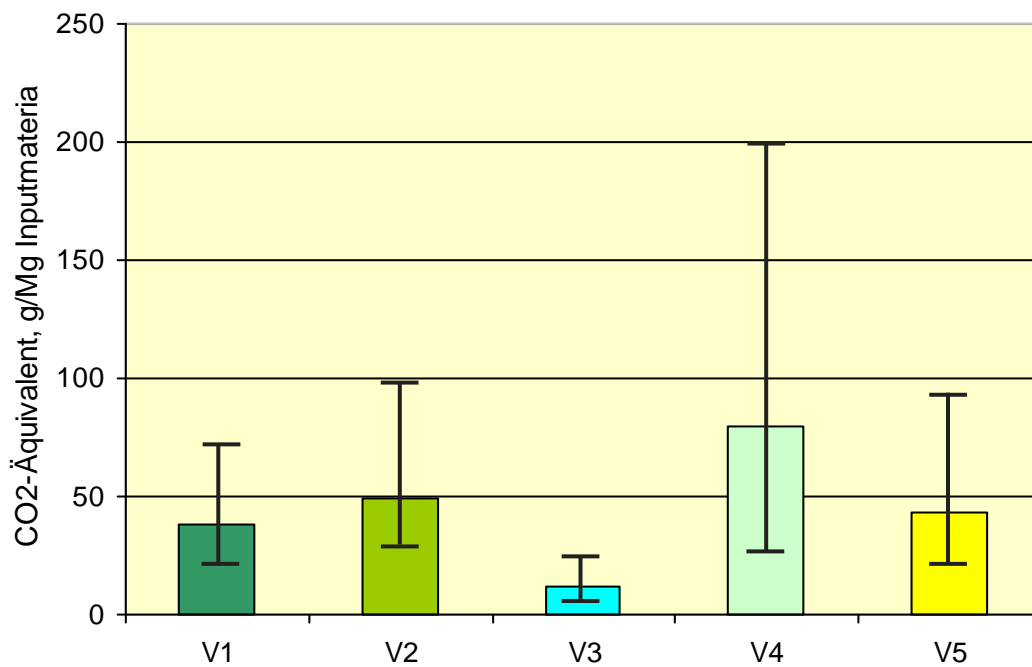


Abbildung 2-10: Durchschnittliche Kohlendioxidäquivalente (CO₂-Äq.) bei der Verwertung von Bioabfällen in Abhängigkeit von dem eingesetzten Verfahren (V 1-5)



3. Rechtsbestimmungen und Regelwerke

Rechtsbestimmungen und Regelwerke der Bioabfallbehandlung sind v.a. von immissionsschutzrechtlichen Anforderungen geprägt. Daher erfolgt die Genehmigung solcher Anlagen mit einer Durchsatzleistung von mehr als 3.000 Mg/a nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG [G1]) und dessen Verordnungen (BImSchV). Das BImSchG definiert auch den in diesem Zusammenhang einzuhaltenden Stand der Technik.

Einen wesentlichen Baustein findet dies in der 'Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft' (TA Luft) [G4]. Die dort enthaltenen Bestimmungen begrenzen v.a. mögliche Geruchs-Emissionen. Zu diesem Zweck werden Grenzwerte und technische Maßnahmen wie die Einhausung von Anlagenbereichen bestimmt, bei denen in Abhängigkeit von der Ausbaugröße der Anlage von höheren Emissionen auszugehen ist.

Als Stand der Technik der biologischen Abfallbehandlung (Kompostierung, Vergärung) gelten die Ausführungen, mit denen die Ausgestaltung der Anlagentechnik in der VDI-Richtlinie 3475 „Emissionsminderung Biologische Abfallbehandlungsanlagen“ beschrieben sind [T4; T5].

Die Ausführungen hinsichtlich einer emissionsarmen Gestaltung des aeroben Rotteprozesses bleiben allerdings recht allgemein. Es wird vorrangig auf technische Aspekte wie Kapselung, Umsetzen, Belüftung und Abluftreinigung orientiert. Die Einstellung von Bedingungen im Rottegut, die den Mikroorganismen optimale Bedingungen bieten, steht eher im Hintergrund.

Maßnahmen der Konditionierung des Rottegutes im Sinne der Optimierung von Milieubedingungen, bei denen die Mikroorganismen optimale Bedingungen vorfinden und eine stabile aerobe Rotte gewährleistet ist, ist im Hinblick auf Emissionen ebenso so relevant wie reine technische Maßnahmen der Fassung und Behandlung von Abgasen.

Für die klimarelevanten Gase CH₄ und N₂O gilt dies in besonderer Weise, da sie bei der üblichen Abluftreinigung in Biofiltern praktisch nicht vermindert werden.

In diesem Zusammenhang kann auch auf die Richtlinie "Stand der Technik der Kompostierung" des österreichischen Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft hingewiesen werden. Dort sind die betrieblichen Belange für einen emissionsarmen Betrieb recht ausführlich beschrieben [1].

3.1 TA Luft

Die 'Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft' (TA Luft) [G4] legt für Kompostierungsanlagen ('Anlagen zur Erzeugung von Kompost aus organischen Abfällen') und für Vergärungsanlagen ('Anlagen zur Vergärung von Bioabfällen und Anlagen, die Bioabfälle in Kofermentationsanlagen mitverarbeiten') Emissionsanforderungen an Gesamtstaub und an geruchsintensive Stoffe im Abgas fest. Darüber hinaus wird auf Prüfungen von Emissionen an Keimen und Endotoxinen hingewiesen.

Abbildung 3-1: Emissionsanforderungen an Kompostierungs- und Vergärungsanlagen gemäß der TA Luft

Emissionsart	Massenstrom	Massenkonzentration bzw. Geruchsstoffkonzentration	Anforderung gemäß TA Luft
Gesamtstaub	---	10 mg/m ³	Nr. 5.4.8.5 Kompostierungsanlagen Nr. 5.4.8.6.1 Vergärungsanlagen
Geruchsintensive Stoffe	---	500 GE/m ³	Nr. 5.4.8.5 Kompostierungsanlagen, Durchsatz ³ 10.000 Mg/a Nr. 5.4.8.6.1 Vergärungsanlagen, Durchsatz ³ 30 Mg/d
Gesamtkohlenstoff	0,50 kg/h	50 mg/m ³	Nr. 5.2.5 Organische Stoffe
Ammoniak	0,15 kg/h	30 mg/m ³	Nr. 5.2.4 Gasförmige anorganische

3.2 VDI-Richtlinie 3475

Die VDI-Richtlinie 3475 Blatt 1 [T4] beschreibt Anlagen mit einer Anlagenkapazität von mehr als 6.000 Mg/a, die VDI-Richtlinie 3475 Blatt 2 Anlagen mit einer Anlagenkapazität von bis zu 6.000 Mg/a (i.d.R. offene Mietenkompostierung) [T5].

3.3 Anlagengenehmigung

Die in den jeweiligen Genehmigungen von Kompostierungs- und Vergärungsanlagen gestellten Emissionsanforderungen betreffen im wesentlichen Geruchsemissionen. Aber auch Staub- und Lärmemissionen werden im Genehmigungsverfahren nach dem BImSchG abgeprüft. Weitergehende Anforderungen an gasförmige Emissionen sind in der Regel nicht bestimmt.

4. Entstehung und Vermeidung klimarelevanter Gase

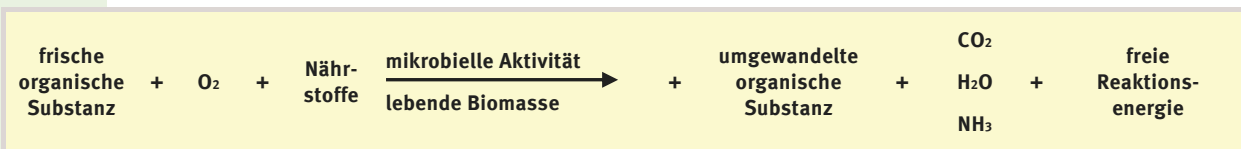
4.1 Grundlagen der aeroben Bioabfallbehandlung (Kompostierung)

Kompostierung ist die Bezeichnung für einen aerob geführten mikrobiologischen Abbau, Umbau und Aufbau biogener Materialien (Kompostrohstoffe), die unterschiedlich stark mit Mineralstoffen vermischt sind.

Lebensgrundlage der Mikroorganismen sind die in den Ausgangsmaterialien enthaltenen Nährstoffgehalte, wobei dem organischen Kohlenstoff und dem Stickstoff eine besondere Bedeutung zukommt. Während Kohlenstoff den Mikroorganismen als grundlegende Energiequelle dient, wird Stickstoff von den

mophile Mikroflora wechselt zu einer mesophilen Mikroflora. Die mesophilen Mikroorganismen fördern den Abbau der schwerer abbaubaren Stoffe wie Zellulose. In dieser Phase der Nachrotte, die über mehrere Wochen bis Monate andauern kann, kommt es zur allmählichen Reifung des Kompostes, bei der auch schwer abbaubare Ausgangssubstanzen umgewandelt werden und hochmolekulare, weitgehend abbaustabile Humusverbindungen entstehen.

Verallgemeinert lässt sich der Stoffumsatz bei der aeroben Bioabfallbehandlung durch folgende Reaktionsgleichung beschreiben:



Mikroorganismen als Baustein zur Proteinsynthese benötigt. Einen großen Einfluss auf die mikrobiellen Prozesse haben weiterhin die Verfügbarkeit von Sauerstoff und von Wasser im Rottegut.

Beim Abbau organischer Substanzen fallen Polymere in Form von Proteinen, Lipiden, Kohlenhydraten, Cellulose, Hemicellulosen, Lignine, Cutine, Suberine oder Wachsen an. Der größte Teil ihrer Polymere wird depolymerisiert, mineralisiert oder dient dem Neuaufbau organischer Polymerverbindungen. Dem pflanzlichen Lignin kommt eine besondere Rolle zu. Lignin gibt den Pflanzen mechanische Festigkeit und schützt gegen mikrobiellen Angriff. Entsprechend widerstandsfähig ist es im Rotteprozess.

Leicht abbaubare organische Substanzen wie Kohlenhydrate, Fette und Proteine werden relativ schnell und weitgehend zu Kohlendioxid und Wasser umgesetzt. Die in der ersten Phase der Rotte mit intensiven Stoffwechselforgängen frei werdende Reaktionsenthalpie (Wärme) führt zu einem Temperaturanstieg auf Werte von 60 bis zu 80°C. Die erste Phase der Kompostierung bis zum Abklingen des Temperaturmaximums wird daher als Hauptrotte oder Intensivrotte bezeichnet. Durch die Selbsterwärmung werden human-, veterinär- und phytopathogene Keime abgetötet - die Bioabfälle also hygienisiert.

Nach dem Abbau der leicht abbaubaren Stoffe sinkt die Rottetemperatur und die ther-

Die mikrobiellen Abbauprozesse gehen mit Verlusten an organischer Trockenmasse einher, die v.a. durch gasförmige Austräge gekennzeichnet sind. Im Rottekörper enthaltene Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen werden in Abhängigkeit von der jeweiligen Sauerstoffversorgung unterschiedlich stark oxidiert.

So können gasförmige Kohlenstoffverbindungen entstehen, die von (stark oxidiertem) Kohlendioxid bis (stark reduziertem) Methan reichen sowie höherkettige geruchsintensive Stoffe (auch mit Stickstoffanteilen), die bei den gasförmigen Stickstoffverbindungen von unterschiedlich stark oxidierten Stickoxiden bis stark reduziertem Ammoniak reichen.

Die mit den oxidativen Stoffwechselprozessen einhergehende Wärme und Gasfreisetzung (CO_2) erhöht sowohl den Partialdruck der Gase im Rottekörper als auch das Temperaturgefälle zwischen dem Rottekörper und der Außentemperatur. Um eine aerobe Rottführung aufrecht zu erhalten, ist ein permanenter Gasaustausch (CO_2 / O_2) erforderlich, der das für die oxidativen Stoffwechselprozesse erforderliche Sauerstoffangebot im Rottekörper gewährleistet.

Die Bildung von Methan findet bei einer konsequent aeroben Rotteprozessführung nicht statt. Das entspricht dem Idealfall bei der Kompostierung, der jedoch in einem räumlich gegliederten Rottekörper praktisch nicht erreichbar ist. Diese räumliche Gliederung be-

zieht sich auf unterschiedliche Abstände jedes einzelnen Punktes im Rottekörper zur Außenluft bzw. zum Luftertragsbereich als Sauerstoffquelle, auf kleinräumige Unterschiede in der Porosität des Rottegutes (Groporen, Mittelporen, Feinporen) mit voneinander abweichender Wasserfüllung (Feinporen > Mittelporen > Groporen) und auf kleinräumige Unterschiede in der Abbaubarkeit der organischen Materialien.

Methan wird durch mikrobiologische Anaerobier gebildet, wenn Sauerstoff in Mangel gerät. Der Sauerstoffverbrauch der für die Kompostierung typischen mikrobiologischen Aerobier wird dabei größer als die Sauerstoffzufuhr durch Gasaustausch mit angrenzenden Rottekörperzonen bzw. -punkten. Wegen der oben geschilderten räumlichen Gliederung des Rottekörpers geschieht dies räumlich stark differenziert. In feinporigen Aggregaten mit hohem Anteil an leicht abbaubarer organischer Substanz und großer Entfernung zur Sauerstoffquelle setzen diese Prozesse früher ein als direkt neben Groporen, die meist durch abbaustabiles Strukturmaterial gebildet werden und sich noch dicht an der Sauerstoffquelle befinden. So können das Auftreten eines anaeroben Milieus und damit die Entstehung von Methan räumlich stark differenziert mit einem allgemeinen zunehmenden Trend in Richtung größerer Abstände zur Sauerstoffquelle verstanden werden.

Häufig finden im Rottekörper sowohl aerobe als auch anaerobe Prozesse vergesellschaftet statt. Dann finden fakultativ mikrobiologische Anaerobier beste Entwicklungsbedingungen, die sowohl unter Sauerstoffmangel

reduktiven als auch unter Sauerstoffzufuhr oxidativen Stoffwechsel betreiben können. Wesentlich für die Gewährleistung aerober Rottebedingungen ist, dass

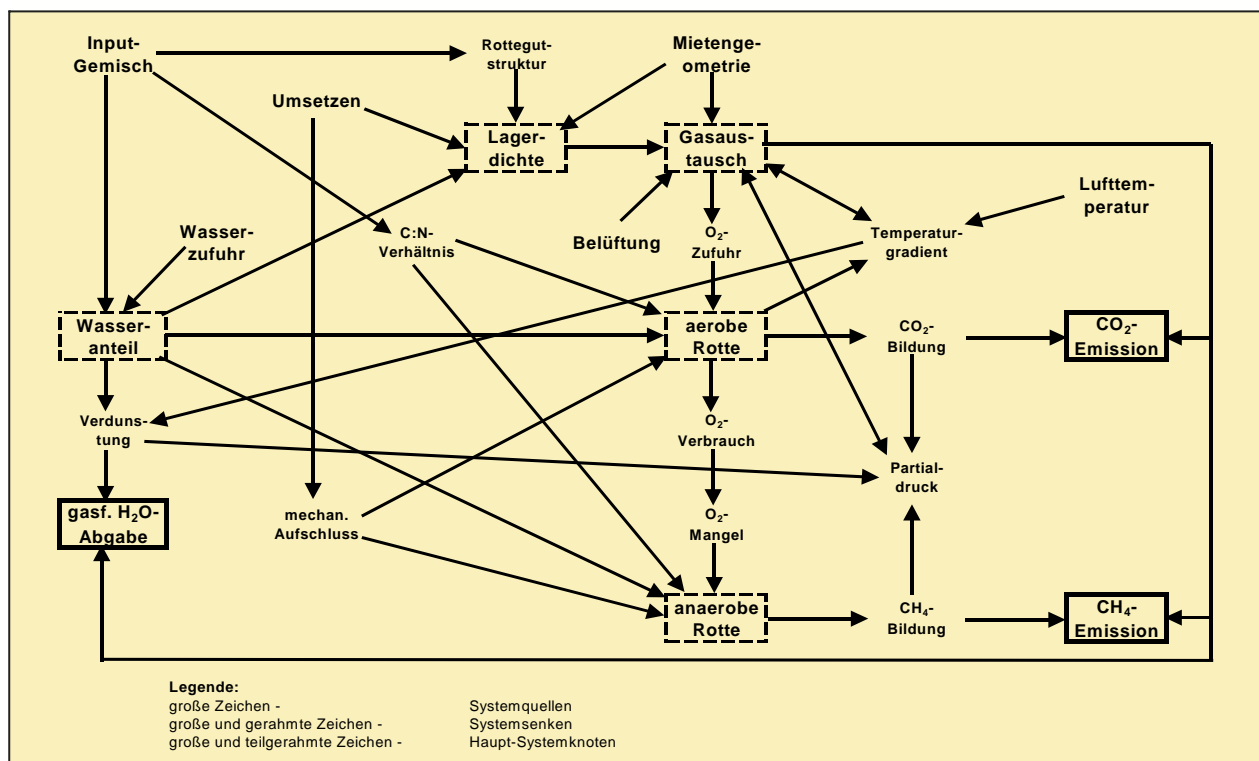
- die Rottekörper nicht zu großvolumig sind (v.a bzgl. der Höhe)
- eine gute Luftdurchlässigkeit (hohe Porosität ohne Vernässung) gegeben ist,
- das Rottegut homogen gemischt ist und
- leicht abbaubare organische Materialien nicht im Überschuss enthalten sind.

Für die Emission von einmal gebildetem Methan sind zudem noch die Einflüsse auf dessen Weg zur Luftkontaktfläche des Rottekörpers zu berücksichtigen. Neben der Intensität des Gasaustausches im Rottekörper und der Entfernung der Methanquelle zur Luftkontaktfläche werden hier mögliche Methanoxidationen in den besser sauerstoffversorgten Außenbereichen des Rottekörpers wirksam.

Die Zusammenhänge der Entstehung und Emission der hauptsächlich gasförmigen Kohlenstoffverbindungen Kohlendioxid und Methan bei der biologischen Bioabfallbehandlung sind in Abbildung 4-1 veranschaulicht.

Die aufgezeigten Zusammenhänge lassen erkennen, welche Faktoren den Prozess hauptsächlich beeinflussen. Solche Systemquellen sind die Witterung (Wärme, Wasserezusatz), das Inputgemisch, die Mietengeometrie, das Umsetzen und die Belüftung. Über gezielte Kombinationen dieser Faktoren kann der Anlagenbetreiber den Rotteprozess weitgehend gestalten.

Abbildung 4-1: Zusammenhänge der Entstehung und Emission gasförmiger Kohlenstoffverbindungen (Kohlendioxid und Methan) bei der Bioabfallbehandlung [15]



In schwer abbaubaren organischen Verbindungen (z. B. Lignine, Humine, carbonisierte (inkohlte) organische Substanzen) ist Kohlenstoff dominant. Abbaustabile organische Substanzen weisen einen zunehmenden C_{org} -Gehalt in der organischen Trockenmasse auf (pflanzliche Biomasse 35 bis 55 %; Torfe und Komposte 55 bis 65 %; Braun- und HTC-Kohle 65 bis 75 %; Stein- und Holzkohle 75

(>20:1) des Rottegemischs. Stickstoff befindet sich hier im Mangel und fließt in die Umwandlungsprozesse leicht abbaubarer Biomasse zu abbaustabilen humusähnlichen Stoffen ein. Gasförmige Freisetzungen werden damit vermieden.

Ammoniak, Nitrat, Nitrit und Lachgas sind im Wasseranteil von Bioabfällen gut löslich und damit bioverfügbar (Ammoniak und Lachgas im Gleichgewicht mit gasförmigen Zuständen). Treten Ammoniak und Lachgas im Überschuss auf, werden sie aus der wässrigen Lösung als Gas freigesetzt. Ammoniak, die Stickstoffoxide und reiner Stickstoff können bei freiem Gasaustausch in die Atmosphäre entweichen.

Von besonderer Bedeutung für die Rotteprozesse ist das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N-Verhältnis) im Rottegut, wobei die Bioverfügbarkeit beider Elemente eine wesentliche Rolle spielt. Vor allem der Kohlenstoff muss für eine mikrobiologische Wirksamkeit des C/N-Verhältnisses in einem umsetzbaren Zustand sein. Unter dieser Bedingung werden die N-Verluste durch das C/N-Verhältnis der Kompostrohstoffe

bestimmt (Abbildung 4-3).

Als Richtwert kann ein C/N-Verhältnis in dem Rottegemisch (Kompostausgangsmaterialmischung) von 25 bis 35 angegeben werden [1].

Das C/N-Verhältnis von frisch aufgesetztem Material soll den Wert von 20 nicht unterschreiten, um die Freisetzung von Stickstoff zu vermeiden und den Wert von 40 nicht

Abbildung 4-2: Umwandlungsprozesse von organisch gebundenem Stickstoff bei der Kompostierung

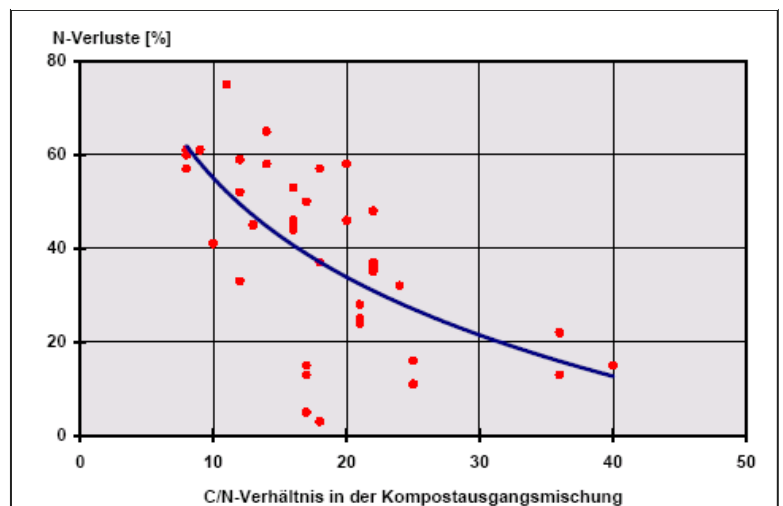
Prozess	Produkt	Art des Prozesses
Ammonifikation von organisch gebundenem Stickstoff	Ammoniak (NH ₃) Ammonium (NH ₄)	aerob und/oder anaerob
Nitrifikation von Ammonium-(NH ₄) Stickstoff (Oxidationsprozesse)		aerober Prozess
a) Nitritation von Ammonium	Nitrit	
b) Nitratation von Nitrit	Nitrat (NO ₃)	
Schrittweise Denitrifikation von Nitrat (Reduktionsprozesse)		abgestuft anaerober Prozess
a) Nitratreduktase	Nitrit	
b) Nitritreduktase	Stickstoffmonoxid (NO)	
c) Stickstoffmonoxidreduktase	Lachgas (N ₂ O)	
d) Distickstoffmonoxidreduktase	Stickstoff (N ₂)	

bis 85 %). Ab einem C_{org} -Gehalt in der organischen Trockenmasse von über 65 % kann eine so hohe Umsatzträgheit der organischen Substanz vorausgesetzt werden, dass diese organischen Verbindungen kaum noch an aeroben Rotteprozessen teilhaben können. Für anaerobe Rotteprozesse (Vergärung) liegt diese Grenze wahrscheinlich unter 45 %.

Anders als beim Kohlenstoff, ist bei den stickstoffhaltigen Emissionen eine Prozesskette zu berücksichtigen, die in Abbildung 4-2 zusammengefasst ist. Beim Abbau stickstoffhaltiger organischer Verbindungen wird ein Teil des Stickstoffs zu Ammonium (NH₄) umgewandelt. Dieser wird entweder von Mikroorganismen direkt assimiliert, oder über Nitrit zu Nitrat oxidiert.

Die Assimilation (Aufnahme) löslicher bioverfügbarer Stickstoffverbindungen durch die im Rotteprozess agierenden Mikroorganismen geschieht vor allem bei weiten C:N-Verhältnissen

Abbildung 4-3: Freisetzung von Stickstoff (Stickstoffverluste) während der Kompostierung in Abhängigkeit von dem C/N-Verhältnis des Rottegemisches [6]



überschreiten, um eine Hemmung der mikrobiologischen Aktivität zu vermeiden.

Im Rotteprozess nähert sich das C/N-Verhältnis mit zunehmendem Rottegrad dem C/N-Verhältnis von Bodenumus (etwa 10/1) an. In der Regel weisen Fertigkomposte ein C/N-Verhältnisse um 15/1 auf.

4.2 Verfahrensbereiche der Kompostierung

Die bei der Bioabfallverwertung zu erwartenden Emissionen sind sowohl von den Ausgangsmaterialien als auch von der Art des Behandlungsverfahrens, der Gestaltung der einzelnen Verfahrensschritte, der Konzeption und Auslegung der Belüftung sowie von der gesamten Betriebsweise der Anlage abhängig.

Abbildung 4-4 gibt eine Übersicht über die bei der Bioabfallverwertung anzutreffenden Anlagentypen und Verfahrensbereiche.

Abbildung 4-4: Übersicht über die bei der Kompostierung anzutreffenden Anlagentypen und Verfahrensbereiche

Kompostierung (Anlagentypen)
<ul style="list-style-type: none"> • Geschlossene Anlagen • Teilgeschlossene Anlagen • Offene und offen überdachte Anlagen • Offene und offen überdachte Anlagen mit Mietenabdeckungen durch semipermeable Membran

Verfahrensbereiche der Kompostierung

Annahme und Aufbereitung

- Bunkerung und Voraufbereitung bestimmter Ausgangsmaterialien
- Pufferspeicher für Strukturmaterial
- Aufsetzen von Rottegemisch

Behandlung der Bioabfälle

- Aerobe Hauptrotte / Intensivrotte
- Umsetzungen, Belüftung
- Abluftreinigung
- Aerobe Nachrotte

Endprodukte

- Konfektionierung
- Lagerung Fertigprodukte

4.2.1 Annahme und Aufbereitung der Bioabfälle zur Kompostierung

Im Bereich der Anlieferung erfolgt die Annahme mit Kontrolle der Zulässigkeit und Eignung der zur biologischen Behandlung angelieferten Materialien. Angelieferte Bioabfälle (Biotonne) und Grünabfälle können im Jahresverlauf nach Art, Menge und Zusammensetzung erheblich variieren.

Nasse Bioabfälle (Biotonne) sind in der Regel strukturarm und geruchsintensiv. Dies trifft v.a. im Winter zu, wenn in den Haushalten keine Gartenabfälle anfallen und mit der Biotonne hauptsächlich organische Küchenabfälle erfasst werden.

Strukturarme Bioabfälle wie Biotonneninhalte müssen aufgrund ihrer geringen Lagerfähigkeit (hoher Wassergehalt, Sickerwasser, Neigung zu schneller Fäulnis) nach ihrer Anlieferung unverzüglich verarbeitet werden. Durch die unverzügliche Verarbeitung werden Geruchsemissionen, die in diesem Verfahrensbereich erheblich sein können, begrenzt. Vermindert wird auch die Entstehung von Sickerwasser, welches ebenfalls zu deutlichen Geruchsemissionen beitragen kann. Emissionen an Methan und Ammoniak können durch eine unverzügliche Verarbeitung der Bioabfälle in diesem Verfahrensbereich ebenfalls begrenzt werden.

Bei den geschlossenen Verfahren erfolgt die Annahme und Aufbereitung der Bioabfälle in geschlossenen Hallen. Gerüche und andere gasförmige Emissionen werden hier gefasst und einer geeigneten Behandlung zugeführt (Kapitel 4.3.5.3).

Grünabfälle sind in der Regel strukturhaltig. Dies trifft v.a. dann zu, wenn holzige Anteile gegenüber krautigen Anteilen wie z.B. Rasenschnitt oder Langgras deutlich überwiegen.

Strukturhaltige Bioabfälle wie holzreiches Grüngut fallen meist saisonal an (Herbst- und Winterschnitt von Gehölzen). Sie sind aufgrund geringer Wassergehalte und großem Luftporenvolumen und damit verbundener geringer Neigung zu Fäulnis eine bestimmte Zeit lagerfähig.

Eine Vorratshaltung strukturreicher Materialien wird empfohlen, um in Zeiten, in denen hauptsächlich strukturarme Bioabfälle angeliefert werden, bei der Herstellung von Rottegemischen ausreichende Mengen an strukturstabilen Stoffen als Mischkomponente zur Verfügung zu haben. Darüber hinaus sind strukturhaltige holzige Materialien mit ihrem vergleichsweise weiten C/N-Verhältnis geeignet, das C/N-Verhältnis im Rottegemisch zu erhöhen (Kapitel 4.3.3.3).

Die Aufbereitung der Abfälle dient zum einen der Abtrennung von Fremdstoffen (Siebung,

Magnetscheidung) und zum anderen der Herstellung eines homogenen Rottegemisches.

4.2.2 Behandlung der Bioabfälle

Zweck der Kompostierung von Bioabfällen ist,

- a) die Hygienisierung der Bioabfälle (Behandlung zur Hygienisierung) durch Selbsterwärmung,
- b) der Ab-, Um- und Aufbau organischer Substanzen von unterschiedlichen Ausgangsstoffen zu weitgehend homogenen, differenziert abbaustabilen Rotteprodukten (Humifizierung) sowie im Zuge dessen
- c) die Herstellung hochwertiger Komposte, die als Dünge- und Bodenverbesserungsmittel vermarktet werden können.

Die aerobe Behandlung (Rotte) gliedert sich in die Verfahrensschritte Hauptrotte (in geschlossenen Anlagen auch „Intensivrotte“ genannt).

Die Hauptrotte, ist durch einen intensiven Abbau der mikrobiell leicht abbaubaren organischen Substanz gekennzeichnet. Damit einher gehen ein hoher Sauerstoffverbrauch, eine starke Selbsterhitzung des Rottegutes (Hygienisierung), ein hoher Austrag an Wasser (teilweise als Sickerwasser, hauptsächlich als Wasserdampf) und natürlich ein Verlust an organischer Trockenmasse.

In Abhängigkeit vom eingesetzten Verfahren kann die Intensiv- bzw. Hauptrotte von einer Woche bis zu 6 Wochen dauern. Ergebnis der Hauptrotte ist die Erzeugung von Frischkompost (Rottegrade 2 und 3), der noch nennenswerte Mengen an leicht abbaubarer organischer Substanz enthält.

Im Hinblick auf die Vermeidung klimarelevanter Emissionen kommt es in der Hauptrotte v.a. auf die Aufrechterhaltung eines ausreichenden Luftporenvolumens bzw. einer ausreichenden Strukturstabilität des Rottekörpers an, sowie auf den erforderlichen Gasaustausch (Belüftung, Umsetzen des Rottegutes) und einen optimalen Wassergehalt des Rottekörpers.

Die Nachrotte ist durch abklingende Temperaturen des Rottegutes gekennzeichnet. Sie ist eine Behandlung zur Stabilisierung sowie zur weiteren Humifizierung. Die Nachrotte kann in Abhängigkeit vom eingesetzten Verfahren und der gewünschten 'Reife' des Kompostes von 6 Wochen bis über 12 Wochen dauern. Ergebnis der Nachrotte ist die Erzeugung von Fertigkompost (Rottegrade IV und V), der hauptsächlich abbaustabile organische Substanzen aufweist.

Im Hinblick auf die Vermeidung von Klima-

gasemissionen ist in der Nachrotte v.a. die Entstehung von Lachgas relevant.

Während die Hauptrotte bei Anlagen mit einem Durchsatz von über 10.000 Mg/a in der Regel im geschlossenen (eingehausten) Bereich angesiedelt ist, wird die Nachrotte auch bei diesen Durchsatzleistungen vielfach als offene Mietenkompostierung geführt. Die Abgrenzung von Haupt- und Nachrotte wird in diesen Anlagen durch den Wechsel des Rottegutes vom eingehausten Bereich in den offenen Bereich bestimmt.

Bei den offenen und offen überdachten Verfahren der Kompostierung werden sowohl die Hauptrotte als auch die Nachrotte offen, d.h. ohne Einhausung geführt. Die Abgrenzung von Haupt- und Nachrotte ist hier unbestimmter als bei den geschlossenen oder teilgeschlossenen Verfahren und wird daher über die Dauer der jeweiligen Rottephase oder die Temperaturen des Rottekörpers definiert. 4

4.2.3 Konfektionierung

Konfektionierung bedeutet die Endaufbereitung des Rottegutes zu abgabefertigen Endprodukten. Bei der Herstellung von Komposten ist damit v. a. die Siebung der Materialien auf die gewünschte Körnung sowie die Abtrennung von Fremdstoffen angesprochen. Siebüberläufe (Siebreste) können in der Regel wiederverwendet und bei der Herstellung von Rottegemischen als Strukturmaterialien eingesetzt werden. Diese Verwendung entfällt, wenn der Siebüberlauf übermäßig Fremdstoffe enthält. In diesem Fall ist der Siebüberlauf aufzubereiten (Fremdstoffabtrennung) und thermisch zu verwerten oder zu beseitigen.

Bei Siebvorgängen treten v. a. bei zu trockenem Material Staub-, Keim- und Geruchsemissionen auf. Dem kann durch eine Sprühbefeuchtung bei der Bearbeitung entgegen gewirkt werden.

4.2.4 Lager

Die Lagerung von Kompost erfolgt lose in Boxen oder Haufwerken. Sie dient der Bereithaltung der Fertigprodukte zur Abgabe. Abgabefertige Komposte sind nach wie vor mikrobiell aktiv. In lagernden Komposten können - auch wegen des Wärmedämmeffektes des Haufwerkes - deswegen Temperaturen von über 50 °C erreicht werden. Aus den Lagertemperaturen können keine Rückschlüsse auf den Rottegrad gezogen werden. Beim Rottegrad wird die Selbsterhitzung einer Probe unter genormten Bedingungen im Dewar-Gefäß ermittelt.

Aufgrund der im Lager anhaltenden mikrobiellen Aktivität des Materials ergeben sich auch aus diesem Verfahrensbereich Emissionen. Eine Begrenzung der Emissionen ist durch Einstellung günstiger Wassergehalte und Gewährleistung einer ausreichenden Sauerstoffversorgung möglich.

Sind lagernde Komposte zu trocken, beginnen sie im Innern zu verpilzen mit der Folge, dass beim Öffnen der Haufwerke bzw. dem Verladen erhebliche Keimemissionen entstehen. Sind lagernde Komposte zu nass, beginnen im Innern Fäulnisprozesse, die zu erhöhten Geruchsemissionen, sowie zu höheren Emissionen an Methan und Ammoniak führen.

Das aufgrund der Siebung strukturarme und daher dichter lagernde Material weist im Gegensatz zu gut eingestellten Rottekörpern ein deutlich geringeres Luftporenvolumen auf. Im Fall von hohen Wassergehalten reduzieren diese das ohnehin geringe Luftporenvolumen und die damit verbundene Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen zusätzlich, so dass sich anaerobe Zonen bilden, in denen die vorgenannten Emissionen entstehen. Diese Prozesse und Emissionen sind in besonderer Weise bei Frischkomposten relevant und schränken deren Lagerfähigkeit deutlich ein. Aber auch bei Lagerung von Fertigungskomposten sind die Prozesse zu beachten und ggf. Maßnahmen wie Belüftung und Umsetzungen zu ergreifen.

Feste Gärrückstände sind nicht lagerfähig. Eine "Lagerung" ist unter dem Gesichtspunkt der Vermeidung des Entstehens von Geruchsemissionen, Methan und Ammoniak praktisch nur in Form einer Nachrotte möglich, bei der im Rottekörper die für die aeroben Prozesse erforderlichen Bedingungen eingestellt werden müssen (Kapitel 4.3.3).

4.3 Einflussfaktoren und Steuerungsmechanismen

Mit Blick auf ein optimiertes Emissionsmanagement sind die zu einer aktiven Rotteführung zählenden Möglichkeiten der Einflussnahme auf den biologischen Prozess

- die Mischung der Ausgangsmaterialien,
- die Steuerung der Rottetemperatur,
- die Steuerung des Wasserhaushaltes und
- die ausreichende Sauerstoffversorgung des Rottekörpers.

Generelle Einflussmöglichkeiten auf die Emissionen aus offenen Anlagen sind

- die sofortige und zügige Verarbeitung der angelieferten Abfälle,
- die Herstellung eines strukturreichen Rot-

tegemisches (ausreichende Strukturgutbevorratung zur Mischung mit nassen Bioabfällen oder Schlämmen),

- die Rotteführung (z.B. regelmäßiges Umsetzen zur Vermeidung anaerober Zonen in den Mieten, Begrenzung der Mietenhöhe in Abhängigkeit von Strukturstabilität und Umsetz- bzw. Belüftungssystem),
- eine saubere Betriebsführung (regelmäßige Reinigung der Verkehrswege etc.),

4.3.1 Ausgangsmaterial

Die zur Kompostierung verwendeten organischen Ausgangsmaterialien unterscheiden sich nach Art und Zusammensetzung sowie hinsichtlich ihrer Konsistenz, ihres Wassergehaltes, ihres Nährstoffgehaltes und ihrer Struktureigenschaften beträchtlich.

Die Eignung einzelner Materialien wird v.a. durch die jeweiligen stofflichen Eigenschaften bestimmt. Diese nehmen auch Einfluss auf die Lagerfähigkeit, das Emissionsverhalten, das Abbauverhalten und die Qualität der erzeugten Endprodukte.

In Abbildung 4-5 ist die Eignung häufig vorkommender Ausgangsmaterialien charakterisiert. Viele der angeführten Stoffgruppen sind - wenn auch in unterschiedlichem Maße - sowohl für die Kompostierung als auch für die Vergärung geeignet.

Bei der Zuweisung von Ausgangsmaterialien zur Kompostierung oder zur Vergärung ist nicht nur auf den einzelnen Stoff, sondern auch auf das zur Kompostierung oder Vergärung hergestellte Stoffgemisch abzustellen.

So kann die Verwendung zu großer Mengen nasser strukturarmer Ausgangsmaterialien bei der Kompostierung wegen der Schwierigkeit, eine aerobe Rotteführung zu gewährleisten, zu einem wenig kontrollierbaren Anstieg von Geruchs- und Klimagasemissionen führen. Dies gilt dann, wenn keine oder nur wenig Strukturmaterialien zur Verbesserung der Struktureigenschaften des Rottekörpers zur Verfügung stehen.

Auf der anderen Seite kann die Verarbeitung von für die Vergärung nur bedingt geeigneten festen Ausgangsstoffen dazu führen, dass diese bei der Entwässerung und Aerobisierung der Gärrückstände das dort gegebene Potential an Geruchs-, Methan- und Ammoniakemissionen erhöhen und der Aufwand, diese technisch zu fassen und zu behandeln, nicht im Verhältnis zum oft vergleichsweise geringen Gasertrag der Materialien steht.

Abbildung 4-5: Eignung bestimmter Ausgangsmaterialien für die Kompostierung und die Vergärung)

Stoffgruppe	Eignung zur Kompostierung	Eignung zur Vergärung
Bioabfälle aus der getrennten Sammlung aus Haushaltungen - Biotonne (mit vorwiegend Küchenabfällen)	+	++
Bioabfälle aus der getrennten Sammlung aus Haushaltungen - Biotonne (mit Küchen- und Gartenabfällen gemischt)	++	+
Separat angelieferte Garten- und Parkabfälle (Grünabfälle) mit überwiegend holzigen Anteilen	+++	--
Separat angelieferte Garten- und Parkabfälle (Grünabfälle) mit überwiegend gasigen/krautigen Anteilen	++	+
Landschaftspflegmaterialien mit überwiegend holzigen Anteilen	+++	--
Landschaftspflegmaterialien mit überwiegend grasigen Anteilen (Langgras)	++	+-
Rasenschnitt (Kurzgras)	-	++
Mahd (Langgras)	+	-
Stroh und Heu (verdorben)	++	-
Strauch- und Baumschnitt	++	---
Friedhofsabfälle	++	-
Fallobst	-	++
Laub (trocken und nass)	++	-
Festmist (mit Stroh, Heu) von Pferden, Rindern, u.a.	++	-
Fäkalien (ohne Stroh, Heu) von Schweinen, Hühnern, u.a.	-	++
Feste Rückstände aus der Lebens- Genuss- und Futtermittelindustrie (z.B. Gemüseausputz, Altbrot, Pilzkultursubstrate, Schlempen)	+ (++)	- +
Pastöse und flüssige Rückstände aus der Lebens- Genuss- und Futtermittelindustrie (z.B. Speiseabfälle, Inhalte von Fettabscheidern, Filtrationsrückstände, überlagerte Lebensmittel,	-- (---)	+++
Aschen aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz	+	---

4.3.2 Strukturmaterial

Für die aerobe Behandlung (Kompostierung) haben strukturwirksame Bestandteile, wie sie v.a. in Grünabfällen mit hohen Anteilen an Baum- und Strauchschnitt enthalten sind, eine besondere Bedeutung.

Als Strukturmaterialien werden im Wesentlichen verwendet:

- a) Zerkleinerte Grünabfälle aus vorwiegend Strauch- und Baumschnitt.
- b) Siebreste mit hohen Anteilen an Holz aus der Konfektionierung von Fertigprodukten (soweit geringe Gehalte an Fremdstoffen und mineralischen Anteilen).
- c) Zerkleinerter Siebüberlauf aus der Aufbereitung/Klassierung von Bioabfällen zur Vergärung (Teilstromvergärung).

Um im Rottekörper ein ausreichendes Porenvolumen für Luft und Wasser zu schaffen, sind im Rottegemisch bestimmte Anteile an Strukturmaterialien zu gewährleisten. Als Stützmaterial tragen Strukturmaterialien auch wesentlich dazu bei, die Strukturstabilität des Rottekörpers aufrechtzuerhalten.

Diese beiden zentralen Funktionen erfüllen Strukturmaterialien nur dann, wenn sie zerkleinert vorliegen. Die Zerkleinerung erfolgt vorzugsweise mit zerfasernden Aggregaten (Schreddern). Im Gegensatz zu schneidenden Werkzeugen (Hacker) werden bei vielen Schreddern holzige Ausgangsstoffe durch walkähnliche Bearbeitungen längs zur Maserung in ihrer reaktiven Oberfläche stark vergrößert. Das ist für den nachfolgenden Rotteprozess von Vorteil. Es ist also angeraten, auf die zerfasernden Effekte der Zerkleinerungsmaschinen zu achten.

Der Einsatz von zerkleinerten holzreichen Grünabfällen als Strukturmaterial bei der Kompostierung oder der Nachrotte fester Gärrückstände, steht in Nutzenkonkurrenz zur thermischen Verwertung dieser Materialien. Mit dem rasanten Ausbau der Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen sowie der gezielten finanziellen Förderung dieser Nutzung, sind die verfügbaren Mengen an Strukturmaterialien in Bioabfallbehandlungsanlagen rückläufig. Dem muss durch andere durchlüftungsfördernde Maßnahmen entgegengewirkt werden (z. B. kleinere Rottekörper, strukturschonende Rottegutbearbeitung, weniger Befeuchtung).

Strukturreiche Materialien wie Strauch- und Baumschnitt, Gehölz, Rinde, Häckselgut, Holzspäne und holzreiche Siebreste weisen in der Regel einen geringen Wassergehalt und ein weites C/N-Verhältnis auf. Strukturarme Materialien wie Küchenabfälle, Markt-

abfälle, Grasschnitt und Inhalte von Biotonnen weisen in der Regel höhere Wasser- und Stickstoffgehalte auf.

Der Anteil an strukturreichen Materialien im Rottegemisch bzw. Rottekörper sollte einen Volumenanteil von mindestens 30% - in Abhängigkeit von verschiedenen Randbedingungen auch deutlich mehr - betragen.

Die Anlieferung von Strukturmaterial und wenig strukturierten, meist nassen Bioabfällen erfolgt zeitlich nicht konform. Während strukturarme Bioabfälle über die Biotonne relativ kontinuierlich anfallen und daher nur in beschränktem Maße oder überhaupt nicht für einen kontinuierlichen Anlagenbetrieb vorgehalten werden müssen, erfolgt die Anlieferung von trockenem Strukturmaterial meist im Herbst bis in den Winter hinein. Für eine ständige Verfügbarkeit von ausreichenden Strukturmaterialmengen müssen diese über längere Zeit (bis zu etwa 6 Monate) auf entsprechend geeigneten Lagerflächen vorgehalten werden.

Bei Mangel an Strukturmaterialien und in Regionen mit mehr als 700 bis 800 mm Jahresniederschlägen kann eine Überdachung der Lagerflächen vorteilhaft sein.

Bei der Strukturmateriallagerung sind Rotteprozesse möglichst einzuschränken. Das wird bei lockerer Lagerung in nicht zerkleinertem Zustand am besten gewährleistet. Die Zerkleinerung des meist stark holzigen Strukturmaterials erfolgt möglichst kurz vor dessen Einsatz als strukturkorrigierender Zuschlagstoff. Hohe strukturfördernde Effekte sind bei Einzelstückgrößen zwischen 10 bis 30 mm zu erwarten. Die maximale Kantenlänge von Einzelstücken sollte 300 mm nicht überschreiten. Stets gilt: Je stärker die Strukturmaterialzerkleinerung, umso geringer ist die strukturverbessernde Wirkung.

4.3.3 Rottegemisch und Rottekörper

Die Eigenschaften des Rottegutes (Rottegemisch) können bei der Aufbereitung durch die getrennte Lagerung sowie gezieltes Mischen und Homogenisieren insbesondere im Hinblick auf Struktur und Strukturstabilität (Luftporenvolumen), Wassergehalt und Nährstoffgehalt (C/N-Verhältnis) eingestellt werden.

4.3.3.1 Mietengeometrie

Die Mietengeometrie hat wesentlichen Einfluss auf den Gasaustausch zwischen Rottekörper und Umgebungsluft sowie in der Folge auf die Sauerstoffversorgung des Rottegutes. Je kleiner das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen eines Rottekörpers ist, umso gerin-

ger ist die Gasaustauschrate. Dies gilt insbesondere für passiv belüftete Mieten, d.h. wenn keine Zwangsbelüftung erfolgt.

Hinzu kommt, dass mit steigender Höhe des Rottekörpers die Auflast zunimmt mit der Folge, dass das im Rottegut bestehende Luftporenvolumen zusammengepresst und verkleinert wird. Dieser Effekt ist bei Tafel- und Trapezmieten größer als bei Dreiecksmieten.

- Geschlossene Verfahren: In geschlossenen Kompostierungsverfahren erfolgt die Hauptrotte in Tunneln, Containern, Boxen, oder frei aufgesetzten Tafelmieten. Die Rottekörper werden aktiv belüftet. Das Prozessabgas wird erfasst und einer Abgasreinigungseinrichtung zugeführt. Die Abmaße der Rottekörper werden durch die baulichen Gegebenheiten bestimmt bzw. begrenzt.
- Offene Verfahren: Bei der offenen oder offen überdachten Mietenkompostierung wird das Rottegut zu Dreiecks-, Trapez- oder Tafelmieten aufgesetzt. Die Rottekörper werden in der Regel nicht aktiv belüftet. Aus diesem Grunde kommt dem Gasaustausch über die Mietenoberflächen eine besondere Bedeutung zu.

In Abbildung 4-6 sind Gasaustauschpotentiale verschiedener Querschnittsgeometrien über die Mietenoberfläche aufgezeigt. Ohne Berücksichtigung der Mietenlänge ergeben sich hier Gasaustauschflächen (m^2) je Volumeneinheit des Rottekörpers (m^3) zwischen 0,5 und $1,9 m^2/m^3$. Bei gleicher Sauerstoffzufuhr muss demnach die Luftdurchtrittsgeschwindigkeit bei hohen Tafelmieten mehr als des 4-fache der von kleinen Dreiecksmieten betragen. Innerhalb des Rottekörpers gelten vergleichbare Bedingungen.

Abbildung 4-6: Einfluss der Querschnittsgeometrie auf das passive Gasaustauschpotential von Kompostmieten [15]

Mietenform	Breite (Basis)	Breite (Kamm)	Höhe (Kamm)	Fläche zum Gasaustausch je Vol.-Einheit
	in m			
Dreiecksmieten	9	0	4,5	0,63
	6	0	3	0,94
	3	0	1,5	1,89
Trapezmieten	14	5	4,5	0,51
	11	5	3	0,73
	8	5	1,5	1,39
Tafelmieten	29	20	4,5	0,46
	26	20	3	0,68
	23	20	1,5	1,34

Dies bedeutet, dass die Anforderungen an das erforderliche Luftporenvolumen und damit einhergehend an den Anteil an Strukturmaterialien im Rottegut und die Strukturstabilität des Rottekörpers mit steigenden Volumina des Rottekörpers im Verhältnis zur Mietenoberfläche zunehmen.

4.3.3.2 Struktur und Porenvolumen

Das Porenvolumen des Rottekörpers wird im Wesentlichen vom Anteil (und der Partikelgröße) strukturstabiler Bestandteile im Rottegut bestimmt. Für den aeroben Prozess der Rotte sind luftführende Poren essentiell. Ein ausreichendes Luftporenvolumen garantiert nicht nur das für die Rotte erforderliche Sauerstoffangebot, sondern schafft auch die Porosität, entstehender Wasserdampf und Wärme sowie Stoffwechselprodukte wie Kohlendioxid abzuleiten.

Günstige Luftporenvolumina des Rottekörpers betragen ca. 30 bis 50 Vol.-%, wobei die oberen Angaben für die Haupt bzw. Intensivrotte und die unteren für die Nachrotte anzustreben sind [15].

Um das erforderliche Luftporenvolumen zu gewährleisten, müssen strukturarme Kompostrohstoffe mit strukturreichen Materialien gemischt und die Struktur des Rottekörpers optimal eingestellt werden. Vor allem bei den Verfahren ohne Zwangsbelüftung ist eine aerobe Rotteführung ohne ausreichende Anteile an Strukturmaterialien und den damit verbundenen Porenvolumina nicht möglich.

Auch bei zwangsbelüfteten Mieten besteht bei zu geringen Gehalten an strukturwirksamen Bestandteilen die Gefahr, dass die zugeführte Luft das Rottegut unzureichend oder ungleichmäßig durchströmt und anaerobe Zonen entstehen, in denen Fäulnisprozesse stattfinden.

Bei Mietensackungen auf weniger als 70 % vom Auf- bzw. Umsetzungsvolumen sind strukturkorrigierende Maßnahmen einzuleiten (strukturschonendes Umsetzen, Zusatz von Strukturmaterial).

4.3.3.3 Wassergehalt

Die in den Ausgangsmaterialien enthaltene abbaubare organische Substanz wird während des Rotteprozesses von aeroben Mikroorganismen als Energie- und Nährstoffquelle verwertet. Voraussetzung für mikrobielle Stoffwechselprozesse ist ein ausreichender Wassergehalt, da Mikroorganismen Nährstoffe und Sauerstoff nur in gelöster Form aufnehmen können. Bei Austrocknung des Rottegutes kommt der Rotteprozess weitgehend zum Stillstand (Trockenstabilisierung).

Der für die Rotte optimale Wassergehalt ist abhängig von der Wasseraufnahmefähigkeit des Rottegutes und dem Porenvolumen des Rottekörpers. Die Wasseraufnahmefähigkeit des Rottegutes steigt mit seinem Gehalt an organischer Trockenmasse. Da organische Trockenmasse im Verlauf der Rotte abgebaut (mineralisiert) wird, nehmen das Porenvolumen (vor allem bei Grobporen) und damit die Wasseraufnahmefähigkeit im Verlauf der Rotte ab.

Hinzu kommt, dass bei den aeroben Stoffwechselprozessen Wasser gebildet und freigesetzt wird. Aufgrund der v.a. in der Hauptrotte herrschenden hohen Temperaturen wird Wasser als Dampf aus den Mieten ausgetragen. In geschlossenen Systemen wird er v.a. mit der Abluft über den Biofilter ausgetragen als Kondensat gefasst.

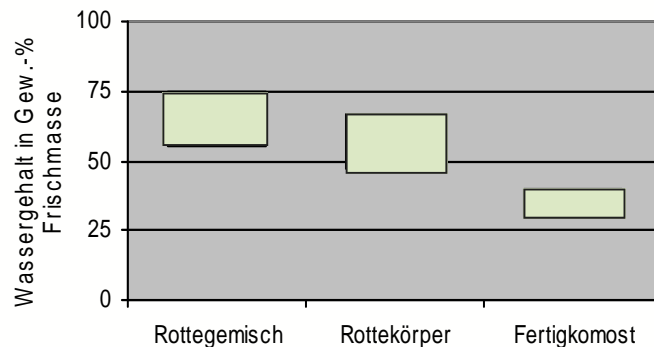
Eine Rückführung von Sickerwasser und Kondensat kann nur bei Bewässerungsbedarf des Rottekörpers vorgenommen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit zunehmendem Rottefortschritt die Mieten weniger feucht bzw. trockener werden. Das geschieht besonders bei kleineren Mietenquerschnittsflächen und hohen Temperaturen trockener Außenluft. Kleinere Mieten haben in der Regel unter sommerlichen Witterungsbedingungen den höchsten Bewässerungsbedarf - Großmieten unter winterlichen Witterungsbedingungen dagegen meist überhaupt keinen (offene Kompostierung). Der Anfall von Prozesswasser und der Bewässerungsbedarf von Kompostierungsmieten zeigen also oft gegenläufige Tendenzen, was eine zweckdienliche Rückführung in den Rotteprozess erschwert.

Die Aufrechterhaltung eines aeroben Rotteprozesses erfordert, dass die Mieten vor Vernässung geschützt werden. Vernässungen füllen das vorhandene Porenvolumen mit Wasser mit der Folge, dass das luftführende Porenvolumen und damit die Sauerstoffversorgung des Rottegutes abnehmen. Aufschluss gibt hier eine Betrachtung des volumetrischen Wassergehaltes. Hierzu ist neben der Kenntnis des Wassergehaltes in der Frischmasse die Trockenrohichte des Rottegutes erforderlich. Reinhold [15] schlägt nach Auswertung von 17.000 Einzelmesswerten von Frisch- und Fertigkomposten aus der RAL-Gütesicherung vor, hinsichtlich des volumetrischen Wassergehaltes die Feuchtrohichte des Rottegutes als einfach zu messenden Anhaltspunkt heranzuziehen [15].

In homogen hergestellten Rottegemischen zur Kompostierung sind Gesamtwassergehalte bis maximal 75 % der Frischmasse möglich. Günstige Gehalte liegen im Bereich von 55 bis 65 %. Sie sinken mit fortschreitender

Rotte auf Werte um 50 % und sollten bei Frischkomposten schließlich 40 bis 45 % und bei Fertigkomposten 30 bis 35 % betragen (Abbildung 4-7).

Abbildung 4-7: Bereiche günstiger gravimetrischer Wassergehalte von Rottegut bei der Kompostierung



4.3.3.4 Nährstoffe und C/N-Verhältnis

Das C/N-Verhältnis kennzeichnet das in den Ausgangsstoffen oder im Rottegut bestehende Verhältnis von Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N). Organische Kohlenstoffverbindungen dienen den Mikroorganismen als Energiequelle. Stickstoffverbindungen benötigen sie, um körpereigene Proteine aufzubauen.

Die Körpersubstanz von Mikroorganismen weist ein C/N-Verhältnis von etwa 10/1 auf. Für ein optimales Wachstum benötigen sie im Idealfall also auf 10 Teile Kohlenstoff ein Teil Stickstoff. Da Kohlenstoff jedoch in mehr oder weniger starker organischer Bindung vorliegt und deshalb für die Mikroorganismen weniger verfügbar ist als Stickstoff, liegen die für Mikroorganismen optimalen C/N-Verhältnisse im Rottegut bei Werten von 25/1 bis 35/1 [1].

Werte von weniger als etwa 20/1 führen zu einem Überschuss an Stickstoff und damit einhergehender Freisetzung in Form von Stickoxiden, elementarem Stickstoff oder Ammoniak. Bei Werten über 40/1 besteht für die Mikroorganismen zunehmend ein Nährstoffmangel, der ihre Entwicklung und damit den Fortschritt der Rotte verlangsamt.

Anlage 2 enthält eine Liste zu Art und Beschaffenheit von Ausgangsstoffen (Seite 38). In dieser Liste sind auch Orientierungswerte für C/N-Verhältnisse der Inputmaterialien enthalten.

Welches C/N-Verhältnis sich bei Verwendung unterschiedlicher Arten und Mengen an Ausgangsmaterialien im fertigen Rottegemisch ergibt, kann mit dem in Abbildung 4-8 gezeigten Rechengang abgeschätzt werden.

Abbildung 4-8: Berechnung des resultierenden C/N-Verhältnisses (C/N_M) einer beliebigen Mischung bei gegebenen Mengen an Mischungspartnern ($m_{1...n}$) mit bekannten C_{org} - und N_{ges} -Gehalten ($C_{1...n}$; $N_{1...n}$)

$$C/N_M = \frac{\sum C_{1...n} \cdot m_{1...n}}{\sum N_{1...n} \cdot m_{1...n}}$$

C/N_M C/N-Verhältnis der resultierenden Mischung

$C_{1...n}$ C_{org} -Gehalt in TS-% der Einzelkomponenten (Mischungspartner) 1 bis n

$N_{1...n}$ N_{ges} -Gehalt in TS-% der Einzelkomponenten (Mischungspartner) 1 bis n

$m_{1...n}$ Masse der Einzelkomponenten (Mischungspartner) 1 bis n

Die Berechnung der Masse der erforderlichen Zumischung eines Mischungspartners mit bekannten C_{org} - und N_{ges} -Gehalten zur Einstellung eines gezielten C/N-Verhältnisses im Rottegemisch kann mit dem in Abbildung 4-9 gezeigten Rechengang abgeschätzt werden.

Abbildung 4-9: Berechnung der Masse der erforderlichen Zumischung (m_x) eines Mischungspartners mit bekannten C_{org} - und N_{ges} -Gehalten zur Einstellung eines gezielten C/N-Verhältnisses in der Endmischung (C/N_M)

$$m_x = \frac{m_A \cdot (C/N_M \cdot N_A - C_A)}{C_x - C/N_M \cdot N_x}$$

m_x Masse der erforderlichen Zumischung einer Einzelkomponente mit bekanntem C/N-Verhältnis

m_A vorliegende Masse einer bestehenden Mischung bzw. einer auf ein gezieltes C/N-Verhältnis einzustellenden Einzelkomponente

C_A C_{org} -Gehalt in einer bestehenden Mischung bzw. einer auf ein gezieltes C/N-Verhältnis einzustellenden Einzelkomponente

N_A N_{ges} -Gehalt in einer bestehenden Mischung bzw. einer auf ein gezieltes C/N-Verhältnis einzustellenden Einzelkomponente

C_x C_{org} -Gehalt der erforderlichen Zumischung einer Einzelkomponente mit bekanntem C/N-Verhältnis

N_x N_{ges} -Gehalt der erforderlichen Zumischung einer Einzelkomponente mit bekanntem C/N-Verhältnis

C/N_M angestrebtes C/N-Verhältnis der resultierenden Mischung

4.3.4 Rotteführung

4.3.4.1 Auf- und Umsetzen von Rottekörpern

Als Aufsetzen von Kompostmieten bezeichnet man den Vorgang, bei dem ein aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien aufbereitetes homogenes Rottegemisch zu einem Rottekörper mit definierten Abmaßen aufgeschichtet, d.h. aufgesetzt wird.

Soweit verschiedene Ausgangsstoffe nicht bereits vor dem Aufsetzen miteinander homogen gemischt wurden, kann das Aufsetzen des Rottekörpers auch durch schichtweise Auftragen unterschiedlicher Ausgangsmaterialien (z.B. Biotonneninhalte und Strukturmaterialien) mit anschließender Durchmischung mit einem Umsetzaggregat erfolgen.

Als Umsetzen bezeichnet man üblicherweise den Vorgang, bei dem ein Rottekörper (Miete) aufgenommen und möglichst durchmischend zu einem neuen Rottekörper aufgesetzt wird. Damit ist nicht immer ein Ortswechsel verbunden. Je nach eingesetztem Aggregat, wird das Rottegut unterschiedlich intensiv aufgelockert und durchmischt.

Für das Umsetzen werden Maschinen mit unterschiedlichen Wirkprinzipien der Werkzeuge eingesetzt. Die Intensität von Lockerung und Durchmischung kann in folgender Reihenfolge angegeben werden: schnelldrehende Fräse > langsamdrehende Fräse > Schaufelrad > Ladeschaufel.

Schnelldrehende Fräswerkzeuge kommen in ihrer Wirkung auf das Rottegut den Zerkleinerungswerkzeugen der Inputmaterial-Schredder nahe. Sie arbeiten kontinuierlich aber nicht strukturschonend und führen oft zu einer Volumenreduzierung des Rottegutes. Hinzu kommt, dass es durch die heftigen Rottegutbewegungen zu Entmischungen von leichten und schweren Bestandteilen des Rottegutes kommen kann.

Langsamdrehende Fräswerkzeuge und Schaufelradwerkzeuge (in der Regel mit Bandabsetzer kombiniert) arbeiten kontinuierlich strukturschonend bei weitgehender Lockerung des Rottegutes. Entmischungserscheinungen treten kaum auf.

Die in der Bioabfallbehandlung genutzten Ladeschaufeln haben meist ein Fassungsvermögen zwischen 2 bis 5 m³. Das Umsetzen erfolgt hier diskontinuierlich und ist mit ständigen Maschinenbewegungen verbunden.

Durch das Eindringen der Ladeschaufel in den Rottekörper können sich Materialverdichtungen ergeben.

Es können auch Teile des Rottekörpers (Mietenfuß) durch die Radauflage verdichtet

werden mit der Folge, dass anaerobe Zonen entstehen.

Die Umsetzung von Rottegut hat den Zweck, das durch Sackungsprozesse verdichtete Material aufzulockern, das Porenvolumen zu erhöhen, die Struktur und den Gasaustausch zu verbessern und inhomogene Bereiche (nasse und trockene Zonen, Klumpenbildung u.a.) zu vermischen. Darüber hinaus wird das Rottegut weiter mechanisch aufgeschlossen und damit die für Mikroorganismen nutzbaren Oberflächen vergrößert. Dieser Effekt ist v.a. bei mischenden und fräsenden Werkzeugen gegeben.

Weist das Rottegut bereits eine vergleichsweise hohe Feuchtrohdichte auf (Dichtlagerung, niedriges Porenvolumen und/oder hoher Wassergehalt), so kann eine Umsetzung des Rottegutes die beabsichtigte Verbesserung der Struktur nicht herbeiführen. Einziger Vorteil von Umsetzprozessen ist in diesem Fall der erhöhte Wasseraustrag beim Umschichten und eine gewisse Auflockerung des Rottegutes. Von Vorteil ist in diesem Falle, im Zuge der Umsetzung Strukturmaterial zuzugeben. Hinzu kommt, dass Umsetzungsprozesse mit intensiv mischenden oder fräsenden Werkzeugen angerottete holzige Bestandteile zerkleinern und das Porenvolumen des Rottekörpers damit verringern können.

Bei Rottekörpern mit vergleichsweise hohen Anteilen an Strukturmaterialien, niedriger Feuchtrohdichte und guter Struktur kann ein Umsetzvorgang diese Kennwerte nicht verbessern. In diesem Fall ist ein Umsetzvorgang nur dann sinnvoll, wenn das Rottegut zu trocken ist und im Zuge des Umsetzvorganges bewässert werden muss. Ferner kann es sein, dass ein zu hohes Porenvolumen, das zu Austrocknung der Mieten führt, durch weiteren Aufschluss des Rottegutes (Zerkleinerung der holzigen Bestandteile) reduziert werden muss.

Die Bewässerung von Kompostmieten im Zuge der Umsetzung dient nicht nur der Aufrechterhaltung eines optimalen Wassergehaltes, sondern auch der Verwertung von abgeleitetem Sicker-, Kondens- und Oberflächenwasser. Eine Rückführung solcher Wässer in das Rottegut ist unter Beachtung der hygienischen Anforderungen grundsätzlich möglich und sinnvoll, da enthaltene Nährstoffe nicht durch anderweitige Entsorgung verloren gehen.

Die Rückführung von 'Sickerwasser' hat nur insoweit erfolgen, wie eine Vernässung des Rottegutes vermieden wird.

Die zur Aufrechterhaltung eines günstigen Wassergehaltes im Rottekörper erforderliche

Menge an Wasser, das dem Rottegut beim Umsetzen einer Miete zugeführt werden muss, lässt sich aus der gegebenen Feuchtrohdichte des Rottegutes und der angestrebten Feuchtrohdichte wie folgt ableiten:

4.3.4.2 Belüftung

Die Belüftung von Rottekörpern dient folgenden Zielstellungen:

- Eintrag von Frischluft zur Versorgung der aeroben Mikroorganismen mit Sauerstoff und damit einhergehende Intensivierung der mikrobiellen Abbau- und Umbauprozesse.
- Vermeidung der Überhitzung von Rottekörpern, die sich aufgrund intensiver exothermer Stoffwechselprozesse in Verbindung mit dem Isolationseffekt des Rottekörpers ergeben kann. Ableitung der überschüssigen Wärme (Abführen von Wasserdampf, Verdampfungsenthalpie).
- Austrag von Stoffwechselprodukten der mikrobiellen Rotteprozesse wie CO₂.

Der durch die Belüftung bewirkte intensive Gasaustausch hat als Nebeneffekt zur Folge, dass Wasserdampf aus dem Rottegut austragen wird. Bei hoher Intensität der Belüftung kann dies in Teilbereichen oder dem gesamten Rottekörper zu Austrocknungen führen, so dass mikrobielle Prozesse gehemmt werden. Um bei intensiver Belüftung für den Rotteprozess günstige Wassergehalte aufrechtzuerhalten, ist i.d.R. eine Bewässerung des Rottegutes erforderlich.

Bei der Sauerstoffversorgung von Rottekörpern wird zwischen der sogenannten 'passiven Belüftung' und der 'aktiven Belüftung' des Rottegutes unterschieden.

Bei der passiven Belüftung erfolgt der Gasaustausch rein konvektiv, d.h. aufgrund von Konzentrations- und Temperaturunterschieden innerhalb des Rottekörpers sowie zwischen dem Rottekörper und der Außenluft.

Die im Rottekörper zu überwindende Wegstrecke mindert den spezifischen Gasaustausch je Volumeneinheit des Rottegutes. Steuerungsmöglichkeiten beziehen sich auf die Ausgestaltung des Rottekörpers (z.B. Reduktion der Mietenhöhe, um die Außenflächen der Mieten im Verhältnis zu ihrem Volumen zu erhöhen) sowie auf mechanisches Umsetzen, ggf. in Verbindung mit der Einmischung von Strukturmaterialien zur Erhöhung des Grobporenvolumens.

Bei der aktiven Belüftung werden die Gasaustauschprozesse verstärkt. Zu diesem Zweck wird Außenluft - bei eingehausten Verfahren auch Hallenluft - mit Ventilatoren in den Rottekörper eingetragen. Die Steuerung

des Lufteintrages erfolgt durch Drehzahlregelung, durch Ein- und Ausschalten der Ventilatoren, oder durch Öffnen und Schließen von Belüftungsklappen für einzelne Segmente des Rottekörpers. Auch bei aktiver Belüftung gelten die grundsätzlichen Anforderungen an die Gestaltung des Rotteprozesse (Mietengeometrie, Materialstruktur, Umsetzen).

Die aktive Belüftung (Zwangsbelüftung) kann als Druckbelüftung oder als Saugbelüftung ausgelegt sein. Bei der Druckbelüftung wird die Zuluft entweder mit geringem Druck unter dem Rottegut verteilt (etwa über eine 'Strukturmatte' aus Häckselmaterial), oder mit höherem Druck durch düsenartige Öffnungen in das Rottegut eingebracht. Bei der Saugbelüftung wird die Mietenluft unter dem Rottegut abgesaugt, so dass die von den Außenflächen in den Rottekörper nachströmende Luft zu einer Zwangsbelüftung bzw. Erhöhung des Gasaustausches führt.

Die Regelung der Belüftung erfolgt über den Sauerstoff- oder den Kohlendioxidgehalt in der Abluft und/oder Temperaturmessungen der Mieten oder Mietenabluft.

4.3.4.3 Bewässerung

Die Bewässerung von Rottekörpern bzw. des Rottegutes hat den Zweck, den Wassergehalt von zu trockenem Rottegut zu erhöhen.

Da Mikroorganismen Nährstoffe und Sauerstoff nur in gelöster Form aufnehmen können, ist eine ausreichende Wasserversorgung die Grundvoraussetzung ihrer Tätigkeit. Bei zu geringem Wassergehalt kommt die biologischen Ab-, Um und Aufbauprozesse zum Stillstand. Umgekehrt gilt natürlich auch, dass zu hohe Wassergehalte die Rotte ebenfalls beeinträchtigen (Kapitel 4.3.3.2).

Die Bewässerung (Befeuchtung) des Rotteguts ist in allen aktiv belüfteten Rottesystemen ein erforderlicher Verfahrensbestandteil. Bei Passivbelüftung ist entsprechend der Entwicklung von Luftdurchlässigkeit und Wassergehalt fallweise über einen Bewässerungsbedarf zu entscheiden. Ein mit optimalem Wassergehalt aufgesetzter Rottegutkörper benötigt bei offener Mietenkompostierung ohne Zwangsbelüftung in der Regel keine Bewässerung.

Maßnahmen der Bewässerung erfolgen i.d.R. im Zusammenhang mit dem Umsetzen des Rottegutes. So kann Wasser beim Umsetzungsvorgang direkt in den Materialstrom eingebracht werden, oder das Wasser unmittelbar vor dem Umsetzungsvorgang auf die Oberfläche des Rottekörpers aufgebracht werden. Beim Umsetzungsvorgang vermischen sich dann trockene und nasse Zonen.

4.3.5 Technische Maßnahmen zur Emissionsvermeidung

Bezüglich der der klimarelevanten Gase Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) ist darauf hinzuweisen, dass diese durch technische Maßnahmen praktisch nicht reduziert werden können. Technische Maßnahmen der Emissionsmeidung betreffen v.a. Geruchsemissionen, wenn Emissionen von Staub und Keimen.

4.3.5.1 Abdeckung

'Abdeckungen' können mit Planen, Vliesen oder offenen Überdachungen ausgeführt werden.

Überdachungen haben den Zweck, eine Verrottung von lagernden Materialien, von Rottekörpern und von Fertigprodukten zu vermeiden. Mit der Verhinderung der Verrottung durch hohe Niederschläge werden in den Materialien Fäulnisprozesse und damit zusammenhängende Emissionen vermieden. Gleichzeitig werden Arbeits- und Lagerflächen trocken gehalten und eine gezielte Steuerung des Wassergehaltes im Rottegut ermöglicht.

Vereinzelt werden bei der offenen Mietenkompostierung semipermeable Planen eingesetzt. Diese halten Niederschlagswasser ab, während Wasserdampf aus dem Rottekörper entweichen kann. Da durch die Abdeckung des Rottekörpers mit semipermeablen Planen der Gasaustausch mit der Außenluft eingeschränkt ist, werden die Rottekörper aktiv belüftet. Aufgrund der damit verbundenen guten Sauerstoffversorgung und der bei diesem Verfahren i.d.R. kleinen Mietenquerschnitt sind anaerobe Zonen selten und die Möglichkeit der Bildung von Methan damit gering.

Abdeckmaßnahmen von Rottekörpern verlieren notwendigerweise ihre Wirkung, wenn das Rottegut aufgesetzt, umgesetzt oder abgetragen werden muss. Die aus diesen Betriebsvorgängen resultierenden Emissionen können jedoch weitgehend auf den Zeitraum der reinen Materialbewegung beschränkt werden.

4.3.5.2 Einhausung

Prinzipiell können

- teileingehauste und
- voll eingehauste

Systeme unterschieden werden, wobei sich der Grad der Einhausung nach den Randbedingungen des Anlagenstandortes bzgl. des Immissionschutzes richtet. So kann es bereits ausreichend sein, den Intensivrotteteil in einem geschlossenen Anlagenteil unterzubringen, während die Nachrotte als offene

Kompostierung konzipiert wird.

Teileingehauste Rottesysteme, wie Rotteboxen, -zeilen oder -tunnel, werden i.d.R. für die Intensivrotte im Chargenbetrieb eingesetzt. Das abgemischte Rohmaterial wird über einen Zeitraum von 7 - 21 Tagen in einer Schichthöhe von bis zu 3,50 m einem intensiven und über Sensoren (CO₂/O₂; H₂O; °C) gesteuerten Abbau unterzogen. Das verfahrensbedingte Endprodukt sollte zum Zeitpunkt des Austrags die temperaturbedingte Hygienisierung abgeschlossen haben. Geruchsbildende Substanzen wie niedermolekulare Fettsäuren sollten weitgehend abgebaut sein, was eine Mindestverweildauer im geschlossenen Rottreaktor von 14 bis 21 Tagen in Abhängigkeit von der Rohstoffmischung bedingt. Die Dauer der anzuschließenden zweiten Stufe der Hauptrotte bzw. der Nachrotte ist von der Materialzusammensetzung und der Einstellung der Regelparameter abhängig sowie vom angestrebten Endprodukt (Frisch- oder Fertigkompost) abhängig.

Anforderungen an die Einhausung von Anlageneilen sind für Kompostierungsanlagen in Abschnitt 5.4.8.5 der TA Luft [G4] enthalten. Dort ist etwa vorgesehen, dass bei einer Durchsatzleistung von über 10.000 Mg/a die Hauptrotte geschlossen auszuführen ist. Abgase aus Reaktoren und belüfteten Mieten sind gemäß TA Luft einem Biofilter oder einer gleichwertigen Abgasreinigungseinrichtung zuzuführen. Bei Anlagen mit einer Durchsatzleistung von 10 000 Mg/a oder mehr dürfen die Emissionen an geruchsintensiven Stoffen im Abgas die Geruchsstoffkonzentration 500 GE/m³ nicht überschreiten. Reine Grüngutanlagen sind hiervon nicht berührt.

4.3.5.3 Abgasreinigung

Aufgrund der Abgaszusammensetzung der aus der mikrobiellen Zersetzung von organischen Stoffen resultierenden Abbauprodukte, eignen sich biologische Verfahren zur Geruchsminderung, wie Biofilter und Biowäscher, besonders gut. Ihre Wirksamkeit bzgl. klimarelevanter Spurengase ist jedoch stark eingeschränkt; so wird z.B. Methan praktisch nicht abgebaut, bei Lachgas kann es sogar zu einer Anreicherung in Biofiltern kommen.

Der Betrieb von Abluftreinigungsanlagen, die bei eingehausten oder teileingehausten Kompostwerken praktisch immer aus einem Biofilter (ggf. mit vorhergehender Luftbefeuchtung) bestehen, eventuell in Kombination mit einem Biowäscher, setzt ein ähnlich ausgeprägtes Fingerspitzengefühl voraus, wie der Rottebetrieb selbst.

Wie alle biologischen Systeme bedürfen auch biologische Abluftreinigungen einer dauernden Überwachung und Pflege, wenn Sie mit optimalem Wirkungsgrad gefahren werden sollen.

5. Internes Qualitätsmanagement

Bei der Behandlung und Verwertung von Bioabfällen ist die Entstehung von Emissionen klimarelevanter Gase aufgrund der biologischen Prozesse in einem bestimmten Umfang naturgegeben und nicht vollständig vermeidbar. Die Praxis des Anlagenbetriebs mit geringen Emissionen an klimarelevanten Gasen und Gerüchen zielt aber darauf ab, solche Emissionen auf ein unvermeidliches Maß zu reduzieren.

Geeignete Maßnahmen setzen in erster Linie dort an, wo klimarelevante Gase entstehen. An diesen Punkten gilt es, die Prozesse so einzustellen und zu steuern, dass relevante Gase nach Art und Menge nur in einem Bandbereich auftreten, der für den jeweiligen Prozess typisch und nach dem Stand der Technik zu erwarten ist.

Aus vorgenannten Gründen enthalten die Gütesicherungen der Bundesgütegemeinschaft Kompost u. a. "Anforderungen an die Prozessqualität bei der Herstellung gütegesicherter Komposte und Gärprodukte" [3a]. Diese Anforderungen zielen zwar nicht allein, aber auch auf einen Anlagenbetrieb mit geringen Emissionen klimarelevanter Gase ab.

Grundlage der Gewährleistung einer guten "Prozessqualität" ist die Erstellung eines Prozessmodells, in welchem die wesentlichen Prozessschritte des Betriebes abgebildet und Kontrollpunkte definiert sind, von denen in Bezug auf bestimmte Qualitätskriterien - in diesem Fall der Minimierung von Emissionen klimarelevanter Gase - besondere Risiken ausgehen können. Im zweiten Schritt müssen Verfahren zur Eigenüberwachung dieser Punkte sowie für den Fall der Feststellung von Fehlern, geeignete Korrekturmaßnahmen bestimmt sein.

Da die Behandlungsanlagen in ihren Prozessabläufen Unterschiede aufweisen, ist ein solches Prozessmodell auf den jeweiligen konkreten Betrieb auszurichten.

Abbildung 5-1 zeigt am Beispiel einer teilgeschlossenen Kompostierung ein Prozessmodell mit Kontrollpunkten, die in Bezug auf die Minimierung von gasförmigen Emissionen relevant sind.

Grundsätzlich ist ein innerbetriebliches Qualitätsmanagement (QM) erforderlich, das alle Belange des ordnungsgemäßen Ablaufs unterstützt. Dies kann durch klare Anleitungen, Kompetenz und Schulung des Betriebspersonals für den Regelbetrieb sowie Vorgaben für

Störfallsituationen gewährleistet werden.

Jeder Anlagenbetrieb kann nur so gut sein, wie es die Motivation und die Ausbildung bzw. Erfahrung des Betriebspersonals zulässt. Aufbauend auf der Sensibilisierung des Personals für die Belange des Emissionsschutzes müssen zum emissionsarmen Betrieb einer biologischen Abfallbehandlung entsprechende Handlungsanweisungen vorliegen.

Tabelle 5-1: Prozessmodell einer teilgeschlossenen Kompostierung mit Kontrollpunkten für die Minimierung von gasförmigen Emissionen

Annahme	<ul style="list-style-type: none"> • Zulässigkeit und Eignung der angelieferten Kompostrohstoffe. • Grünabfälle: Annahme im offenen Bereich. • Bioabfälle (Biotonne): Annahme im geschlossenen Bereich.
Zwischenlagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Grünabfälle: Bestimmung von offen lagerfähigen Anteilen und Zuweisung zum vorgesehenen Zwischenlager. • Bioabfälle (Biotonne): Kurzfristige Lagerung im geschlossenen Bereich. Fassung, Ableitung und Behandlung der Abluft und der Abwässer.
Aufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> • Grünabfälle: Auf ausreichende Feuchtigkeit gegen Staubemissionen bei der Zerkleinerung achten (Außenbereich). Ansonsten Zerkleinerung zusammen mit Bioabfall im geschlossenen Bereich. • Bioabfälle: Aufbereitung (Klassierung, ggf. Zerkleinerung) im geschlossenen Bereich. Fassung, Ableitung und Behandlung der Abluft.
Rottegemisch und Rottekörper	<ul style="list-style-type: none"> • Herstellung des Rottegemisches unter Beachtung ausreichender Anteile an strukturstabilen Stoffen (Holzhäcksel, Siebreste, u. a.), günstiger Wassergehalt, günstiges C/N-Verhältnis, ausreichendes Luftporenvolumen. • Aufsetzen des Rottekörpers unter Beachtung des zugrunde liegenden Baumusters sowie der entstehenden Auflasten im Hinblick auf die Gewährleistung eines ausreichenden Luftporenvolumens.
Intensivrotte/Hauptrotte (geschlossen)	<ul style="list-style-type: none"> • Gestaltung der Mietengeometrie entsprechend der Strukturhaltigkeit des Rottegemisches (geringe Feuchtrohdichte \Rightarrow großer Mietenquerschnitt; hohe Feuchtrohdichte \Rightarrow kleiner Mietenquerschnitt) • Steuerung aktiver Belüftungsmaßnahmen mit arbeitstäglicher Kontrolle von Abweichungen des Volumenstromes und des Druckes von den Soll-Vorgaben. • Strukturschonendes Umsetzen nach Soll-Vorgaben sowie bei Feststellung von zu geringem luftgefüllten Porenvolumen (anaerobe Zustände) bzw. zu hoher Feuchtrohdichte. • Bewässerung bei zu geringer Rottegutfeuchte (es darf aber keine Vernässung entstehen).
Ablufferfassung und Einhausung	<ul style="list-style-type: none"> • Steuerprogramm für alle Be- und Entlüftungseinrichtungen, in dem alle Betriebszustände der Gesamtanlage sowie einzelner Teile bzw. Aggregate berücksichtigt werden. Anweisungen für den Störfall. • Wirksame Kontrolle von Hallentoren und -türen (z.B. automatische Schließung, Fernbedienung vom Radlader aus etc.). • Gewährleistung eines Unterdrucks in abgesaugten Anlagenteilen (Verhinderung diffuser Gasaustritte)
Abgasbehandlung mit Biofilter	<ul style="list-style-type: none"> • Kontrollen der Funktionstüchtigkeit des Biofilters (gleichmäßige Durchströmung, Kontrolle von Druckverlusten, ausreichende Feuchtigkeit, Kontrolle von Überhitzungen $> 40\text{ °C}$ u. a.) • Vorschaltung einer saueren Wäsche, wenn die Zuluft (Rohgas) hohe Mengen an Ammoniak enthält. • Kurzschlussströme im Biofiltermaterial und an den Wandungen vermeiden (Kontrolle ggf. mit Nebelkerzen).
Nachrotte	<ul style="list-style-type: none"> • bei Rottekörpertemperaturen unter 40 °C abbrechen • Sauberhalten von Rotte- und Wegeflächen
Konfektionierung	<ul style="list-style-type: none"> • Feuchtes Material ($> 35\%$ Wasser) \Rightarrow Verminderung der Siebfähigkeit, geringe Siebausbeute, hoher Siebüberlauf. • Trockenes Material ($< 35\%$ Wasser) \Rightarrow gute Siebfähigkeit, gute Siebausbeute, mit abnehmenden Wassergehalten ($< 20\%$) deutliche Staubemissionen ggf. verbunden mit Keimemissionen.
Endproduktlager	<ul style="list-style-type: none"> • Dicht lagernde Produkte nicht zu hoch schütten. • Lagerungsdauer begrenzen (bei Frischkomposten oder noch nicht voll ausgereiften Komposten).

6. Zusammenfassung

In Deutschland werden derzeit ca. 8 bis 10 Millionen Tonnen Bioabfälle zu Komposten verarbeitet. Etwa 50 % davon stammen aus der getrennten Sammlung aus Haushaltungen (Biotonne). Die anderen 50 % sind Garten- und Parkabfälle (Grünabfälle), die Kompostierungsanlagen separat angeliefert werden.

Der bei der Kompostierung von Bioabfällen stattfindende mikrobiologische Abbau und Umbau organischer Substanzen führt zur Bindung verschiedener Stoffwechselprodukte, die über die Luft emittiert werden. Relevant sind vor allem Emissionen von Geruchsstoffen, deren Begrenzung bei der Genehmigung von biologischen Abfallbehandlungsanlagen eine besondere Bedeutung zukommt. Den Emissionen klimarelevanter Gase galt bislang keine vorrangige Aufmerksamkeit, da Auswirkungen auf die direkte Umgebung der Anlagen nicht bestehen. Aufgrund der nationalen Bemühungen für eine weltweite Begrenzung klimarelevanter Gase hat die Relevanz des Beitrags einzelner Branchen zu diesen Emissionen inzwischen aber an Bedeutung gewonnen.

Im Zusammenhang mit der Emissionsberichterstattung Deutschlands zur Klimarahmenrahmenkonvention und zum Kyoto-Protokoll wurden erste Abschätzungen über klimarelevante Emissionen aus biologischen Abfallbehandlungsanlagen vorgenommen. Dabei wurde gezeigt, dass die Emissionen der Kompostierung deutlich niedriger sind, als bislang angenommen. Bezogen auf die Summe emittierter CO₂-Äquivalente in Deutschland beträgt der Beitrag aus der getrennten Sammlung und Verwertung von Bioabfällen nur 0,05 %.

Bislang wurden im Wesentlichen Untersuchungen an Kompostierungsanlagen durchgeführt. Entgegen den allgemeinen Erwartungen zeigte sich dabei, dass die Unterschiede zwischen den in der Praxis anzutreffenden Verfahrenstypen geringer sind als die Streubreite, die zwischen einzelnen Produktionsanlagen des gleichen Verfahrenstyps auftreten (Abbildung 2-10).

Eine vergleichsweise große Streubreite zeigen v.a. offene Kompostierungsverfahren, die neben Grünabfällen auch Bioabfälle (Biotonne) verarbeiten (Verfahrenstyp V4). Reine Grünabfallkompostierungsanlagen (Verfahrenstyp V5) zeigen bezüglich klima-

relevanter Gase sowohl im Mittel als auch in der Streubreite Ergebnisse, wie sie bei auch geschlossenen Anlagen (Verfahrenstyp V1) oder bei teilgeschlossenen Anlagen (Verfahrenstyp V2) gemessen wurden.

Als klimarelevante Gase gelten hauptsächlich Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). Eine indirekte Klimawirkung entfaltet auch Ammoniak (NH₃), da etwa ein Tausendstel des emittierten Ammoniaks in der Atmosphäre zu Lachgas umgesetzt wird.

Obgleich Kohlendioxid (CO₂) zu den wichtigsten in die Atmosphäre emittierenden Treibhausgasen zählt, wird es im Zusammenhang mit der biologischen Abfallwirtschaft als klimaneutral eingestuft, weil die aus Bioabfällen freigesetzte Menge an CO₂ derjenigen Menge an CO₂ entspricht, die zuvor von den Pflanzen aus der Umwelt entnommen und in ihre organische Substanz eingebaut wurde. Insofern stehen insbesondere Methan und Lachgas im Mittelpunkt des Interesses. Dies ist auch deshalb so, weil die Klimawirksamkeit von Methan 25-mal höher und die von Lachgas rund 300-mal höher ist, als die von Kohlendioxid.

Hinzu kommt, dass technische Maßnahmen wie Abluftreinigung über Biofilter, die bei Geruchsemissionen sehr wirksam sind, in Bezug auf Methan und Lachgas praktisch wirkungslos bleiben. Im Hinblick auf Emissionen klimarelevanter Gase kommt es daher entscheidend darauf an, dass diese im Prozess der Kompostierung erst gar nicht entstehen bzw. auf ein unvermeidbares Maß reduziert werden. Vor diesem Hintergrund widmet sich die vorliegende Schrift im Schwerpunkt der Frage, warum und wie klimarelevante Gase bei der Kompostierung entstehen und auf welche Weise ihre Entstehung begrenzt werden kann.

Entscheidend für die Vermeidung vermeidbarer Klimagasemissionen ist eine gute fachliche Praxis der Kompostierung. Neben der nach bestimmten Kriterien gezielten Herstellung des Rotteausgangsgemisches bedeutet dies in erster Linie eine streng aerobe Rotteführung.

Bei der Herstellung des Rotteausgangsgemisches kommt es im Wesentlichen auf die Einstellung eines für die Rotte günstigen Verhältnisses von Kohlenstoff und Stickstoff (C/N-Verhältnis), einen ausreichenden (aber nicht zu hohen) Wassergehalt, sowie auf ei-

nen Anteil von strukturstabilen Bestandteilen an, der das für den Gasaustausch erforderliche Luftporenvolumen gewährleistet. Nach dem Aufsetzen des Rottekörpers sind während der Rotte für aerobe Umsetzungsprozesse günstige Bedingungen aufrecht zu erhalten. Dies geschieht durch gezielte Maßnahmen der Rotteführung wie Umsetzungen zur Auflockerung und Homogenisierung des Rottekörpers, Ersatz von Wasserverlusten oder Schutz vor Vernässung, ggf. Zumischung von Strukturmaterialien, aktive Belüftung und Steuerung der Rottetemperaturen.

Es kommt also auf die Herstellung des Rottegemisches aus unterschiedlichen Bioabfällen, die Prozessbedingungen im Rottekörper, deren Porenvolumina für Luft und Wasser sowie die Sauerstoffversorgung und die Strukturstabilität an.

Die Bildung von Lachgas (N_2O) wird durch ein enges C/N-Verhältnis des Rottegutes und Temperaturen um $30^\circ C$ begünstigt. Da die Temperaturen in der Hauptrotte stets darüber liegen, sind N_2O -Emissionen am ehesten in späten Phasen der Nachrotte zu erwarten, wenn die Temperaturen im Rottekörper absinken. Ammonium-Stickstoff wird bei ausreichender Sauerstoffversorgung über Nitrit zu Nitrat oxidiert. Dabei kann es zu (meist geringen) Emissionen von Lachgas kommen. Enge C/N-Verhältnisse bzw. hohe Ammonium-Gehalte begünstigen in Verbindung mit einem ausreichenden Sauerstoffangebot den Prozess. Insofern sind die Bedingungen der Bildung von Lachgas und von Methan - was die Rolle des Sauerstoffs betrifft - im Grunde gegenläufig. In der Praxis wird dies jedoch, wenn überhaupt, erst in einer späten Phase der Nachrotte bzw. bei der Lagerung der Fertigprodukte relevant.

Wichtig ist und bleibt die aerobe Rotteführung. Denn bei fehlendem Sauerstoffangebot entwickeln sich in den betreffenden Zonen des Rottekörpers anaerob lebende Mikroorganismen, die Methan produzieren. Dies ist etwa dann der Fall, wenn das Luftporenvolumen im Rottekörper zu gering oder das vorhandene Porenvolumen weitgehend mit Wasser gefüllt ist (Vernässung). Die mit dem Eigengewicht des Rottegutes verbundene Auflast trägt mit zunehmender Höhe des Rottekörpers zudem zu Verdichtungen bei, die das vorhandene Luftporenvolumen ebenfalls reduzieren. Bei der Herstellung des Rottegutes (Rotteausgangsgemisch) und dem Aufsetzen des Rottekörpers ist daher darauf zu achten, dass ausreichend strukturbildende Bestandteile enthalten sind, die das erforderliche Porenvolumen für Luft und Wasser sowie die Strukturstabilität des Rottekörpers gewährleisten.

Bioabfälle aus der getrennten Sammlung aus Haushaltungen (Biotonne) sind in der Regel strukturarm. Vor ihrer Kompostierung müssen daher strukturhaltige Materialien zugemischt werden. Dies sind etwa zerkleinerte Garten- und Parkabfälle mit höheren Anteilen an Strauch- und Baumschnitt oder Siebrückstände aus der Konfektionierung der Fertigprodukte, sofern diese nicht zu hohe Gehalte an Fremdstoffen aufweisen. Strukturmaterialien sollten stets in ausreichenden Mengen vorgehalten werden.

Die zunehmende thermische Nutzung von holzigen Bestandteilen von Grünabfällen reduziert die Verfügbarkeit von Strukturmaterialien für die Kompostierung inzwischen in einem Besorgnis erregenden Maß.

Zu geringe Anteile an Strukturmaterialien im Rottekörper reduzieren die Sauerstoffversorgung mit der Folge, dass sich anaerobe Zonen ausbilden, in denen Methan entstehen kann. Um dies zu vermeiden, muss mit abnehmenden Anteilen an Strukturmaterialien die Höhe der Rottekörper reduziert werden. Damit vermindert sich nicht nur die Auflast, sondern auch das Verhältnis der Luftkontaktfläche zum Volumen, was den Gasaustausch zwischen Rottekörper und dem Außenbereich verbessert. Durch aktive Belüftung wird - soweit eine gleichmäßige Luftgängigkeit im Rottekörper noch ausreichend gegeben ist - der Gasaustausch und die Sauerstoffversorgung unterstützt.

Bezüglich der Begrenzung des Entstehens klimarelevanter Gase können bei der Kompostierung zusammenfassend v.a. folgende Steuerungsmöglichkeiten eingesetzt werden:

- Herstellung eines geeigneten Rotteausgangsgemisches (C/N-Verhältnis, ausreichender Anteil an Strukturmaterialien)
- Abmaße und Gestaltung des Rottekörpers (Auflast im Verhältnis zur Strukturstabilität, Luftkontaktfläche im Verhältnis zum Volumen)
- Art, Häufigkeit und Zeitpunkt von Umsetzungen (Auflockerung und Homogenisierung des Rottegutes)
- Ausreichender Gasaustausch (O_2 / CO_2) und Maßnahmen der aktiven Belüftung
- Regulation des Wassergehaltes (Bewässerung bzw. Verhinderung von Vernässung)
- Steuerung der Temperatur

In Abbildung 6-1 sind Wirkungen von Steuerungsmaßnahmen der Rotteführung auf die Entstehung bzw. Vermeidung von Emissionen klimarelevanter Gase aus der Kompostierung veranschaulicht.

Abbildung 6-1: Einfluss von Steuerungsmaßnahmen der Rotteführung auf das Entstehen bzw. die Vermeidung von Emissionen klimarelevanter Gase bei der Kompostierung

Maßnahme	Methan (CH ₄)	Lachgas (N ₂ O)	Ammoniak (NH ₃)
Einstellung eines günstigen C/N-Verhältnisses im Rottegemisch (C/N 25 bis 40/1)	Bei engem C/N-Verhältnis und geringer O ₂ -Versorgung steigende CH ₄ -Emissionen. Weites C/N-Verhältnis schränkt die Umsetzung von C und damit auch die Bildung von CH ₄ ein.	Bei engem C/N-Verhältnis in der Nachrotte Bildung von N ₂ O möglich. Bei weitem C/N-Verhältnis neutral.	Bei engem C/N-Verhältnis abnehmende, bei weiten zunehmende NH ₃ -Emissionen.
Abmaße und Gestaltung des Rottekörpers	Abnehmendes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und reduziert den passiven Gasaustausch. Bei O ₂ -Mangel Bildung von CH ₄ . Hohe Auflasten reduzieren Luftporenvolumen und Luftdurchlässigkeit.	Großvolumige Rottekörper und geringere Gasaustauschraten in der Nachrotte vorteilhaft.	Keinen besonderen Einfluss.
Ausreichender Anteil an Strukturmaterialien (> 30 Vol.%)	Strukturanteile erhöhen das Luftporenvolumen. Die damit verbesserte Gasaustauschrate reduziert CH ₄ -Bildung. Die höhere Luftwegsamkeit begünstigt den Erfolg der aktiven Belüftung, d.h. weniger CH ₄ .	Gute O ₂ -Versorgung fördert bei sinkenden Temperaturen die N ₂ O-Bildung als Zwischenprodukt der Nitrifikation und Denitrifikation.	Leicht erhöhte Emission aufgrund des besseren Gasaustausches. Ursachen: - Anstieg des pH-Wertes - erhöhter Feuchteaustrag
Umsetzen des Rottekörpers	Auflockerung und Auflöser anaerober Zonen beseitigt Bedingungen, die für CH ₄ -Bildung günstig sind.	Bei hohen Rottetemperaturen neutral. Bei abnehmenden Temperaturen negativ. Ausgerottete Komposte absieben und lagern (geringere O ₂ -Gehalte im Lager).	Leicht erhöhte Emission aufgrund des Gasaustausches.
Belüften des Rottekörpers	Reduktion der CH ₄ -Bildung durch bessere Sauerstoffversorgung. Voraussetzung ist eine ausreichende Luftwegsamkeit im Rottekörper.	Bei Temperaturen < 40 °C tendenziell negativ.	Bei pH-Wert > 7 und Temperaturen > 45°C Erhöhung von NH ₃ -Emissionen. In Biofiltern Reduktion von NH ₃ .
Regulation des Wassergehaltes Rottegemisch 55 bis 70 % Rottekörper	Zu hohe Wassergehalte verdrängen Luftporenvolumen. Ausbildung anaerober Zonen und Bildung von Methan möglich.	Vernässung kann zu O ₂ -Mangel führen und in späten Rottestadien damit zur Denitrifikation von NO ₂ ⁻ und NO ₃ ⁻ unter Bildung von N ₂ O.	Vernässung führt zu reduzierenden Bedingungen (Denitrifikation) mit Anreicherung von NH ₄ ⁺ . Austrocknung führt zu höherer Emission von NH ₃

Anhang 1

Begriffe und Definitionen

Emissionen Emissionen im Sinne von § 3 Abs. 3 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) sind die von einer Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnliche Erscheinungen [1].

Emissionen im Sinne von Nr. 2.5 der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) sind die von einer Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen [2].

Stand der Technik Stand der Technik im Sinne von § 3 Abs. 6 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes [1] ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden, zur Gewährleistung der Anlagensicherheit, zur Gewährleistung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung oder sonst zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen auf die Umwelt zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere die im Anhang aufgeführten Kriterien zu berücksichtigen.

Bioabfall Bioabfälle sind gemäß § 2 Nr. 1 der Bioabfallverordnung (BioAbfV) Abfälle tierischer oder pflanzlicher Herkunft zur Verwertung, die durch Mikroorganismen, bodenbürtige Lebewesen oder Enzyme abgebaut werden können; hierzu gehören insbesondere die in der BioAbfV Anhang 1 Nr. 1 genannten Abfälle; Bodenmaterial ohne wesentliche Anteile an Bioabfällen gehört nicht zu den Bioabfällen; Pflanzenreste, die auf forst- oder landwirtschaftlich genutzten Flächen anfallen und auf diesen Flächen verbleiben, sind keine Bioabfälle [4].

Zu den Bioabfällen im Sinne der Bioabfallverordnung zählen im Wesentlichen Bioabfälle aus der getrennten Sammlung von Haushaltungen (Biotonne) sowie Garten- und Parkabfälle, die an Bioabfallbehandlungsanlagen separat angeliefert werden. Im Sprachgebrauch wird der Begriff "Bioabfall" (auch Biogut) häufig allein auf Inhalte der Biotonne bezogen und Garten- und Parkabfälle im Sinne des Anhanges 1 BioAbfV als Grünabfälle (auch Grüngut) bezeichnet.

Grünabfall Grünabfall (auch Grüngut) ist eine Sammelbezeichnung für pflanzliche Abfälle mit unterschiedlich hohem Anteil an verholzten Pflanzenteilen, wie Baum- und Strauchschnitt und ähnliche Abfälle, Mäh- und Schnittgut von Brachflächen, Streuwiesen, Parkanlagen und Straßenrändern sowie anfallendes Pflanzenmaterial bei Landschaftspflegemaßnahmen [5].

Gärrückstand, Gärprodukt Gärrückstände (auch Gärreste) sind Rückstände aus der anaeroben Behandlung biogener Materialien, die (ggf. nach einer erforderlichen Aufbereitung) verwertet oder beseitigt werden.

Als "Gärprodukte" werden gütegesicherte Gärrückstände bezeichnet, die als Düngemittel und Bodenverbesserungsmittel verwertet werden und der Qualitätssicherung eines Trägers der regelmäßigen Güteüberwachung im Sinne von § 11 Abs. 3 BioAbfV unterliegen (z.B. einer RAL Gütesicherung).

Strukturmaterial Material (z. B. Astwerk, Häckselgut, Holzspäne, Rinden), das durch Beimischung zu strukturarmen Kompostrohstoffen, wie nassen und strukturschwachen Bioabfällen oder Klärschlamm, zu einer nachhaltigen Erhöhung des Porenvolumens des Materialgemisches sowie zu einer Erhöhung des C/N-Verhältnisses führt (erweitert nach VDI). Wird auch als strukturkorrigierender Zuschlagstoff bezeichnet.

Einhausung Einhausung ist eine in sich geschlossene, feste Gebäudekonstruktion, die die vollständige Abgaserfassung aus den in der Einhausung befindlichen mechanischen und biologischen Behandlungsschritten ermöglicht [8].

Rohgas Rohgas ist unbehandeltes Prozessabgas [8].

Reingas Reingas ist behandeltes Prozessabgas [8].

Kompostrohstoff zur Kompostierung (aeroben Behandlung, Rotte) bestimmtes Ausgangsmaterial.

Rottegut, Rottegemisch Gemisch von Ausgangsmaterialien und/oder schon in Rotte befindlichen Materialien, das zur aeroben Behandlung (Rotte) zu einem Rottekörper aufgesetzt wird.

Rottekörper, Miete nach Abmaßen bestimmtes und gestaltetes Haufwerk von Rottegut.

Rottegrad Maßzahl zur Kennzeichnung des Rottefortschritts bzw. einer Abbaustabilität des Rotteproduktes. Der Rottegrad dient der Bestimmung von Frisch- und Fertigkompost.

Aufsetzen Herstellen der Erstmischung von Kompostrohstoffen und Herstellung eines Rottekörpers

Umsetzen Aufnehmen eines Rottekörpers, Mischung des Rottegutes und Herstellen eines neuen Rottekörpers

Belüftung Eintritt bzw. Zuführung von Außenluft in einen Rottekörper mit dem Ziel einer Versorgung des Rottegutes im gesamten Rottekörper mit gasförmigem Sauerstoff. Die Belüftung kann passiv (ohne technische Hilfsmittel) oder aktiv (mit technischen Hilfsmitteln) erfolgen

Kompostierung Aerobe Behandlung von Kompostrohstoffen mit dem Ziel der Hygienisierung von Kompostrohstoffen und der Erzeugung von hochwertigen Kompostprodukten (Frischkompost, Fertigkompost, Substratkompost).

Aerob gasförmigen Sauerstoff (Luft) benötigend.

Anaerob unter Luftabschluss, keinen gasförmigen Sauerstoff (Luft) benötigend.

Aerobe Behandlung mikrobieller Ab-, Um- und Aufbau organischer Substanz unter aeroben Bedingungen (mit Sauerstoffbedarf).

Rotte im Rottekörper ablaufender mikrobieller Prozess der aeroben Behandlung / Kompostierung.

Hygienisierung Verfahren zur Herstellung der phyto- und seuchenhygienischen Unbedenklichkeit von Produkten der biologischen Abfallbehandlung.

Hauptrotte, Intensivrotte Hauptphase der Kompostierung mit dem Ziel des Ab- und Umbaus organischer Substanz. Rottephase mit hoher mikrobieller Aktivität, hohen Stoffumsätzen und hoher Selbsterhitzung des Rottegutes. In geschlossenen Anlagen meist Intensivrotte genannt.

Nachrotte an die Hauptrotte anschließende Phase der aeroben Behandlung / Kompostierung mit dem Ziel einer Erhöhung der Abbaustabilität des Rottegutes (Erzeugung von Fertigkompost).

Vergärung anaerobe Behandlung organischer Materialien mit dem Ziel der Erzeugung von Biogas sowie der Verwertung verbleibender Gärrückstände.

Gärgut Gemisch von Ausgangsmaterialien, das in einem Fermenter unter anaeroben Bedingungen (Sauerstoffabschluss) mikrobiell abgebaut wird.

Anaerobe Behandlung mikrobieller Ab-, Um- und Aufbau organischer Substanz unter Luftabschluss (ohne Sauerstoff).

Fermentation im Fermenter ablaufender mikrobieller Prozess der anaeroben Behandlung / Vergärung. Die Fermentation kann in flüssigen (Nassfermentation) und festen (Trockenfermentation) Medien erfolgen

Fermenter, Reaktor Bezeichnung für einen Behälter, in dem Organismen chargenweise oder kontinuierlich in einem Nährsubstrat (z.B. aus organischen Materialien) wachsen [aus VDI] und Stoffwechselprodukte erzeugen

Anhang 2 - Art und Beschaffenheit von Ausgangsstoffen

Ausgangsstoffe	Feuchtigkeit	C/N-Verhältnis	Vorbehandlung	Struktur	Mischungsanteil in Vol-%
Pflanzenabfälle					
Garten- und Parkabfälle	feucht	20 - 60	grobe Teile zerkleinern	gut - mittel	Ø 50 bis 100
Rasenmähgut	nass, nach anwelken feucht	15 - 35	-	schlecht	Ø 30 bis 50
Krautschnitt	feucht-trocken	15 - 45	zerkleinern vorteilhaft	mittel	Ø 40 bis 80
Gehölzschnitt	feucht-trocken	100 - 150	zerkleinern	gut	Ø 40 bis 90
Laub	feucht-trocken	25 - 60	zerkleinern vorteilhaft	mittel	Ø 40 bis 80
Friedhofsabfälle	feucht-trocken	40 - 120	Fremdstoffe auslesen, zerkleinern	gut	Ø 60 bis 80
Siedlungsabfälle					
Küchenabfälle	feucht- nass	12 - 20	-	mittelschlecht	Ø 20 bis 50
getrennt gesammelte Siedlungsabfälle	feucht	30 - 50	-	mittelschlecht	Ø 30 bis 60
Abfälle von Getreideprodukten	Feucht-trocken	15 - 50	-	mittel	Ø 30 bis 60
Abfälle von Ölpflanzenprodukten	feucht	10 - 30	-	mittelschlecht	Ø 20 bis 50
Abfälle von Genussmitteln	trocken	10 - 30	-	mittelschlecht	Ø 10 bis 40
Gartenabfälle, gemischt	feucht	20 - 60	grobe Teile zerkleinern	gut	Ø 70 bis 100
Forstabfälle					
Schlagabraum, Windbruch	trocken	100 - 230	zerkleinern	gut	Ø 30 bis 50

Abfallart	Feuchtigkeit	C/N-Verhältnis	Vorbehandlung	Struktur	Mischungsanteil in Vol-% Ø bis Max.
-----------	--------------	----------------	---------------	----------	--

Landbauabfälle

Festmist (Rind, Pferd)	feucht- nass	25 - 30	-	gut-mittel	Ø 50 bis 80
verdorbenes Heu/Stroh	feucht-trocken	40 - 100	zerkleinern	gut	Ø 30 bis 50
Obst- und Gemüseabfälle	nass	10 - 20	-	schlecht	Ø 20 bis 40
Futterabfälle	nass	10 - 35	-	mittel- schlecht	Ø 20 bis 30
Rindergülle	flüssig	5 - 13	-	schlecht	Ø 10 bis 20
Hühnerkot	nass	6 - 20	-	schlecht	Ø 10 bis 20
Güllefeststoff	nass	10 - 15	-	schlecht	Ø 30 bis 40
Graben- und Teichaushub	nass	10 - 30	-	schlecht	Ø 30 bis 50
Graben- und Teichaushub	nass	10 - 30	-	schlecht	Ø 30 bis 50

Produktionsabfälle

Trester	nass	100	-	schlecht	Ø 20 bis 30
Rinden	feucht-trocken	40 - 180	zerkleinern	gut	Ø 40 bis 100
Sägemehl, Holzspäne	trocken	100 - 200	-	mittel- schlecht	Ø 20 bis 30
Abfälle von Torfprodukten	feucht-trocken	30 - 70	-	schlecht	Ø 30 bis 80
Papier, Karton	trocken	200 - 400	zerkleinern	schlecht	Ø 20 bis 30

Anhang 3 - Quellen

- [1] Amlinger, F.; Peyr, S.; Hildebrandt, U.; Müsken, J.; Cuhls, C.; Clemens, J.: Stand der Technik der Kompostierung - Richtlinie des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Lebensmittelministerium Österreich; Medieninhaber und Herausgeber: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Autoren: DI Florian Amlinger und DI Stefan Peyr, Kompost - Entwicklung & Beratung; Urs Hildebrandt, Beratung für Boden und Kompost; Dr.-Ing. Joachim Müsken, Dr. Müsken + Partner; Dr.-Ing. Carsten Cuhls und Dr. habil. Joachim Clemens, gewitra Ingenieurgesellschaft für Wissenstransfer mbH; Wien, 10.02.2005.
- [2] British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries (BCMAF): Composting Factsheets - Site Selection for Composting. BCMAF Resource Management Branch; Abbotsford, British Columbia, 1996.
- [3] Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK): Gütesicherung Kompost RAL-GZ 251. Güte- und Prüfbestimmungen sowie Durchführungsbestimmungen für die Verleihung und Führung des RAL-Gütezeichens Kompost. Hrsg.: RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung, St. Augustin, 2007.
[3a] Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK). Anforderungen an die Prozessqualität bei der Herstellung gütegesicherter Komposte und Gärprodukte. Beschluss der Mitgliederversammlung der BGK vom ?.
- [4] Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK): Gütesicherung Gärprodukt RAL-GZ 245. Güte- und Prüfbestimmungen sowie Durchführungsbestimmungen für die Verleihung und Führung des RAL-Gütezeichens Gärprodukt. Hrsg.: RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung, St. Augustin, 2007.
- [5] Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK): Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate. Hrsg: Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.; Ausgabe: 5. Auflage, erschienen im Selbstverlag, Köln, 2006.
- [6] Cuhls, C.; Mähl, B.; Clemens, J: Bioabfallverwertung - Handbuch Emissionsarmer Anlagenbetrieb .Studie der GEWITRA Ingenieurgesellschaft für Wissenstransfer mbH im Auftrag der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 2010.
- [7] Epstein, E.: The Science of Composting. CRA Press, Inc; Boca Rotan, Florida, 1996.
- [8] [Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change 2007. Fourth Assessment Report (AR4) der WG 1 des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Vierter Sachstandsbericht der Arbeitsgruppe I, 2007.
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Third Assessment Report (TAR). Dritter Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen der Vereinten Nationen, 2001.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Second Assessment Report (SAR). Zweiter Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen der Vereinten Nationen, 1996.
- [11] Jager et al.:Geruchs-Emissionen bei der Kompostierung. In: Hösel, Schenkel, Schnurer (Hrsg.); Müllhandbuch, Kennzahl 5330, Lieferung 1/95; E. Schmidt Verlag, Berlin, 1995.
- [12] Mayer, J.: Geruchsstoffe bei der Heißrotte von Hausmüll. Dissertation; Fakultät für Chemie und Pharmazie der Universität Tübingen, 1990.
- [13] Paul, J.; Geesing, D.: Compost Facility Operator Manual - A compost facility operator training course reference and guide. Printed in Canada by Abbotsford Printing Inc.; Abbotsford, British Columbia, 2009.
- [14] Pöhle, H.: Geruchsstoffemissionen bei der Kompostierung von Bioabfall. Dissertation; Universität Leipzig, 1994
- [15] Reinhold, J.: Möglichkeiten zur Vermeidung klimarelevanter Emissionen aus Kompos-

tierungsanlagen durch Weiterentwicklung der guten fachlichen Praxis bei der Rotteprozessführung. Auftraggeber: Landesumweltamt Brandenburg; Auftragnehmer: Dr. J. Reinhold & Kollegen; Dezember 2009.

- [16] Rynk, R.: On-Farm Composting Handbook. Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES); Ithaca, New York, 1992.
- [17] Umwelt- und Energie-Consult GmbH, u. e. c. Berlin (UEC): Bewertung der vorhandenen Bioabfallbehandlungsanlagenstandorte in Schleswig-Holstein im Hinblick auf eine Ergänzung um Vergärungsanlagen. Auftrag- und Herausgeber: Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (MLUR), Februar 2010.
- [18] Umweltbundesamt (UBA): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 - 2008 (Fassung zur EU-Submission 15.01.2010); Hrsg.: Umweltbundesamt; Dessau, 2010.
- [19] Schilling, B. (LUA NRW): Emissionsmessungen von Bioaerosolen aus Biofiltern. Kolloquium „Biologische Abgasreinigung“ am 8. und 9.10.2003 in Leipzig, in: VDI-Berichte Nr. 1777, Seiten 103-112, VDI Verlag Düsseldorf, 2003
- [20] Fischer, K.: Fremdstoffabbau in der Luft, in: Ottow, J. C. G., Bidlingmaier, W. (Hrsg.), Umweltbiotechnologie, G. Fischer Verlag, Stuttgart, 1997

Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften

- [G1] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG). Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 26. September 2002 (BGBl. I S. 3830), zuletzt geändert durch Artikel 2 vom 11. August 2009 (BGBl. I S. 2723).
- [G2] Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV) vom 21. September 1998, BGBl. I S. 2955, zuletzt geändert am 26.11.2003, BGBl. I S. 2373.
- [G3] Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln. Bodenhilfsstoffen. Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV). Vom 16. Dezember 2008, BGBl. I S. 2524.
- [G4] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft). Veröffentlicht am 30. Juli 2002, in Kraft getreten am 1. Oktober 2002.
- [G5] Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen (Geruchsimmissions-Richtlinie - GIRL) in der Fassung vom 29. Februar 2008 und einer Ergänzung vom 10. September 2008 mit Begründung und Auslegungshinweisen in der Fassung vom 29. Februar 2008, Hrsg. Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI).

Technische Regeln, Leitlinien

- [T1] DIN EN 50054 : 1991
Elektrische Geräte für das Aufspüren und die Messung brennbarer Gase; Allgemeine Anforderungen und Prüfmethode; Deutsche Fassung EN 50054:1991; Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [T2] IEC 60079-20 : 2008-04
Explosionsfähige Atmosphären; Teil 20-1: Stoffliche Eigenschaften zur Klassifizierung von Gasen und Dämpfen -Prüfmethode und Daten.
- [T3] LASI LV 13: 1997-10
Länderausschuss für Arbeitssicherheit und Sicherheitstechnik (LASI); LASI-Veröffentlichung (LV) LV 13 Leitlinien für den Arbeitsschutz in biologischen Abfallbehandlungsanlagen, Herausgabe: Oktober 1997.
- [T4] VDI 3475 Blatt 1 : 2003-01
Emissionsminderung; Biologische Abfallbehandlungsanlagen; Kompostierung und Vergärung; Anlagenkapazität mehr als ca. 6.000 Mg/a. VDI-Richtlinie; VDI 3475 Blatt 1; Januar 2003; Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf; Beuth Verlag GmbH, Berlin.

- [T5] VDI 3475 Blatt 2 : 2005-12
Emissionsminderung - Biologische Abfallbehandlungsanlagen - Kompostierung und (Co-) Vergärung - Anlagenkapazität bis ca. 6.000 Mg/a.
VDI-Richtlinie; VDI 3475 Blatt 2; Dezember 2005; Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf; Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [T6] VDI 3475 Blatt 3 : 2006-12
Emissionsminderung; Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung von Siedlungsabfällen. VDI-Richtlinie; VDI 3475 Blatt 3; Dezember 2006; Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf; Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [T7] VDI 3477 : 2004-11
Biologische Abgasreinigung - Biofilter, VDI-Richtlinie; November 2004; Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- [T8] VDI 3478, Blatt 1 (Entwurf) : 2008-04
Biologische Abgasreinigung - Biowäscher, VDI-Richtlinie (Entwurf); April 2008; Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- [T9] ÖNORM S 2205
Technische Anforderungen an Kompostierungsanlagen. ÖNORM S 2205:2008; Ausgabe: 2008-07-01; ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- [T10] ÖWAV-RB 518
Anforderungen an den Betrieb von Kompostierungsanlagen. ÖWAV-Regelblatt 518; Oktober 2009; Regelblätter des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV), Wien 2009.

Bildnachweis

Titelbild: Ulrich Laemers, RETERRA Services GmbH

© Lukasz Panek—fotolia.com

