

Klimarelevanz und Energieeffizienz der Verwertung biogener Abfälle



KLIMARELEVANZ UND ENERGIEEFFIZIENZ DER VERWERTUNG BIOGENER ABFÄLLE (KEVBA)

Christoph Lampert
Maria Tesar
Peter Thaler



Projektleitung

Christoph Lampert

AutorInnen

Christoph Lampert

Maria Tesar

Peter Thaler

Übersetzung

Brigitte Read

Lektorat

Maria Deweis

Satz/Layout

Elisabeth Riss

Umschlagphoto

© Elisabeth Riss

Diese Publikation wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VI/3 Abfallbehandlung und Altlastensanierung, erstellt.

Weitere Informationen zu Umweltbundesamt-Publikationen unter: <http://www.umweltbundesamt.at/>

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt GmbH
Spittelauer Lände 5, 1090 Wien/Österreich

Eigenvervielfältigung

Gedruckt auf CO₂-neutralem 100 % Recyclingpapier

© Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2011

Alle Rechte vorbehalten

ISBN 978-3-99004-156-7

INHALT

ZUSAMMENFASSUNG	5
SUMMARY	7
1 EINLEITUNG	9
2 SYSTEMBESCHREIBUNG UND METHODIK	10
3 AUFKOMMEN UND BEHANDLUNG BIOGENER ABFÄLLE	13
3.1 Beschreibung und Herkunft der betrachteten Abfallarten	13
3.1.1 Getrennt gesammelte biogene Abfälle (Biotonne)	13
3.1.2 Grünabfälle	13
3.1.3 Küchen- und Kantinenabfälle	13
3.1.4 Marktabfälle	13
3.2 Abfallaufkommen	14
3.3 Anlagen zur Behandlung biogener Abfälle und Einsatzmengen	14
3.3.1 Behandlung in Kompostieranlagen	14
3.3.2 Behandlung in Vergärungsanlagen	14
3.4 Verwertungs-/Entsorgungswege der erzeugten Endprodukte (inkl. Mengen)	15
3.5 Zuordnung der Abfälle zu Behandlungsverfahren	15
3.5.1 Kompostierung	15
3.5.2 Vergärung	15
4 BERECHNUNG DER ENERGIEBILANZ	17
4.1 Energieaufwand bei offener Kompostierung	17
4.2 Energieaufwand – teilgeschlossene Kompostierung	17
4.3 Energiebilanz – Vergärung	18
4.3.1 Eigenenergiebedarf bei Nassvergärung	19
4.3.2 Eigenenergiebedarf bei Trockenvergärung	22
4.3.3 Energieaufwand bei der Biomethanherzeugung	23
4.3.4 Erzeugte Nettoenergiemenge	24
5 THG- UND NH₃-EMISSIONEN	29
5.1 THG und NH₃-Emissionen bei der Behandlung	29
5.1.1 Emissionen bei der offenen Kompostierung	29
5.1.2 Emissionen bei teilgeschlossener Kompostierung	29
5.1.3 Emissionen bei Vergärungsverfahren	30
5.1.4 Emissionen bei der Biogasaufbereitung zu Biomethan	34
5.2 THG- und NH₃-Emissionen bei Transport und Aufbringung	35
5.2.1 Emissionen beim Transport	35
5.2.2 Emissionen bei der Ausbringung von Komposten und Gärresten	36

6	EMISSIONSGUTSCHRIFTEN	39
6.1	Gutschriften für Strom-, Wärme und Biomethaneinspeisung	39
6.2	Substitution von Mineraldüngern	40
6.2.1	Nährstoffgehalte und Nährstoffverfügbarkeit	41
6.3	Vermeidung von Lachgasemissionen bei Aufbringung von Handelsdüngern	42
6.4	Kohlenstoffspeicherung durch Aufbringung von Komposten und Gärresten	42
7	ENERGIEBILANZ UND ENERGIEEFFIZIENZ DER BEHANDLUNG BIOGENER ABFÄLLE	44
7.1	Energiebilanz und Energieeffizienz der Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes	44
7.1.1	Energiebilanz	44
7.1.2	Energieeffizienz	45
7.2	Energiebilanz und Energieeffizienz der Vergärung mit Separierung des Gärrestes	46
8	THG-BILANZ DER BEHANDLUNG BIOGENER ABFÄLLE	48
8.1	THG-Emissionen bei der Behandlung und Verwertung biogener Abfälle	48
8.2	THG-Gutschriften durch die Behandlung und Verwertung biogener Abfälle	49
8.3	Gesamt-THG-Bilanzen der Behandlung biogener Abfälle	50
8.3.1	THG-Bilanz der Kompostierung	51
8.3.2	THG-Bilanzen der Nassvergärung mit Kompostierung des Gärrestes	52
8.3.3	THG-Bilanzen der Trockenvergärung mit Kompostierung des Gärrestes	54
8.3.4	THG Bilanzen der Nassvergärung ohne Kompostierung des Gärrestes	55
8.3.5	Vergleich der THG-Bilanzen der betrachteten Verfahren	58
9	EMPFEHLUNGEN ZUR BEHANDLUNG BIOGENER ABFÄLLE	63
9.1	Empfehlungen zur Zuordnung von Abfällen zu Behandlungsverfahren	63
9.2	Empfehlungen zur Verbesserung der THG-Bilanzen bei der Behandlung biogener Abfälle	63
10	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	65
11	LITERATURVERZEICHNIS	66
12	ANHANG	73

ZUSAMMENFASSUNG

Getrennt gesammelte biogene Abfälle werden entweder aerob in Kompostanlagen oder anaerob in Vergärungsanlagen behandelt. Beide Behandlungsverfahren verursachen Emissionen von Treibhausgasen (Methan, Lachgas, z. T. CO₂ aus fossilen Quellen), etwa durch den Energieaufwand für die Behandlung, durch die ablaufenden biologischen Prozesse, durch unvollständige Verbrennung in Gasmotoren, durch Aufbereitungsverluste etc.

Emission von THG

Den Emissionen stehen Gutschriften gegenüber, etwa durch den Ersatz von Handelsdünger und durch die Kohlenstoff-Fixierung im Boden. Bei der Vergärung kommen zusätzliche Gutschriften durch die Einspeisung von Strom, Wärme oder durch zu Biomethan aufbereitetem Biogas hinzu.

Ziel des vorliegenden Berichtes ist es, die Kompostierung und Vergärung von biogenen Abfällen in Hinblick auf Klimarelevanz und Energieeffizienz zu vergleichen.

Ziele der Studie

Im Rahmen der Studie wurden keine Messungen und Probenahmen durchgeführt. Daten wurden vor allem durch Literaturrecherche erhoben.

Als Behandlungswege wurden folgende Varianten betrachtet:

- offene Kompostierung,
- teilgeschlossene Kompostierung,
- Nassvergärung mit den Verfahrensvarianten mit und ohne Separierung des Gärrestes.
- Trockenvergärung mit Separierung des Gärrestes.

Bei der Trocken- und Nassvergärung wurden die Nutzungen des Biogases zur

- Stromerzeugung,
- Stromerzeugung mit Nutzung der Abwärme und
- Aufbereitung von Biogas zu Biomethan

unterschieden.

untersuchte Behandlungs- verfahren

Nettoenergiegewinn und Energieeffizienz der Behandlungsverfahren

Der Nettoenergiegewinn ist bei der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan am höchsten und beträgt im Mittel 599 kWh/t biogener Abfall, wobei jedoch große Unterschiede zwischen den einzelnen Ausgangssubstraten auftreten (425 kWh/t Biotonne, 856 kWh/t Küchen- und Kantinenabfälle).

Der Nettoenergiegewinn ist bei der Nutzung von Biogas zur Strom- und Wärmeerzeugung auch bei vollständiger Abgabe der Wärme an externe NutzerInnen rund 15 % geringer.

Der Nettoenergiegewinn bei Nutzung des Biogases in einem Blockheizkraftwerk bei ausschließlicher Stromgewinnung liegt je nach Abfall zwischen 159 kWh/t (Biotonne) und 342 kWh/t (Speisereste), im Mittel bei 230 kWh/t Ausgangsmaterial.

durchschnittlicher Nettoenergiegewinn

Im Schnitt über alle biogenen Abfälle werden bei der Erzeugung von Biomethan 48 % des Energieinhaltes des Abfalls (38 % bei Grünschnitt bis 62 % bei Speiseresten), bei der Erzeugung von Strom und vollständiger Nutzung der erzeugten Wärme 41 % des Energieinhaltes genutzt (33 % bei Grünschnitt bis 53 % bei Speiseresten). Wird ausschließlich Strom aus Biogas erzeugt, so werden im Schnitt nur 18 % des Energieinhalts des Abfalls genutzt (15 % bei Grünschnitt bis 25 % bei Speiseresten).

Wird der Gärrest kompostiert, so sinkt der Nettoenergiegewinn im Mittel um 44 kWh/t. Die Energieeffizienz sinkt im Vergleich zur Behandlung ohne Separierung des Gärrestes um 3 bis 4 Prozentpunkte.

Treibhausgas (THG)-Bilanzen

Die höchsten THG-Emissionen (bis 155 kg CO_{2-eq}/t Speiseabfälle) und die höchsten THG-Gutschriften (bis 310 kg CO_{2-eq}/t Speiseabfälle) weisen die Varianten mit Erzeugung von Biomethan auf. Die geringsten Emissionen treten bei der teilgeschlossenen Kompostierung (60 kg CO_{2-eq}/t) auf, die geringsten Gutschriften sind bei der offenen und bei der teilgeschlossenen Kompostierung mit 24 kg CO_{2-eq}/t zu verzeichnen.

Die Vergärung mit Aufbereitung des Biogases zu Biomethan weist mit Werten bis zu – 171 kg CO_{2-eq}/t (Speiseabfälle) die beste THG-Bilanz auf. Diese liegen um 15–33 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial über den Varianten, in denen aus dem Biogas Strom erzeugt und die Wärme vollständig genutzt wird.

Die Vergärung ohne Separierung des Gärrestes hat einen deutlich besseren Saldo als die Vergärung mit Separierung und anschließender Kompostierung, solange die Emissionen vom Gärrestlager kleiner als 5 % sind.

Die Vergärung mit Separierung des Gärrestes von biogenen Abfällen mit relativ geringem Gasertrag (< rd. 55 kg Methan pro Tonne Ausgangsmaterial, z. B. Bio-tonne) weist bei alleiniger Erzeugung von Strom eine schlechtere THG-Bilanz auf als die Kompostierung.

Die Kompostierung von Abfällen weist dann eine bessere THG-Bilanz auf als die Nassvergärung ohne Separierung, wenn hohe THG-Emissionen vom Gärrestlager auftreten und nur Strom genutzt wird.

Empfehlungen

Die Vergärung von biogenen Abfällen weist in vielen Fällen eine bessere THG-Bilanz auf als die Kompostierung.

Eine gasdichte Abdeckung des Gärrestlagers mit energetischer Nutzung des Restgases ist als Stand der Technik vorzuschreiben, da Emissionen vom Gärrestlager stark die THG-Bilanz der Vergärung beeinflussen.

Bei der Standortfindung von Vergärungsanlagen ist auf die Möglichkeit einer weitgehenden Nutzung der erzeugten Wärme Augenmerk zu legen. Die Nutzung der erzeugten Wärme verbessert bei Biogasanlagen deutlich die THG-Bilanz.

Bei der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan sollen Verfahren mit geringem Strom-/Wärmebedarf und geringem Methanschluß zur Anwendung kommen.

Durch eine gezielte Rotteführung können die THG-Emissionen aus der Kompostierung verringert werden.

SUMMARY

Biowastes which are collected separately are either treated aerobically in composting units or anaerobically in digesters. Both treatment processes give rise to greenhouse gas emissions (methane, nitrous oxide, sometimes CO₂ from fossil sources) – partly as a result of the energy demand for the process, partly due to the biological processes taking place, but also due to incomplete combustion in gas engines or losses during treatment etc.

Against the emissions, credits can be accounted for due to the replacement of commercial fertilisers and carbon fixation in soils. In the digestion process, supplies of electricity, heat or biomethane (derived from biogas) are accounted for as extra credits.

The aim of this report is to compare composting and the digestion of biowastes in terms of their climatic relevance and energy efficiency.

No measurements or sampling activities have been undertaken for this study. Data were mainly collected through literature research.

The following treatment options have been considered:

- open composting,
- partially closed composting,
- wet digestion with two options: with/without digestate separation,
- dry digestion process with digestate separation.

In dry and wet digestion, a distinction is made between the following options for biogas utilisation:

- electricity production,
- electricity production with heat utilisation and
- upgrading of biogas to methane

Net energy gain and energy efficiency for the above treatment options

Largest net energy gains are achieved by upgrading biogas to biomethane. The average net energy gain amounts to 599 kWh/t of biowaste, with considerable differences between individual source substrates (425 kWh/t of biowaste containers, 856 kWh/t of kitchen and canteen wastes).

The net energy gain is about 15% lower when using biogas for electricity and heat production, even where full utilisation of heat by external users is achieved.

For biogas utilisation in a cogeneration unit with electricity production only the net energy gain ranges, depending on the type of waste, between 159 kWh/t (biowaste container) and 342 kWh/t (food waste). The average net energy gain is 230 kWh/t of the source material.

Averaged over the whole range of biowastes, 48% (38% for grass cuttings up to 62% for food waste) of the energy content of waste is utilised in biomethane production and 41% in electricity production and full utilisation of waste heat (33% for grass cuttings up to 53% food waste). Where biogas is only used for electricity production, an average of only 18% of the waste energy content is used (15% for grass cuttings up to 25% for food waste).

Where the digestate is composted, the net energy gain decreases by an average of 44 kWh/t. Compared to treatment processes without digestate separation, the energy efficiency is reduced by 3 or 4 percentage points.

Greenhouse gas (GHG) balances

GHG emissions were found to be highest (up to 155 kg CO₂-eq/t of food waste) for treatment options with biomethane production, which also accounted for the largest GHG credits (up to 310 kg CO₂-eq/t of food waste). Emissions were found to be lowest for partially closed composting systems (60 kg CO₂-eq/t), with credits also found to be lowest for open and partially closed composting systems (24 kg CO₂-eq/t).

Digestion with upgrading of biogas to biomethane produced the best GHG balance with values up to – 171 kg CO₂-eq/t (food waste). These values are 15–33 kg CO₂-eq/t of source material higher than for options where biogas is used for electricity production and the heat is fully used.

For digestion processes without digestate separation the balance is considerably better than for digestion with separation and post-composting, as long as emissions from digestate storage remain below 5%.

In the case of digestion processes where the digestate of biowastes with relatively low gas yields (< ~ 55 kg of methane per tonne of source material, e.g. biowaste container) is separated, the GHG balance for the option where only electricity is produced is worse than in composting.

For the composting of wastes the GHG balance is better than for wet treatment processes without separation – if GHG emission levels from digestate storage are high and only the electricity is used.

Recommendations

In many cases, the GHG balance is better for biowaste digestion than composting.

Gas-tight sealing of digestate storage with energetic use of the residual gas should be prescribed as state-of-the-art technology, since emissions from digestate storage have a strong impact on the GHG balance of digestion processes.

As regards the siting of digestion plants, attention needs to be paid to possibilities for using the by-product heat as much as possible. Waste heat utilisation considerably improves the GHG balance of biogas facilities.

For the upgrading of biogas to methane, processes with a low energy/heat demand and low methane slip should be applied.

Specific management of the active composting stage can help reduce GHG emissions from composting.

1 EINLEITUNG

Die Behandlung getrennt gesammelter biogener Abfälle erfolgt entweder aerob in Kompostanlagen oder anaerob in Vergärungsanlagen. Während in Kompostanlagen nur Kompost erzeugt wird, wird in Vergärungsanlagen zusätzlich Biogas erzeugt, welches wiederum direkt in Strom und Wärme umgewandelt werden oder durch die Anreicherung des Methans zu Biomethan aufbereitet werden kann. Wird der Gärrest separiert, kann auch bei der Vergärung Kompost erzeugt werden.

Die Behandlung der biogenen Abfälle ist mit klimarelevanten Emissionen verbunden, einerseits durch den Energiebedarf für die Behandlung und andererseits durch Emissionen, die durch die ablaufenden biologischen Prozesse verursacht sind sowie durch technische Verluste bei der Aufbereitung/Nutzung des gebildeten Biogases (Methanschlupf bei der Verbrennung oder der Gasaufbereitung). Ebenso entstehen Emissionen bei der Aufbringung von Komposten und Gärresten.

Den Emissionen stehen bei den einzelnen Verfahren Gutschriften gegenüber, z. B. durch die Einspeisung von Strom, Wärme oder zu Methan aufbereitetem Biogas, wodurch andere Energieträger entsprechend eingespart werden können. Weitere Gutschriften ergeben sich etwa durch die Zufuhr von Nährstoffen in die Böden, wodurch mineralische Handelsdünger reduziert werden können, oder durch die Fixierung von Kohlenstoff in langfristig stabilen Humusverbindungen in Komposten.

Ziel des Projektes ist es, die Kompostierung mit der Vergärung von biogenen Abfällen in Hinblick auf Klimarelevanz und Energieeffizienz miteinander zu vergleichen, um Entscheidungsgrundlagen für die weitere Ausrichtung der Behandlung dieser Abfälle zu schaffen.

Folgende biogenen Abfälle werden im Rahmen dieser Studie betrachtet:

- Getrennt gesammelte biogene Abfälle (Biotonne),
- Grünabfälle (Straßenbegleitgrün, Parkabfälle, Friedhofsabfälle, Grünabfälle aus dem privaten Bereich),
- Küchen- und Kantinenabfälle,
- Marktabfälle.

***klimarelevante
Emissionen***

***Gutschriften durch
Energieerzeugung,
Nährstoffeintrag und
Kohlenstofffixierung***

Ziel des Projektes

untersuchte Abfälle

2 SYSTEMBESCHREIBUNG UND METHODIK

untersuchte Behandlungs- verfahren

Folgende Verfahren werden betrachtet:

- **Offene Kompostierung:** passiv (konvektiv) belüftete Mieten, Belüftung erfolgt durch regelmäßiges Umsetzen; Zeilenmieten oder Trapezmieten, Erzeugung von Fertigkompost; Einsatz des erzeugten Kompostes in der Landwirtschaft.
- **Teilgeschlossene Kompostierung:** Geschlossene, aktiv belüftete Intensivrotte, offene passiv belüftete Nachrotte; Erfassung der Abluft in der Intensivrotte; Reinigung der Abluft in einem Biofilter; Erzeugung von Fertigkompost; Einsatz des erzeugten Kompostes in der Landwirtschaft.
- **Nassvergärung¹ mit Separierung der Feststoffe:** teilgeschlossene Kompostierung des festen Gärrestes und anschließende Aufbringung in der Landwirtschaft; Reinigung des Presswassers in einer kommunalen Kläranlage².
- **Trockenvergärung mit Separierung der Feststoffe:** kontinuierliche Trockenvergärung³; teilgeschlossene Kompostierung des festen Gärrestes und anschließende Aufbringung in der Landwirtschaft; Reinigung des Presswassers in einer kommunalen Kläranlage.
- **Nassvergärung (Co-Vergärung):** Nassvergärung ohne Separierung der Feststoffe: Ausbringung des Gärrestes in der Landwirtschaft.

untersuchte Verwertungswege des Biogases

Bei allen Vergärungsverfahren wurden folgende Verwertungswege des erzeugten Biogases untersucht:

- Verstromung ohne Nutzung der Abwärme,
- Verstromung mit Nutzung der Abwärme,
- Aufbereitung zu Biomethan.

Eingangsdaten für die Berechnungen wurden über Literaturrecherche gewonnen. Es wurden keine eigenen Messungen durchgeführt.

¹ Verfahren, bei denen das Substrat im Fermenter eingangs einen Trockensubstanzanteil von 10–15 % aufweist, vollständige Durchmischung findet statt

² Behandlung von Presswasser in kommunalen Kläranlagen: Die Einleitung von Abwasser, dessen Beschaffenheit mehr als geringfügig von der des häuslichen Abwassers abweicht, in die wasserrechtlich bewilligte Kanalisation eines anderen wird als Indirekteinleitung bezeichnet. Unter welchen Voraussetzungen derartige Abwässer in die Kanalisation eingeleitet werden dürfen wird in der Indirekteinleitungsverordnung (IEV; BGBl. II Nr. 222/1998 i.d.g.F) vorgegeben. Gemäß der IEV bedarf die Einleitung von Abwässern aus der biologischen Abfallbehandlung einer wasserrechtlichen Bewilligung.

³ Verfahren, bei dem das Inputmaterial im Fermenter eingangs einen Trockensubstanzanteil von 20–40 % aufweist; es findet keine vollständige Durchmischung statt (Pfropfenstrom).

Bei den eingesetzten und substituierten fossilen Energieträgern sowie bei Strom wurden die Vorketten zur Erzeugung dieser Energieträger berücksichtigt. Dazu wurde das Emissionsmodell GEMIS (Globales Emissionsmodell Integrierter Systeme)⁴ bzw. die teilweise an österreichische Bedingungen angepasste Version GEMIS Österreich Vers. 4.5 verwendet.

Betrachtet wurden die klimarelevanten Gase Kohlendioxid (CO₂; aus fossilen Quellen wie z. B. Diesel, Erdgas), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O).

**untersuchte
Treibhausgase**

Als Zeithorizont für die Klimarelevanz der einzelnen Treibhausgase wurden 100 Jahre gewählt. Für Methan wurde dementsprechend ein Treibhausgasfaktor (Äquivalenzfaktor) von 25 und für Lachgas von 298 verwendet (IPCC 2007).

Im Bericht angegebene Emissionen an THG sind immer als CO_{2-eq} zu verstehen.

Für die Gutschrift aus der erzeugten Strommenge bzw. für die Emissionen bei zugekauftem Strom wurde der österreichische Strommix 2008 angesetzt.

**österreichischer
Strommix**

Als Bezugsgröße für den Vergleich der Behandlungsverfahren wurde eine Tonne biogenes Inputmaterial gewählt. Werden in einem Prozess zusätzliche Inputmaterialien benötigt (z. B. Strukturmaterial für die Kompostierung der Pressrückstände), so werden diese Materialien nicht in die Berechnung der THG-Emissionen bzw. der Gutschriften einbezogen. Analog wird bei einer Co-Vergärung, bei der biogene Abfälle in untergeordneten Mengen einem anderen Gärsubstrat zugegeben werden, das Hauptgärsubstrat nicht berücksichtigt.

**Bezugsgröße: 1 t
biogenes
Inputmaterial**

In der Literatur sind allerdings vielfach nur Emissionswerte für die bei der Behandlung erzeugten Endprodukte ausgewiesen (z. B. Emissionen bei der Ausbringung von 1 t Kompost). Um Emissionen, Gutschriften etc. jedoch auf die gewählte Bezugsgröße (eine Tonne Ausgangsmaterial) beziehen zu können (z. B. THG-Emissionen je Tonne Speisereste bei der Trockenvergärung mit Kompostierung des Gärrestes) werden Massenbilanzen der einzelnen Verfahren benötigt. Ausgangspunkt für die Massenbilanz ist eine Tonne aufbereiteter biogener Abfall.

**Erstellung von
Massenbilanzen**

Für die offene sowie die teilgeschlossene Kompostierung wurden für alle vier betrachteten biogenen Abfälle folgende Annahmen für die Massenbilanzen getroffen:

- Aus einer Tonne aufbereitetem Ausgangsmaterial werden 350 kg Kompost (Feuchtsubstanz, FS) erzeugt.

Die Behandlung von allfällig anfallendem Sickerwasser wurde bei der Berechnung der THG-Emissionen nicht berücksichtigt.

⁴ GEMIS berücksichtigt alle wesentlichen Prozesse von der Primärenergie- und Rohstoffgewinnung bis zur Nutzenergie- und Stoffbereitstellung und bietet somit die Möglichkeit, neben den produktspezifischen lokalen Emissionen auch die vorgelagerten Emissionen zu berücksichtigen.

**Annahmen für
Massenbilanzen**

Für die teilgeschlossene Kompostierung der bei der Nass- und Trockenvergärung separierten Gärreste wurden folgende Annahmen für die Massenbilanzen getroffen:

- Die biogenen Ausgangsmaterialien haben vor der Vergärung einen Trockensubstanzgehalt von 35 %;
- der Verlust an Trockensubstanz (TS) durch die Vergärung der einzelnen Ausgangsmaterialien ergibt sich durch den erwarteten Gasertrag und die Anteile an CH₄ und CO₂ im Biogas;
- bei der Feststoffseparierung gelangen unabhängig vom Ausgangsmaterial 80 % der nach der Vergärung verbleibenden TS in den festen Gärrest, 20 % in die flüssige Phase;
- der TS-Gehalt des festen Gärrestes beträgt unabhängig vom Ausgangsmaterial 35 %;
- Der Rotteverlust bei der Kompostierung der festen Gärrückstände beträgt unabhängig vom vergorenen Ausgangsmaterial 40 % der Feuchtmasse.

Unter diesen Annahmen werden je Tonne biogener Abfälle letztlich zwischen 225 und 300 kg Kompost aus dem Gärrest erzeugt.

Bei der Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes wurden folgende Annahmen für die Massenbilanzen getroffen:

- Die organische Substanz des Gärrestes wird nach der Aufbringung auf dem Feld aerob stabilisiert („kompostiert“) und damit teilweise in stabile Humusverbindungen überführt.
- Die produzierte Kompostmenge aus den Gärresten ist gleich hoch wie die produzierte Kompostmenge aus der aeroben Kompostierung.

Die Entsorgung der abgetrennten Reststoffe aus der Kompostierung sowie der Gärgut-/Gärrestaufbereitung wird nicht berücksichtigt.

3 AUFKOMMEN UND BEHANDLUNG BIOGENER ABFÄLLE

3.1 Beschreibung und Herkunft der betrachteten Abfallarten

untersuchte Abfälle

3.1.1 Getrennt gesammelte biogene Abfälle (Biotonne)

Die in Biotonnen getrennt gesammelten biogenen Abfälle setzen sich aus organischen Küchenabfällen bzw. Speisereisten, aus Pflanzenresten und organischen Abfällen aus Hausgärten, wie beispielsweise Grasschnitt, Laub, Blumen, Fallobst bzw. sperrigen Grünabfällen wie Strauch- und Baumschnitt zusammen.

3.1.2 Grünabfälle

Grünabfälle setzen sich im Wesentlichen aus Gras, Laub, Strauch- und Baumschnitt zusammen und stammen sowohl aus dem nicht-privaten als auch dem privaten Bereich. Darunter fallen kommunale Garten- und Parkabfälle (Grünanlagen, Parks und Sportstätten, Straßenbegleitgrün, Flussläufe), getrennt erfasste Grünabfälle aus Haus- und Schrebergärten sowie biogene Abfälle aus dem Friedhofsbereich.

3.1.3 Küchen- und Kantinenabfälle

Küchen- und Kantinenabfälle stammen aus Betrieben der Gastronomie, aus der Beherbergung, aus Catering-Einrichtungen sowie Großküchen von Schulen, Krankenhäusern, Kasernen, Heimen etc. Es handelt sich um pflanzliche und tierische Abfälle aus der Zubereitung und dem nicht vollständigen Verzehr von Nahrungsmitteln (vornehmlich Kochreste bzw. Tellerreste) einschließlich gebrauchten Speiseöls.

3.1.4 Marktabfälle

Marktabfälle sind Abfälle aus dem Lebensmittelhandel bzw. von Lebensmittelgroß- oder Lebensmitteldetailmärkten. Sie bestehen aus einem Gemisch aus pflanzlichen und tierischen Rückständen aus dem Warenangebot des Handels und der Märkte, aus Verpackungen (zumeist aus Holz, Kartonagen und Kunststoffen), aus original verpackten und abgelaufenen oder nicht abgelaufenen Lebensmitteln sowie in geringeren Anteilen aus Restmüll.

3.2 Abfallaufkommen

Massenaufkommen biogener Abfälle

Das Aufkommen der in dieser Studie betrachteten Abfälle betrug im Jahr 2008 rd. 2 Mio. t (BMLFUW 2009).⁵ Nur ein Teil wird tatsächlich getrennt erfasst und einer Verwertung zugeführt. Ein nicht unbedeutender Anteil der Grünabfälle verbleibt am Anfallsort und verrottet dort ohne Einbringung in Verwertungsanlagen (BMLFUW 2009).

Biotonne: Insgesamt wurden im Jahr 2008 in Österreich 475.623 t Abfälle über die Biotonne gesammelt (BMLFUW 2009). Gemäß Untersuchungen von ADEMILUA (2009) beträgt der Anteil an Küchenabfällen im Biotonnematerial etwa 45 %.

Grünabfälle: Das Aufkommen von Grünabfällen aus dem nicht privaten Bereich betrug im Jahr 2008 656.000 t, wobei etwa 245.000 t auf Garten- und Parkabfälle, 207.000 t auf Friedhofsabfälle und 204.000 t auf Straßenbegleitgrün entfielen. Zusätzlich dazu wurden 470.300 t Grünabfälle aus dem privaten Bereich getrennt gesammelt (BMLFUW 2009).

Küchen- und Kantinenabfälle: Das Aufkommen an Küchen- und Kantinenabfällen betrug im Jahr 2008 103.500 t (BMLFUW 2009).

Marktabfälle: Das Aufkommen an Marktabfällen wird mit maximal 247.000 t angegeben (BMLFUW 2009).⁶

3.3 Anlagen zur Behandlung biogener Abfälle und Einsatzmengen

3.3.1 Behandlung in Kompostieranlagen

Kapazität von 1.500.000 t/a

Insgesamt besitzen die österreichischen Kompostieranlagen eine Kapazität von knapp 1.500.000 t/a (ARGE KOMPOST/ BIOGAS). Neben biogenen Abfällen werden auch andere Abfallarten wie 30.000 t/a Wirtschaftsdünger (BMLFUW 2009), ca. 10 % des Klärschlamm-aufkommens und ca. 45.000 t/a Gärrest aus Abfallvergärungsanlagen kompostiert.

3.3.2 Behandlung in Vergärungsanlagen

5 österreichische Großanlagen

In Österreich sind derzeit 5 Großanlagen zur Vergärung biogener Abfälle in Betrieb: Die Anlage Salzburg – Siggerwiesen ist als Trockengärverfahren (System DRANCO) konzipiert, ebenso wie die Vergärungsanlage Lustenau und die Anlage Roppen (jeweils System KOMPOGAS, thermophil). Die Anlage Wels (System LINDE, thermophil) und die Anlage Wien entsprechen dem Nassgärverfahren. Zusammen haben diese 5 Anlagen eine Behandlungskapazität von etwa 80.000 Jahrestonnen Bioabfall (BMLFUW 2006, Betreiberangaben).

⁵ Zusätzlich zu den genannten Abfallströmen wird ein Aufkommen an biogenen Abfällen von jährlich etwa 1.500.000 t einer Eigenkompostierung zugeführt. Diese Abfälle sind in ihrer Zusammensetzung jener der getrennt gesammelten Abfälle aus Haushalten vergleichbar (BMLFUW 2009).

⁶ Marktabfälle werden nur zum Teil getrennt erfasst

Zur Menge der in Co-Vergärungsanlagen eingesetzten biogenen Abfälle liegen keine Angaben vor. Nach Angaben des Lebensministeriums (BMLFUW 2009) befanden sich 2009 186 Biogasanlagen, die keine reinen NAWAROS⁷-Anlagen sind, mit einer Gesamtkapazität von mehr als 393.000 Tonnen in Betrieb (Datenstand November 2009).

3.4 Verwertungs-/Entsorgungswege der erzeugten Endprodukte (inkl. Mengen)

Die Erhebung der Verwertung der erzeugten Komposte und des Gärgutes wird derzeit durch die ARGE Kompost & Biogas Österreich im Auftrag des Lebensministeriums durchgeführt. Mit Redaktionsschluss lag eine umfangreiche Liste mit Anlagen und Inputmengen vor, die aber teilweise noch durch die ARGE Kompost & Biogas verifiziert werden mussten.

3.5 Zuordnung der Abfälle zu Behandlungsverfahren

3.5.1 Kompostierung

Biogene Abfälle eignen sich gut für die Kompostierung, wobei jedoch Strauchschnitt und Äste nährstoffarm und nur schwer biologisch abbaubar sind. Bei diesen Komponenten steht eine thermische Verwertung im Vordergrund. Es muss jedoch ausreichend Strukturmaterial erhalten bleiben, um eine qualitativ hochwertige Kompostierung biogener Materialien oder fester Gärreste durchführen zu können.

Eine geordnete Kompostierung setzt eine entsprechende Zusammensetzung des Ausgangsmaterials voraus (C:N-Verhältnis, Wassergehalt etc.). Eine zielgerichtete Mischung verschiedener biogener Abfälle ist deshalb zumeist notwendig. In entsprechenden Mischungen können alle betrachteten biogenen Abfälle kompostiert werden.

Mischung der Einzelkomponenten

3.5.2 Vergärung

Mit wenigen Ausnahmen eignen sich kompostierbare Materialien auch für die Vergärung. Ligninreiche (holzige) Materialien wie Baum- und Strauchschnitt sind jedoch für die Vergärung nicht geeignet, da Lignin anaerob nicht abgebaut werden kann. Materialien mit höherem Rohfaseranteil (z. B. Grasschnitt mit spätem Erntezeitpunkt) erschweren den anaeroben Abbau und führen zu geringeren Gaserträgen.

ligninreiche Materialien sind ungeeignet

Material aus der Biotonne, Grünschnitt, Landschaftspflegematerial, auch Stroh, Gras und andere (landwirtschaftliche) Abfälle sind typischerweise schlecht oder gar nicht rührbar und weisen oft einen hohen Anteil an Störstoffen auf. Für einen störungsfreien Reaktorbetrieb ist daher eine weitestgehende Voraufbereitung dieser Abfälle notwendig.

Voraufbereitung notwendig

⁷ NAWARO: **N**achwachsende **R**ohstoffe

Grünabfälle aus dem nicht privaten Bereich

Bei Strauchschnitt und Ästen steht eine energetische Nutzung im Vordergrund, da diese Materialien nährstoffarm und biologisch schwer abbaubar sind (hoher Ligninanteil von 20–30 %). Der Einsatz erfolgt z. B. im Brennstoffmix mit anderen Materialien.

Ausreichend Strukturmaterial muss jedoch erhalten bleiben, um eine qualitativ hochwertige Kompostierung biogener Materialien oder fester Gärreste durchführen zu können.

Andere Grünabfälle (aus Grünanlagen, Parks und Sportstätten; Straßenbegleitgrün, Flussläufe etc.) sind strukturreiche, fasrige Abfälle und damit für Trockengärsysteme geeignet. Eine Nassvergärung ist nach Zerkleinerung des Abfalls ebenfalls möglich.

Küchen- und Kantinenabfälle (Speisereste)

Diese Abfälle sind stärker wasserhaltig und pastös mit einem hohen Anteil an leichtabbaubaren Stoffen und dadurch vor allem zur Nassvergärung geeignet.

Biotonnematerial

Dieses Material kann unterschiedliche Mengen an Grünabfallanteilen aufweisen (z. B. saisonal variabel).

Für eine Nassvergärung ist eine Zerkleinerung notwendig.

Bei Biotonnematerial mit hohem Grünabfallanteil ist vor der Vergärung eine Klassierung sinnvoll, bei der das Überkorn abgetrennt und einer Kompostierung oder einer energetischen Verwertung zugeführt wird.

Im Fall eines hohen Anfalls an Strauch- und Baumschnitt kann eine getrennte Erfassung sinnvoll sein.

4 BERECHNUNG DER ENERGIEBILANZ

Für die Kompostierung wird keine Energiebilanz erstellt, da bei diesem Verfahren die organische Masse aerob unter Bildung von CO₂ abgebaut wird und die entstehende Wärme energetisch nicht genutzt werden kann. Es wird nur der Energieaufwand dargestellt.

4.1 Energieaufwand bei offener Kompostierung

Bei der offenen Kompostierung wird Energie für die Materialaufbereitung, das Auf- und Umsetzen der Mieten und das Absieben des Kompostes benötigt. In der Literatur konnten nur wenige Energieangaben gefunden werden.

Energieeinsatz

Tabelle 1: Energiebedarf der offenen Kompostierung (in kWh je Tonne biogener Abfall).

elektrischer Energiebedarf	Treibstoff	Gesamtenergiebedarf	Literatur
2,8–3,6		25,75	SPRINGER (2009)
		45 (30–60)*	EPEA (2008)
27*	33*		SCHMIDT & KEHRES (2009)
3,75	31,6		LECHNER et al. (2005)

* Kompostanlagen (nicht unterschieden ob offene oder teilgeschlossene Anlagen)

Angesetzte Werte für den Energiebedarf der offenen Kompostierung in den weiteren Berechnungen: Gesamtenergiebedarf 35 kWh/t Ausgangsmaterial; davon 30 kWh/t Diesel, 5 kWh/t Strom.

4.2 Energieaufwand – teilgeschlossene Kompostierung

Bei der teilgeschlossenen Kompostierung wird Energie für die Materialaufbereitung und das Aufsetzen der Mieten, für Belüftung (Druck- oder Saugbelüftung) in der Hauptrotte (Heißrotte), für die Hallenentlüftung, für den Betrieb des Biofilters und die Absiebung des Kompostes benötigt.

Energieeinsatz

Die eingesetzte Lüftungstechnik und die Führung des Luftstroms sind entscheidende Parameter für die Höhe des Energieverbrauchs (MAILE 2008, zit. in SPRINGER 2009). Bei belüfteten Verfahren beträgt der Anteil an elektrischer Energie im Schnitt rund 60 % des gesamten Energieverbrauchs (SPRINGER 2009).

Tabelle 2: Energiebedarf der (teil)geschlossenen Kompostierung (in kWh je Tonne biogener Abfall).

elektrischer Energiebedarf	Treibstoff	Gesamtenergiebedarf	Literatur
		100	EDELMANN & SCHLEISS (2001)
		60–80	MARGULL & STEGMANN (1996)
60–80			HEIN & SCHNEBLE (2008)
30–120 (Tafelmiete)			UEC (2010)
30–40 (Boxen, Container)			
20–30 (Tunnelverfahren)			
		30–100 (kleine Anlagen 5.000–6.000 t)	BIDLINGMAIER & MÜSKEN (1995)
		40–80 (mittlere Anlagen 10.000–12.000 t)	
		20–60 (große Anlagen 20.000–25.000 t)	
45			KERN & RAUSSEN (2009)
22	15*	37*	SPRINGER (2009)
(7–52)	(10–16,5)	(22–62*)	
25–50			RECYCLINGPORTAL (2010)

* Angaben in Literaturquelle sind auf 1 Tonne Output bezogen; Umrechnung der Durchschnittswerte auf das Ausgangsmaterial mit einem Masseverlust von 65 %.

Angesetzte Werte für den Energiebedarf der teilgeschlossenen Kompostierung: Gesamtenergiebedarf 70 kWh pro Tonne Ausgangsmaterial; davon 15 kWh/t Diesel, 55 kWh/t Strom

4.3 Energiebilanz – Vergärung

Energieaufwendung abzüglich abgegebener Energie

Energiebilanzen wurden für die Nass- und Trockenvergärung sowohl für die Erzeugung von Strom und Wärme in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) als auch für die Erzeugung von Biomethan erstellt. Bei den Energiebilanzen werden die Aufwendungen an Energie für die Erzeugung des Biogases bzw. des Biomethans sowie für die Kompostierung der anfallenden festen Gärreste der extern abgegebenen Energiemenge (in Form von Strom, Wärme, Biomethan) gegenübergestellt.

Bezugsgröße der Energiebilanzen ist 1 t Ausgangsmaterial an biogenen Abfällen.

Energieeinsatz

Vergärungsanlagen benötigen für die Erzeugung von Biogas sowohl elektrische Energie als auch Wärmeenergie.

Elektrische Energie wird vor allem für das Durchmischen der Gärreaktoren, den Betrieb des Blockheizkraftwerkes sowie die Aufbereitung der Abfälle benötigt. Zusätzlich wird Strom u. a. für die Einbringung des Substrats und für Pumpen benötigt.

Wärmeenergie wird einerseits eingesetzt, um die zugeführte Substratmenge auf das nötige Temperaturniveau im Fermenter zu bringen und andererseits, um die Temperatur im Fermenter konstant zu halten.

Wird aus dem Biogas Biomethan erzeugt, so ist ein zusätzlicher Energieeinsatz für die Aufbereitung notwendig. Bei der Biomethanherzeugung ist zu berücksichtigen, dass die Anlagen normalerweise erst ab einer bestimmten Mindestgröße zusätzlich zur Gasaufbereitung ein eigenes BHKW betreiben. Ist kein eigenes BHKW vorhanden, so müssen die Energie für den Eigenstrombedarf durch Stromzukauf und der Wärmebedarf durch das erzeugte Biogas oder durch den Zukauf von Energieträgern gedeckt werden.

4.3.1 Eigenenergiebedarf bei Nassvergärung

In der folgenden Tabelle sind Literaturdaten über den Stromeigenverbrauch von Nassvergärungsanlagen angeführt.

Tabelle 3: Stromeigenverbrauch von Nassvergärungsanlagen mit BHKW (in kWh je t biogener Abfall).

Stromeigenverbrauch	Stromeigenverbrauch in % der erzeugten Strommenge	Literatur
100 (einstufig mesophiles Verfahren)		EPEA (2008)
98 (BTA-Verfahren)		LEIBLE et al. (2003)
89		HOPPENHEIDT et al. (2000)
85 (Anlagen mit 10.000 t Input)		KERN & TURK (2007)
75 (Anlagen mit 20.000 t Input)		
65 (Anlagen mit 40.000 t Input)		
	20 %	VOGT et al. (2008)
50		MARGULL & STEGMANN (1996)
7,4–47	5,0–20,6 %	FNR (2009)
Durchschnitt 26	Durchschnitt: 7,9 %	
	5–9 % bei optimierten Anlagen; bei biogenen Abfällen etwas höher	PUCHAS et al. (2008)
	10 %	IE (2007)
16–57	4,6 bis 17,4 %	LEHNER et al. (2009)
	Literaturwerte: 2–10 %, Durchschnitt 5,8 % Angaben der Anlagenhersteller für eine Standardanlage: 5–8 %, Durchschnitt 6,5 %.	DACHS & REHM (2006)
48		KERN & RAUSSEN (2005)
	15 %	KERN & RAUSSEN (2009)
	11 %	SCHLEISS (1999)
0,51–51	0,53–14 %, im Mittel 6 %	FAL (2005)
	2,5 %	ARGE BIOGAS

Die Bandbreite der Eigenstromverbräuche ist sowohl in Hinblick auf die absoluten Werte (kWh/t Input) als auch auf die relativen Werte (% der Eigenstromproduktion) groß. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass die Anlagen in ganz unterschiedlichem Ausmaß biogene Materialien einsetzen (nur Bioabfälle – Cofermentation mit Gülle – nur nachwachsende Rohstoffe etc.). Der elektrische Energieverbrauch für Anlagen mit Bioabfall als Gärsubstrat ist deutlich höher als bei den anderen Anlagen, da zusätzlicher Aufwand bei der Aufbereitung der Abfälle hinzukommt. Nach JUNGBLUTH et al. (2007) teilt sich die Energie zwischen Aufbereitung (Zerkleinerung, Störstoffabtrennung, tlw. Hygienisierung), Vergärung und Entwässerung im Verhältnis 37,5 : 50 : 10 auf. Hinzu kommen Unterschiede in der technischen Ausstattung der Anlagen (z. B. unterschiedliche Rührwerke).

Angesetzter Wert für die Berechnungen: Stromeigenverbrauch – Nassvergärung: 70 kWh/t Input

wesentliche Stromverbraucher

Die wesentlichen Stromverbraucher bei der Nassvergärung mit anschließender energetischer Nutzung des Biogases in einem BHKW sind die Rührwerke (bei Nassvergärung) und die BHKWs (Notkühler, Gasverdichter, Umwälzpumpen der Motorkühlung, Raumlüftung etc.).

In der folgenden Tabelle sind die anteiligen Energieverbräuche von zwei wesentlichen Stromverbrauchern angeführt.

Tabelle 4: Hauptstromverbraucher in Biogasanlagen.

Verbraucher	Anteil an Eigenstrom	Literatur (in Klammer: Anzahl der in der Literatur berücksichtigten Anlagen)
BHKW	44 % (23–60 %)	DACHS & REHM (2006) (5)
BHKW	26 % (9–40 %)	FAL (2005) (8)
BHKW	55 % (31–88 %)	LEHNER & EFFENBERG (2009) (7)
Rührwerk	39 % (29–54 %)	DACHS & REHM (2006) (5)
Rührwerk	38 % (15–57 %)	FAL (2005) (8)
Rührwerk	25 % (5–58 %)	LEHNER & EFFENBERG (2009) (8)

Der Stromverbrauch des BHKW ist zu einem großen Teil von der verwerteten Gasmenge abhängig, insbesondere, wenn Wärme primär für den Eigenverbrauch produziert wird.

Bei den Rührwerken kann davon ausgegangen werden, dass deren Stromverbrauch nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Gasproduktion steht.

Es liegen keine Daten vor, die es erlauben, den Eigenstrombedarf belastbar mit dem Gasertrag in Abhängigkeit vom Gärsubstrat zu koppeln.

Der Eigenstromverbrauch je Tonne Inputmaterial wird deshalb für die Berechnungen unabhängig von der gebildeten Gasmenge angesetzt.

Wird eine Separation des Gärrestes durchgeführt, so benötigt diese Energie. Aufgrund der großen Schwankungsbreite und Unsicherheit des gesamten Energieaufwandes bei der Vergärung wird der Energieverbrauch für die Separation jedoch nicht gesondert betrachtet. Der Stromverbrauch von Pressschnecken separatoren liegt bei rd. 0,4 kWh pro m³ aufbereitetem Gärrest, bei Dekantern bei 7 kWh pro m³ (KTBL 2007).

**Gärrest-Separation
nicht berücksichtigt**

Wärmeeigenbedarf

Wärme wird für die Erwärmung des Substrats auf die Prozesstemperatur benötigt (ca. 37 °C bei mesophilen Verfahren). Hinzu kommt der Wärmebedarf zum Ausgleich der Abstrahlungsverluste des Fermenters, die von der Oberfläche des Fermenters, der Isolierung und der Temperaturdifferenz zwischen Betriebstemperatur im Fermenter und der Umgebungstemperatur abhängen.

Tabelle 5: Wärmeeigenverbrauch von Nassvergärungsanlagen (in kWh je Tonne biogener Abfall).

Wärmeeigenverbrauch	Wärmeeigenverbrauch in % der erzeugten Abwärme	Literatur
120		MARGULL & STEGMANN (1996)
89		HOPPENHEIDT et al. (2000)
93 (BTA-Verfahren)		LEIBLE et al. (2003)
	25 %	VOGT et al. (2008)
	30 %	IE (2007)
	bei massiver Cofermentation deutlich unter 20 %	FNR (2004)
44–94		FAL (2005)
48		KERN & RAUSSEN (2005)
	20 %	KERN & RAUSSEN (2009)
130 (50–180)		KERN & TURK (2007)
	21 %	SCHLEISS (1999)
	2,2–79 %	FAL (2005)
	5,5–21,5 %	FNR (2009)
	10 %	ARGE BIOGAS

Ange-setzter Wert für die Berechnungen des Wärmeeigenbedarfs: 90 kWh/t Input

Für die Verdünnung der biogenen Abfälle bei Nassvergärung wird angenommen, dass Prozesswasser verwendet wird, das nicht erwärmt werden muss. Der Wärmebedarf für das Erwärmen des Gärgutes und für die Aufrechterhaltung der Reaktortemperatur wird unabhängig von der gebildeten Gasmenge angesetzt.

Hygienisierung von Speiseresten

Bei der Vergärung von Speiseresten wurde eine Hygienisierung des Inputmaterials angenommen (1 h bei 70 °C). Der zusätzliche Wärmebedarf beträgt rund 50 kWh/t Material. Dafür kann die Abwärme des BHKWs genutzt werden bzw. kann bei Anlagen, die Biogas zu Biomethan aufbereiten, das Biogas in geeigneten Brennern zur Erwärmung eingesetzt werden.

Angesetzter Wert für die Hygienisierung von Speiseresten: Wärmebedarf von 50 kWh/t

4.3.2 Eigenenergiebedarf bei Trockenvergärung

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Literaturdaten zum Stromeigenverbrauch von Trockenvergärungsanlagen

Tabelle 6: *Stromeigenverbrauch von Trockenvergärungsanlagen (in kWh je Tonne biogener Abfall).*

Stromeigenverbrauch	Stromeigenverbrauch in % der erzeugten Strommenge	Literatur
85–100		HEIN & SCHNEBLE (2008)
73 (Valorga-Verfahren)		LEIBLE et al. (2003)
70		GESSLER & KELLER (1995)
65 (Anlagen mit 10.000 t Input), 55 (Anlagen mit 20.000 t Input) 45 (Anlagen mit 40.000 t Input)		KERN & TURK (2007)
	Garagenstromverfahren: 1 % Pfpfenstromverfahren: 5 %	IE (2007)
43–71		SCHLEISS & EDELMANN (2000)
24–47 (kontinuierliche Anlagen)		FNR (2009)

Angesetzter Wert für die Berechnungen: Stromeigenverbrauch: 70 kWh/t Input

Für die notwendige Hygienisierung von Speiseabfällen werden die gleichen Annahmen die in Kapitel 4.3.1 bei der Nassvergärung angeführt wurden, getroffen (zusätzlich 50 kWh Strom je Tonne Input).

Wärmeeigenbedarf

Die folgende Tabelle 7 gibt einen Überblick über Literaturdaten über den Wärmeeigenverbrauch von Trockenvergärungsanlagen

Tabelle 7: *Wärmeeigenverbrauch von Trockenvergärungsanlagen (in kWh je Tonne biogener Abfall).*

Wärmeeigenverbrauch	Wärmeeigenverbrauch in % der erzeugten Abwärme	Literatur
80–100		HEIN & SCHNEBLE (2008)
< 100 kWh/t bei einstufigen trockenen Verfahren		GESSLER & KELLER (1995)
70 (Valorga-Verfahren)		LEIBLE et al. (2003)
40 (20–80)		KERN & TURK (2007)
	sowohl beim Pfropfenstrom- als auch beim Garagenverfahren rd. 20 %	IE (2007)

Angesetzte Werte für die Berechnungen: Wärmeeigenbedarf: 70 kWh/t Input

4.3.3 Energieaufwand bei der Biomethanerzeugung

Der Energieaufwand für die Biomethanerzeugung setzt sich zusammen aus dem Betrieb der Vergärungsanlage (siehe Kapitel 4.3.1 und 4.3.2) und der Aufbereitung des erzeugten Biogases zu Biomethan.

Wegen der hohen Kosten für die Aufbereitung und Konditionierung des Gases und der erforderlichen Messtechnik zur Überwachung der Gasqualität und des Heizwertes ist die Wirtschaftlichkeit maßgeblich von der Anlagengröße abhängig. Basierend auf den heutigen Technologien ist erst bei Anlagengrößen oberhalb von 500 Nm³/h Rohgas ein wirtschaftlicher Betrieb zu erwarten (WEILAND 2006).

In Österreich wird an fünf Standorten Biogas zu Biomethan aufbereitet (Stand: Oktober 2010). Bei vier der fünf in Betrieb befindlichen Anlagen wurde zur bestehenden Nutzung des Biogases zur Erzeugung von Strom und Wärme nachträglich eine Gasaufbereitung installiert. Bei allen Anlagen liegt die verarbeitete Rohgasmenge deutlich unter 500 Nm³/h.

Pucking: 6 m³/h Biomethan, Netzeinspeisung, Druckwechseladsorption; Inputmaterial: Geflügel- und Schweinegülle (FGW 2010a).

Bruck an der Leitha: rund 100 m³/h Biomethan, Netzeinspeisung, zweistufiges Membranreinigungsverfahren (Gaspermeation) (FGW 2010); Inputmaterial: Gras, Rüben- und Maissilage sowie Reststoffe aus der Nahrungs- und Lebensmittelindustrie.

St. Margarethen am Moos: 35 m³/h Biomethan, Tankstelle, zweistufiges Membranreinigungsverfahren (Gaspermeation) (FGW 2010), Inputmaterial: nachwachsende Rohstoffe (Mais, Sonnenblume, Gras etc.).

Eugendorf: 40 m³/h Biomethan, Tankstelle und Einspeisung, Druckwechseladsorption, Inputmaterial: Heu, Frischgras und Grassilage (GRASKRAFT 2010).

Energieeinsatz

Anlagenstandorte

Engerwitzdorf: ca. 125 m³ Biomethan/h; Netzeinspeisung gemeinsam mit Biogas (30 % Biogas, 70 % Biomethan), Aminwäsche; nachwachsende Rohstoffe, kein BHKW (ÖÖ FERGAS 2010).

Berechnungen der Energiebilanz

Für die Berechnungen der Energiebilanz werden folgende Annahmen getroffen:

- Es wird kein eigenes BHKW betrieben
- Für zugekauften Strom wird der Kumulierte Energieaufwand (KEA) des Österreichischen Strommixes herangezogen (kWh/kWh).
- Da keine Angaben für den Stromverbrauch von Vergärungsanlagen ohne BHKW vorliegen, wurden bei der Nass- und der Trockenvergärung 40 % des Eigenstromverbrauchs abgezogen (siehe Kapitel 4.3.1).
- Die Wärmebereitstellung (Beheizung Fermenter, Hygienisierung bei Speiseabfällen) erfolgt mit dem am Standort erzeugten Rohbiogas mit einem Wirkungsgrad von 90 %.

Bei der Aufbereitung des Biogases zu Biomethan wird nur die Abtrennung des CO₂-Anteils betrachtet. Allfällige Energieaufwendungen (z. B. für die Entschwefelung) werden nicht berücksichtigt.

Verfahren der CO₂-Abtrennung

Zur CO₂-Abtrennung stehen mehrere Verfahren zur Verfügung, wie etwa Druckwechseladsorption (PSA), Druckwasserwäsche (DWW), Aminwaschverfahren oder Membrantrennverfahren.

Zwei der derzeit in Österreich betriebenen Anlagen wenden ein zweistufiges Membrantrennverfahren an, zwei die Druckwechseladsorption und eine die Aminwäsche.

Energieeinsatz

Die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan benötigt Energie in Form von Strom und teilweise Wärme.

Der zusätzliche Strombedarf für die Abtrennung von CO₂ beträgt bei der Druckwechseladsorption und der Druckwasserwäsche ca. 0,25–0,4 kWh/m³ Rohgas, für die Aminwäsche ca. 0,1 kWh/m³ Rohgas. Bei Aminwäschern ist jedoch zusätzlich ein Wärmebedarf von 0,3–0,7 kWh/m³ Rohgas gegeben (VOGT et al. 2008).

Beim Membrantrennverfahren (Gaspermeation) liegt der Stromverbrauch bei 0,5 kWh/m³ Rohgas (SCHULTE -SCHULZE 2006).

Vereinfacht wurde folgende Annahme getroffen: Der Stromverbrauch zur Aufbereitung von Rohbiogas zu Biomethan beträgt 0,4 kWh/m³ Rohbiogas

4.3.4 Erzeugte Nettoenergiemenge

Die erzeugte Nettoenergiemenge, die extern abgegeben werden kann, ergibt sich aus

- dem Energieinhalt des erzeugten Biogases,
- den Wirkungsgraden des Blockheizkraftwerkes (elektrisch, thermisch) im Falle der Erzeugung von Strom und Wärme,

- der erzeugten Biomethanmenge im Falle der Aufbereitung des Biogases zu Erdgasqualität,
- abzüglich der Energieaufwände für die Erzeugung des Biogases (siehe Kapitel 4.3.1 und Kapitel 4.3.2 bzw. des Biomethans (siehe Kapitel 4.3.3).

4.3.4.1 Energieinhalt des erzeugten Biogases

Die theoretische, rechnerische Biogasausbeute beträgt bei Kohlenhydraten 747 m³ pro Tonne abgebauter Glucose (50 % CH₄-Gehalt), bei Proteinen 700 m³ pro Tonne (71 % CH₄-Gehalt) und bei Fetten 1.250 m³ pro Tonne (68 % CH₄-Gehalt) (BRAUN 2006).

In WEILAND (2001) werden ähnliche Biogaserträge und Methangehalte angegeben:

- verdauliches Eiweiß: Biogasertrag von 600–700 m³ pro Tonne oTS⁸: 70–75 % Methangehalt;
- verdauliches Fett: Biogasertrag von 1.000–1.250 m³ pro Tonne oTS: 68–73 % Methangehalt;
- verdauliche Kohlenhydrate: Biogasertrag von 700–800 m³ pro Tonne oTS: 50–55 % Methangehalt.

Protein- und fettreiche Substrate führen somit zu höheren Methankonzentrationen im Biogas.

Die verschiedenen in Biogasanlagen eingesetzten biogenen Abfallströme unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung (Anteile an Kohlenhydraten, Fetten, Proteinen). Auch die Zusammensetzung eines Abfallstroms kann schwanken, z. B. in Abhängigkeit von der Jahreszeit, dem Sammelsystem etc. Daher schwanken sowohl Biogasausbeute als auch Biogaszusammensetzung mit dem eingesetzten Substrat in einem weiten Bereich.

In der folgenden Tabelle 8 sind Gaserträge verschiedener biogener Abfallarten, bezogen auf eine Tonne Feuchtsubstanz, aus diversen Literaturquellen angeführt.

unterschiedliche Gaserträge

⁸ oTS = organische Trockensubstanz

Tabelle 8: Gaserträge biogener Abfallarten (in m³/t biogener Abfall).

Abfallart	Biogasertrag	Literatur
Bioabfälle	96–120	HUPE et al. (1997)
Bioabfall	100	BMWA (2007)
Bioabfall – diskontinuierliche Trockenvergärung	100 (75–120)	KERN et al. (2008)
Bioabfall – kontinuierliche Trockenvergärung	120 (100–135)	KERN et al. (2008)
Bioabfall – Nassvergärung	125 (90–145)	KERN et al. (2008)
Bioabfall – Methanertrag	60	HOPPENHEIDT et al. (2000)
Bioabfall	100	EPEA (2008)
Speisereste (aus Gastronomie, Großverpflegungseinrichtungen und Supermärkten)	170	GRASMUG & BRAUN (2002)
Speiseabfall – Methanertrag	140	HOPPENHEIDT et al. (2000)
Speiseabfälle	220	DACHS & REHM (2006)
Marktabfälle	45–110	FNR (2004)
Marktabfälle	60	SCHOLZ (2000)
Grassilage	123,2	KELM & TAUBE (2007)
Grasschnitt	125	BMWA (2007)
Grassilage 1 Schnitt	195	DACHS & REHM (2006)
Wiesengras 1 Schnitt	103	DACHS & REHM (2006)
Grün- und Rasenschnitt (Pflege von Parkflächen, Straßenrändern)	150–200	FNR (2004)
Grünschnitt	150–200	BEKKER (2007)
Gartenabfälle inkl. Abfallstoffe aus öffentlichen Grünanlagen	150	SCHOLZ (2000)

Tabelle 9 enthält Angaben aus der Literatur über Methangehalte in Biogas aus unterschiedlichen biogenen Abfallströmen.

Tabelle 9: Methangehalte im Biogas (in %).

Abfallart	Methangehalt im Biogas (%)	Literatur
Bioabfälle	60–70	HUPE et al. (1997)
Bioabfälle	40–70	EPEA (2008)
Speisereste (aus Gastronomie, Großverpflegungseinrichtungen und Supermärkten)	72	GRASMUG & BRAUN (2002)
Marktabfälle	70	GRASMUG & BRAUN (2002)
Marktabfälle	60–65	BEKKER (2007)
Grün- und Rasenschnitt (Pflege von Parkflächen, Straßenrändern)	55–65	FNR (2004)

Aus der Literatur ist nicht klar ableitbar, dass biogene Abfälle in der Nass- oder Trockenvergärung unterschiedlich stark abgebaut werden. Bei BRAUN (2003) findet sich der Hinweis, dass ein- und zweistufige Anlagen nahezu identische Gasausbeuten erzielen. Die Gärungstemperatur beeinflusst teilweise die Umsatzgeschwindigkeit. Infolge der üblicherweise hohen hydraulischen Aufenthaltszeiten von mehreren Wochen verwischen sich jedoch mögliche Unterschiede

mesophiler bzw. thermophiler Verfahren, sodass in beiden Fällen üblicherweise vergleichbare Biogasausbeuten aus Bioabfall erzielt werden (BRAUN 2003). Laut VOGT et al. (2008) unterscheiden sich die verschiedenen Verfahren/Anlagentechniken aus ökologischer Sicht (ökobilanzielle Untersuchungen) nur wenig.

Im Rahmen der Studie wird deshalb hinsichtlich der Biogaserträge und deren Methangehalte der betrachteten biogenen Abfallströme nicht nach dem Verfahren unterschieden. Für die Kalkulationen werden die in Tabelle 10 angeführten Biogaserträge und Methangehalte verwendet.

**gleiche Gaserträge
bei Nass- und
Trockenvergärung**

*Tabelle 10: Gaserträge und Methangehalte biogener Abfälle je Tonne biogener Abfall
(Quelle: Umweltbundesamt).*

Abfallart	Biogasertrag	Methangehalt im Biogas
Bioabfälle (Biotonne)	110	60 %
Küchen- und Kantinenabfälle	170	70 %
Marktabfälle	110	65 %
Grünabfälle	150	60 %

4.3.4.2 Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerkes und Nutzung der erzeugten Energie

Der Wirkungsgrad des BHKW für die Erzeugung von Strom bzw. von Wärme ist u. a. von der Größe der Anlage abhängig.

Tabelle 11: Wirkungsgrade von BHKWs (VOGT et al. 2008).

elektrische Leistung in kW	elektrischer Wirkungsgrad	thermischer Wirkungsgrad
30	32 %	52 %
100	32 %	52 %
500	37,5 %	43 %
1.000	40 %	43 %
2.000	41 %	43 %

Die elektrische Leistung der österreichischen Biogasanlagen (289 Anlagen erfasst) beträgt rund 77,7 MW (ENERGIE CONTROL 2010). Dies entspricht einer durchschnittlichen Leistung je Anlage von rund 270 kW.

Im Rahmen dieser Studie werden folgende Werte in den Berechnungen angesetzt:

elektrischer Wirkungsgrad η_{el} = 35 %
thermischer Wirkungsgrad η_{th} = 45 %

KEVBA – Berechnung der Energiebilanz

Annahmen für Strom- und Wärmenutzung

Für die Nutzung von Strom und Wärme werden folgende Annahmen getroffen:

- Strom wird abzüglich des Eigenverbrauchs der Biogasanlage ins Stromnetz eingespeist.⁹
- Für die Wärmeabgabe (Abwärmeproduktion abzüglich Wärmeeigenverbrauch) werden drei Varianten berechnet:
 - 0 % Wärmeabgabe an externe Verbraucher,
 - 50 % Wärmeabgabe an externe Verbraucher,
 - 100 % Wärmeabgabe an externe Verbraucher.

⁹ Die Variante nur Wärme zu erzeugen, wie etwa bei der Biogasanlage Wien, wird nicht betrachtet.

5 THG- UND NH₃-EMISSIONEN

5.1 THG und NH₃-Emissionen bei der Behandlung

5.1.1 Emissionen bei der offenen Kompostierung

Bei der offenen Kompostierung entstehen Emissionen bei der Anlieferung und Aufbereitung der zu kompostierenden Abfälle, durch die bei der Behandlung eingesetzten Energieträger (Treibstoffe, Strom) (siehe Kapitel 4.1) sowie beim Abbau der organischen Substanz (Prozessemissionen).

Angaben zu Emissionsfaktoren für die Anlieferung und Aufbereitung der zu kompostierenden Abfälle finden sich bei CUHLS et al. (2008). Die Autoren beschreiben auch Emissionsfaktoren für Prozessemissionen der offenen Kompostierung für „Bioabfälle und Grünabfälle“ sowie „Grünabfälle“. Zur Berechnung dieser Emissionsfaktoren wurden für alle betrachteten vier biogenen Abfallarten die Faktoren für „Bioabfälle und Grünabfälle“ verwendet, da ansonsten nur für „Grünabfälle“ spezifische Emissionsfaktoren vorliegen. In der folgenden Tabelle 12 sind die Emissionsfaktoren für „Bioabfälle und Grünabfälle“ sowie für Vergleichszwecke die etwas geringeren Faktoren für „Grünabfälle“ angeführt.

Entstehung der Emissionen

Emissionsfaktoren offene Kompostierung

Tabelle 12: Emissionsfaktoren bei offener Kompostierung (in g/t Input) (CUHLS et al. 2008).

	CH ₄ (in g/t)	N ₂ O (in g/t)	NH ₃ (in g/t)
Anlieferung und Aufbereitung	100 (20–230)	12 (1,4–20)	5,6 (4–10)
Prozessemissionen Bioabfälle und Grünabfälle inkl. Anlieferung und Aufbereitung	1.000 (470–2.000)	110 (49–210)	470 (230–920)
Prozessemissionen Grünabfälle inkl. Anlieferung und Aufbereitung	850 (400–2.000)	72 (40–150)	350 (200–800)

5.1.2 Emissionen bei teilgeschlossener Kompostierung

Emissionen entstehen bei der teilgeschlossenen Kompostierung bei der Anlieferung und Aufbereitung der zu kompostierenden Abfälle, durch die bei der Behandlung eingesetzten Energieträger (Treibstoffe, Strom) (siehe Kapitel 4.2) sowie beim Abbau der organischen Substanz (Prozessemissionen).

In (CUHLS et al. 2008) werden Emissionsfaktoren für die Prozessemissionen teilgeschlossener Kompostierungsanlagen nach der Abluftreinigung dargestellt.

Entstehung der Emissionen

Emissionsfaktoren teilgeschlossene Kompostierung

Tabelle 13: Emissionsfaktoren bei der teilgeschlossenen Kompostierung (mit Abluftreinigung) (in g/t Input) (CUHLS et al. 2008).

	CH ₄ (in g/t)	N ₂ O (in g/t)	NH ₃ (in g/t)
Prozessemissionen (nach Abluftreinigung) inkl. Anlieferung und Aufarbeitung	710 (300–1.500)	68 (49–120)	63 (15–110)

Einfluss von Biofiltern

In Österreich wird die Abluft der eingehausten Teile der Kompostierungsanlagen über Biofilter gereinigt. In herkömmlichen Biofiltern mit dem vorrangigen Ziel der Geruchsreduzierung und mit Filtervolumenbelastungen von $> 50 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ wird Methan in der Regel nicht oder nur gering abgebaut (CH₄-Reduktion bis maximal etwa 20 %; CUHLS et al. 2008). In stark vernässten oder ungleichmäßig durchlüfteten Biofiltern kann auch eine geringe Methanneubildung festgestellt werden.

Im Falle der Kompostierung in geschlossenen Hauptrotteverfahren mit Abluftbehandlung empfiehlt es sich, zur Reduktion der N₂O-Bildung im Biofilter eine NH₃-Abscheidung in Form schwefelsaurer Wäscher vorzuschalten. Das entstehende Ammoniumsulfat kann als Dünger verwertet werden. Eine Ausnahme ist die reine Grünabfallkompostierung, bei der nur geringe NH₃-Emissionen zu erwarten sind.

5.1.3 Emissionen bei Vergärungsverfahren**Entstehung der Emissionen**

Emissionen treten bei der Anlieferung und Aufbereitung der Abfälle, bei der Lagerung von Gärresten und durch unvollständige Verbrennung in den Gasmotoren („Methanschlupf“) auf. Hinzu kommen bei den Varianten mit Separation des Gärrestes und anschließender Kompostierung des festen Gärrestes Emissionen beim Abpressen und der Bereitstellung des festen Gärrestes sowie Emissionen aus der Kompostierung des festen Gärrestes. Emissionen aus der Behandlung des flüssigen Gärrestes in Kläranlagen werden bei der Bilanzierung nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 5.1.3.5).

Strombedarf

Die Vergärung von biogenen Abfällen benötigt Energie. Wird das Biogas am Standort direkt genutzt, so kann ein Teil des erzeugten Stroms für die Pumpen, Rührer etc. verwendet werden, ein Teil der Abwärme des Motors für die Erwärmung des Gärsubstrates und die Heizung der Fermenter. Wird Biogas zu Erdgas aufbereitet und z. B. ins Gasnetz eingespeist, so muss Strom für die Vergärung und die Gasaufbereitung mit entsprechendem THG- und Energierucksack zugekauft werden.

5.1.3.1 Anlieferung und Aufbereitung von Abfällen

Es wird angesetzt, dass die Emissionen bei der Anlieferung und Aufbereitung gleich wie bei der Kompostierung sind (siehe Kapitel 5.1.1).

5.1.3.2 Lagerung von Gärresten

Aus dem Gärrestlager können in unterschiedlichem Ausmaß Methan-, Lachgas und Ammoniakemissionen auftreten.

Methangas**hohe CH₄-Emissionen bei der Lagerung möglich**

Der Gärrest einer Biogasanlage enthält methanbildende Mikroorganismen, die auch in unbeheizten Lagerbehältern einen – wenn auch stark verlangsamten – Abbau verbliebener organischer Substanz und damit verbunden eine Freisetzung von Biogas bewirken. Je kürzer die Verweilzeit des Gärsubstrats in den Fermentern ist, desto höher sind das Restgaspotenzial und damit die potenziellen Methanemissionen aus der Gärrestlagerung. Infolge von Kurzschlussströmen kann auch nicht abgebautes Substrat aus dem Fermenter ausgetragen werden.

Bei nicht ausreichendem Ausfaulgrad des Gärrestes kann es bei einem offenen Gärrestlager zu einem relevanten Verlust an nutzbarem Biogas bzw. Methan kommen (LFL 2007).

Biogas- bzw. Methangasverluste

In Ausgasungsversuchen mit Gärresten verschiedener Biogasanlagen konnte in Abhängigkeit vom Anlagentyp (einstufige, zweistufige Anlagen), der Raumbelastung und der hydraulischen Verweilzeit ein Restgaspotenzial des Substratoutputs zwischen 1 und 30 % nachgewiesen werden (OECHSNER 2006).

Nach WEILAND (2006) treten je nach Substratmischung, Verfahrenskonzept und Betriebsweise bei der üblichen Lagertemperatur von ca. 20°C in Bezug auf die Gasproduktion im Fermenter Methanverluste von teilweise mehr als 20 % auf. Bei über der Hälfte der untersuchten Anlagen betrugen die Verluste zwischen 5 und 15 % der Methanproduktion. Bei knapp 20 % der Anlagen lagen die Verluste zwischen 15 und 25 %.

Nach FNR (2005) können Methanemissionen aus dem Endlagerbehälter zwischen 2,5 % und 15 % des produzierten Methans ausmachen.

In einem Rechenbeispiel für ein Gülle-Maissilagegemisch wird ermittelt, dass sich 5–8 % der im Fermenter erzeugten Gasmenge zusätzlich aus dem Gärrest gewinnen lassen müssen, damit sich die Abdeckung des Endlagerbehälters rechnet. *„Allein über den zusätzlichen Gasertrag aus dem Gärrest wird sich die Abdeckung eines Endlagers nicht in allen Fällen finanzieren lassen.“* (LFL 2007).

Es liegen keine Daten vor, inwieweit die Biogasanlagen in Österreich abgedeckt sind. Für die Berechnungen wurden deshalb drei Varianten verwendet:

- 2 % Verlust,
- 5 % Verlust und
- 10 % Verlust,

jeweils bezogen auf den Biogasertrag des jeweiligen biogenen Materials.

Lachgas

Lachgas kann unter anaeroben Bedingungen beim Abbau von Nitrit und Nitrat in Verbindung mit leicht abbaubaren organischen Verbindungen entstehen (Denitrifikation) oder unter aeroben Bedingungen durch die Nitrifizierung des Ammoniums.

Nach VOGT et al. (2008) und CUHLS et al. (2008) sind Lachgasemissionen bei der Lagerung vernachlässigbar bzw. nicht relevant.

Lachgasemissionen aus Gärrestlagern werden in dieser Studie deshalb nicht berücksichtigt.

Ammoniak

Aus nicht abgedeckten Gärrestlagern kommt es zu größeren Ammoniakverlusten. Daten liegen jedoch keine vor. In VOGT et al. (2008) wird angenommen, dass die auf den Ammoniumgehalt bezogenen NH₃-Verluste gleich hoch sind wie bei Rinder- (13,5 % des NH₄-N) und Schweinegülle (18 % des NH₄-N).

Unter dem Ansatz, dass 15 % des NH₄-N als Ammoniak entweichen und der N-Gehalt im Gärrest 6 kg N/t Ausgangssubstanz beträgt, wovon 75 % als Ammonium vorliegen, ergibt sich eine Ammoniakemission von rund 0,7 kg NH₃/t Ausgangsmaterial.

5.1.3.3 Methanschlupf bei Gasmotoren

Ursachen für den Methanschlupf

Kohlenwasserstoffemissionen aus dem Gasmotor (Methanschlupf) entstehen durch unvollständige Verbrennung im Motor und durch Ventilüberschneidungen bei Viertakt-Motoren, wodurch das Einlass- und das Auslassventil kurz gleichzeitig geöffnet sind. Bei alten verschlissenen Motoren bzw. bei größerer Ventilüberschneidung durch z. B. ungeeignete Nockenwelle bei umgebauten Dieselmotoren oder falschen Steuerzeiten können deutlich höhere Emissionen auftreten. Schlechtere Biogasqualität mit geringeren Methangehalten führt zu kälterer unvollständiger Verbrennung. Daher können bei sinkenden Methangehalten im Biogas sowie im Teil- bzw. Schwachlastbetrieb von Gasmotoren erhöhte Gesamt-C-, Methan- sowie Formaldehydemissionen auftreten (LFL 2007).

In Biogas-Blockheizkraftwerken werden sowohl fremdgezündete Gas-Ottomotoren als auch Zündstrahlmotoren eingesetzt. Bei letzteren erfolgt die Selbstzündung des angesaugten und verdichteten Biogas-Luft-Gemisches durch Einspritzen einer bestimmten Menge Zündöl (Dieselkraftstoff, Biodiesel oder Pflanzenöl). Der energetische Anteil des Zündöls, bezogen auf die Brennstoffwärmeleistung, beträgt dabei bis zu 10 %. Auf diese Weise ist es möglich, auch Biogas mit einem relativ geringen Methangehalt motorisch zu nutzen. Der Nachteil des Zündstrahlmotors liegt in dessen höheren Emissionen (BMW 2007).

Zündgasmotoren weisen im Mittel etwa doppelt so hohe Methanemissionen auf als Gas-Ottomotoren (LFU BAYERN 2006).

Der Methanschlupf eines 500 kW_{el}-BHKW liegt, bei einem durchschnittlichen CH₄-Gehalt von rund 55 % im Reinbiogas, bei 1,79 % der Gesamtjahresmenge Methan (LAABER 2006, zitiert in BRAUN et al. 2007).

Eine Aufstellung diverser Literatur über das Ausmaß des Methanschlupfs findet sich in VOGT et al (2008).

Für die Berechnungen wird ein Methanschlupf von 1 % der erzeugten Biogasmenge angesetzt.

5.1.3.4 Emissionen aus der Gärresteseparierung und -kompostierung

Bei den Vergärungsverfahren mit Separierung des Gärrestes wird eine Kompostierung des festen Gärrestes in teilgeschlossenen Anlagen sowie die Behandlung der flüssigen Gärreste in einer kommunalen Kläranlage betrachtet.

erhöhte Methanemissionen bei Kompostierung

Da Gärreste aus einem anaeroben Milieu stammen, sind die Methanemissionen in der Zeit, bis das Material aerobisiert ist, höher als bei der Kompostierung eines nicht vergorenen Ausgangsmaterials.

In CUHLS et al. (2008) finden sich für die Trockenvergärung Emissionsfaktoren für das Abpressen des Gärrestes und die Bereitstellung des festen Gärrestes für die Kompostierung sowie für die Haupt- und Nachrotte (siehe Tabelle 14).

Für die Separierung bei der Nassvergärung werden keine Angaben gemacht. Es wird die Annahme getroffen, dass die Emissionsfaktoren beim Abpressen bei der Nassvergärung jenen der Trockenvergärung entsprechen.

Tabelle 14: Emissionsfaktoren bei der Kompostierung fester Gärreste (in g/t biogener Abfall) (CUHLS et al. 2008).

	CH ₄	N ₂ O	NH ₃
Abpressung, Bereitstellung Gärprodukt	460	17	8
Hauptrotte und Nachrotte inklusive Anlieferung und Aufarbeitung	1.100	98	104,4

5.1.3.5 Emissionen bei der Behandlung des flüssigen Gärrestes in Kläranlagen

Bei den betrachteten Vergärungsvarianten mit Separierung des Gärrestes wurde angenommen, dass die Behandlung der flüssigen Gärreste in kommunalen Kläranlagen erfolgt. Bei der Behandlung dieser Gärreste wird Energie (Strom) benötigt, zusätzlich entstehen Lachgasemissionen bei der Stickstoffentfernung. Die Relevanz der durch die Behandlung resultierenden Treibhausgasemissionen wird im Folgenden dargestellt.

Eine (angenommene) Presswassermenge von 400 l je Tonne in einer Vergärungsanlage behandelter biogener Abfälle entspricht bei einer Presswasserkonzentration von 13.000 mg CSB/l der Jahres-CSB Fracht von rund 0,12 Einwohnerwerten (EW). Ebenso entspricht eine NH₄-Konzentration von 1.500 mg/l im Presswasser etwa der Jahres-N-Fracht von 0,12 EW.

Presswasser aus 1 t biogenem Abfall entspricht 0,12 EW

In ÖWAV (2008) beträgt der 75 %-Perzentil-Wert des Stromverbrauchs je Einwohnerwert (CSB 110) für Anlagen ab 10.000 EW¹⁰ 36,23 kWh (10.000–50.000 EW: 37,21 kWh/EW (CSB 110); 50.000–100.000 EW: 33,67 kWh/EW (CSB 110); > 100.000 EW: 24,75 kWh/EW (CSB 110)).

Energieverbrauch je EW

Dementsprechend sind für die Behandlung der angenommenen Presswassermenge knapp 4,5 kWh elektrischer Energie notwendig.

Kläranlagen > 50.000 EW verfügen meist über eine anaerobe Schlammstabilisierung, bei der das erzeugte Faulgas energetisch in BHKW genutzt wird. Bei energieoptimierten Kläranlagen mit Faulung ist ein energieautarker Betrieb möglich (LINDTNER 2010, KOHLISCH et al. 2010). KOHLISCH et al. (2010) geben für 25 Kläranlagen, die nicht energieoptimiert sind, einen Eigendeckungsgrad für Elektrizität von 40 % an.

Bei einer Faulgasmenge von 20 l/EW (CSB 110) je Tag und einem Methangehalt im Faulgas von 60 % errechnet sich eine Methangasmenge von 4,38 m³/EW und Jahr mit einem Energieinhalt von 43,8 kWh. Damit lassen sich in einem BHKW mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 30 % 13 kWh erzeugen.

¹⁰ Anlagen dieser Größenordnung verfügen über Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorentfernung

Bezogen auf den 75 %-Perzentilwert des Stromverbrauchs ergibt dies eine Eigendeckung von 36 %.

Bei dem berechneten Energiebedarf für die Presswasserbehandlung von knapp 4,5 kWh und der Eigendeckung an Energie von 36 % ergibt sich ein Strombedarf von weniger als 3 kWh Strom pro Tonne biogenes Ausgangsmaterial. Bei einer Emission von 0,253 CO_{2-eq} je kWh Strom (GEMIS Österreich 4.5) ergibt dies für die Behandlung von Presswasser in einer Kläranlage mit Faulung rund 0,7 kg CO_{2-eq} je Tonne biogenes Ausgangsmaterial.

N₂O-Emissionen

Bei Kläranlagen treten bei der Stickstoffentfernung auch N₂O-Emissionen auf. Nach IPCC (1997) können diese Verluste mit 0,01 kg N₂O-N/kg N im Abwasser abgeschätzt werden. Bei einer N-Fracht von 600 g¹¹ im Presswasser aus 1 Tonne Ausgangsmaterial ergibt sich eine N₂O-N-Fracht von 6 g/t Ausgangsmaterial bzw. 2,8 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial.

Bei den weiteren Berechnungen werden die Emissionen bei der Behandlung des Presswassers in Kläranlagen aufgrund der geringen Größe nicht berücksichtigt.

5.1.4 Emissionen bei der Biogasaufbereitung zu Biomethan

Bei der Aufbereitung des Rohbiogases zu Biomethan entstehen Emissionen durch den Strombedarf¹² bei der Aufbereitung (siehe Kapitel 4.3.3) sowie durch verfahrensbedingte Methanverluste, z. B. durch die Regeneration des Adsorbers bzw. Waschmittels.

Methanverluste

PEHNT & VOGT (2007) setzen die Methanverluste bei der Druckwechseladsorption (PSA) und der Druckwasserwäsche, bezogen auf die eingesetzte Methanmenge, mit 2 % an, beim Aminverfahren mit 0,1 %. Eine Aufstellung der Bandbreiten der Methanverluste bei einzelnen Verfahren findet sich in VOGT et al. (2008).

BAIER et al. (2008) bilanzierten die Methanverluste der Druckwechseladsorptionsanlage der ARA Region Luzern (GALU), bei der Biogas aus der anaeroben Faulung kommunaler Schlämme für die Einspeisung in das Erdgasnetz aufbereitet wird: Von der im Jahr 2007 insgesamt aufbereiteten Methanfracht von 260.000 m³N fallen 2,6 % (6.740 m³N) als Methanverlust an. Von dieser Menge entstehen 88 % während der normalen Produktionsphase der PSA-Anlage. 2 % bzw. 10 % des Methanverlustes sind auf Anfahr- bzw. Ausfahrprozesse zurückzuführen.

Bei Membranverfahren (Gaspermeation) mit zweistufiger Anordnung der Membrane liegen die Verluste bei 1,5–3 % (BIOGAS NETZEINSPEISUNG 2010).

Für die Berechnungen wird ein Methanverlust bei der Biogas-Aufbereitung von 2 % angesetzt.

¹¹ 400 l Presswasser je Tonne * 1.500 mg NH₄/l

¹² Der Wärmebedarf z. B. beim Aminverfahren wurde nicht berücksichtigt

5.2 THG- und NH₃-Emissionen bei Transport und Aufbringung

5.2.1 Emissionen beim Transport

Eine Abschätzung der durchschnittlichen Transportdistanzen zu den Behandlungsanlagen (offene Kompostierung, teilgeschlossene Kompostierung, Nass- und Trockenvergärung mit und ohne Separierung des Gärrestes, mit und ohne Nutzung der Wärme, mit Aufbereitung des Biogases zu Biomethan etc.) ist nicht möglich.

Die folgenden Berechnungen zeigen jedoch den Einfluss des Transportes auf die THG-Bilanzen.

Die Emissionen beim Transport der biogenen Abfälle zu den Behandlungsanlagen und der erzeugten Produkte zu den Aufbringungsflächen können anhand folgender Annahmen bzw. Werte berechnet werden:

- Verbrauch Transportfahrzeug 35 l Diesel/100 km
- Ladegewicht: 10 t
- Energieinhalt Diesel: 42 MJ/kg
- Dichte Diesel: 0,835 kg/l
- Emission: 3,568 kg CO_{2-eq}/kg Diesel (GEMIS Österreich 4.5)

Unter diesen Annahmen betragen die Transportemissionen rund 0,1 kg CO_{2-eq} je Tonnenkilometer (ohne Rückfahrt).

**0,1 kg CO_{2-eq} je
Tonnenkilometer**

Bei einem Vergleich der THG-Emissionen der betrachteten Verfahren (Kompostierung, Vergärung mit unterschiedlichen Nutzungen des Biogases und unterschiedlicher Behandlung des Gärrestes) sind nur jene Transportstrecken von Interesse, die zusätzlich zurückgelegt werden müssen. Ein Unterschied zwischen zwei Verfahrensvarianten von 10 kg CO_{2-eq} wird dann durch die Transportemissionen ausgeglichen, wenn die Transportdistanz zur Anlage mit dem negativeren Saldo um 50 km länger ist (in Summe 100 km, da Rückfahrt als Leerfahrt erfolgt).

Die berechneten Salden aus Gutschriften minus Emissionen unterscheiden sich bei den einzelnen Verfahren und Abfallströmen enorm (zwischen –140 kg CO_{2-eq} und +190 kg CO_{2-eq} je Tonne Ausgangsmaterial; siehe Kapitel 8.3)). Nur große Unterschiede in den Transportdistanzen zu den Behandlungsanlagen führen deshalb zu stärkeren Änderungen der Gesamtbilanz eines Verfahrens und damit zu einer allfälligen Veränderung der Reihung.

**nur große
Distanzunterschiede
sind relevant**

Ob Transporte aus Sicht der THG-Emissionen zu berücksichtigen sind, kann nur regional beurteilt werden (Distanz zur Behandlungsanlage, Distanz zu verfügbaren Aufbringungsflächen etc.).

In der Praxis ist davon auszugehen, dass die Transportdistanzen zu den Behandlungsanlagen aufgrund der Transportkosten möglichst gering gehalten werden.

In diesem Projekt werden die Transportemissionen bei den Bilanzen nicht mit berechnet.

5.2.2 Emissionen bei der Ausbringung von Komposten und Gärresten

5.2.2.1 Emissionen bei der Ausbringung von Komposten

Nach CUHLS et al. (2008) liegen bislang keine Treibhausgasemissionsmessungen für die Applikation von Komposten auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und in häuslichen Gartenflächen vor. Sie schlagen die im Folgenden dargestellte Abschätzung der Emissionsfaktoren für die Ausbringung von Kompost aus Bioabfall vor.

N₂O-Emissionen

Für die Abschätzung von N₂O-Emissionen durch die aufgebrauchten Mineraldünger werden 1,25 % von deren Stickstoffgehalt angenommen (IPCC 2007). In Komposten erfolgt die N-Freisetzung über längere Zeiträume, da nur ein Teil des Stickstoffs in mineralischer/löslicher Form vorliegt und der Rest organisch gebunden ist. Ein Teil des Stickstoffs verbleibt darüber hinaus langfristig in der Humusmatrix des Bodens. Der freisetzbare Stickstoff (= Mineraldüngeräquivalent) wird mit dem Gehalt an löslichem Stickstoff und 30 % des organisch gebundenen Stickstoffs angenommen (jeweils 5 % Freisetzung über 6 Jahre; CUHLS et al. 2008).

Die N₂O-Emissionen werden mit 1,25 % des freigesetzten Stickstoffs angesetzt.

NH₃-Emissionen

Die NH₃-Emissionen durch die Aufbringung von Komposten sind gering, da im Kompost nur geringe Ammoniummengen enthalten sind. Ammonium, das in geringen Mengen aus organischem Material freigesetzt wird, wird zeitnah von Mikroorganismen oder Pflanzen aufgenommen oder oxidiert (CUHLS et al. 2008).

Die NH₃-Emissionen werden mit 20 % des enthaltenen Ammonium-Stickstoffs angesetzt.

CH₄-Emissionen

Emissionen an CH₄ durch die Applikation von Kompost sind sehr gering und werden mit < 1 g/t Kompost (FS) angesetzt (CUHLS et al. 2008).

Unter Zugrundelegung von typischen Werten für die emissionsrelevanten Parameter von Komposten (vergleiche BGK 2008) und einer durchschnittlichen Kompostmenge von 350 kg FS pro Tonne biogener Abfall ergeben sich die folgenden Emissionsfaktoren für Komposte aus Bioabfall und Grüngut:

- CH₄ < 0,35 g/t,
- N₂O 10–14 g/t und
- NH₃ 10–27 g/t biogener Abfall.

Es wird angenommen, dass bei reifem Kompost die Emissionsfaktoren unabhängig vom Inputmaterial (Biotonne, Grünschnitt, Küchen- und Kantinenabfälle, Marktabfälle) und unabhängig von der angewendeten Technologie (offene oder teilgeschlossene Kompostierung) sind. Für das gegenständliche Projekt wurden die folgenden Emissionsfaktoren herangezogen.

Tabelle 15: Emissionsfaktoren für die Aufbringung von Kompost (in g je Tonne biogener Abfall); (Quelle: Umweltbundesamt).

	CH ₄	N ₂ O	NH ₃
Kompost	< 0,35	12	18,5

**berechnete
Emissionsfaktoren**

5.2.2.2 Emissionen bei der Ausbringung von kompostiertem Gärrest

Für die Abschätzung der Emissionsfaktoren für die Ausbringung von Kompost aus Gärrest (aus der Trocken- oder Nassvergärung) wurden ebenfalls die oben beschriebenen Ansätze nach CUHLS et al. (2008) verwendet.

Unter Zugrundelegung von typischen Werten für die emissionsrelevanten Parameter von Komposten (vergleiche BGK 2008) und einer durchschnittlichen Kompostmenge von 240 kg FS/t biogener Abfall ergeben sich die in Tabelle 16 dargestellten Emissionsfaktoren für kompostierten Gärrest. Die Faktoren wurden unabhängig von der Art des biogenen Abfalls für die Berechnungen verwendet.

**berechnete
Emissionsfaktoren**

Tabelle 16: Emissionsfaktoren für die Aufbringung von kompostiertem Gärrest (in g je Tonne biogener Abfall); (Quelle: Umweltbundesamt).

	CH ₄	N ₂ O	NH ₃
kompostierter Gärrest	0,3	10	27

5.2.2.3 Emissionen bei der Ausbringung von Gärrest

Ammoniakemissionen treten nach Applikation von flüssigen Gärprodukten gemäß CUHLS et al. (2008) während etwa einer Woche auf und sind abhängig vom Ammonium-Gehalt, pH-Wert und der Applikationstechnik. Je bodennaher die Applikation erfolgt, umso weniger Ammoniak wird emittiert.

Gemäß CUHLS et al. (2008) betragen die NH₃-Emissionen bei bodennaher Aufbringung etwa 30–50 % des Ammonium-Gehaltes. Nach PFUNDTNER (2007) können im ungünstigsten Fall bis zu 70 % des enthaltenen NH₃-Stickstoffs aus Fermentationsrückständen entweichen.

NH₃-Emissionen

Die Emissionen an N₂O werden mit 1,25 % des Mineraldüngeräquivalents (aufgebrachter NH₄-N + 30 % des organisch gebundenen N) angenommen (CUHLS et al. 2008).

N₂O-Emissionen

Gärreste sollten möglichst auf unbewachsene Böden ausgebracht und rasch (innerhalb einer Stunde) eingearbeitet werden; lässt sich eine Ausbringung auf bewachsene Böden nicht vermeiden, sollten Gärreste mit Schleppschlauch ausgebracht werden (VOGT et al. 2008). Die Injektion von Gärresten führt auf Acker zu doppelt, auf Grünland zu dreifach höheren N₂O-Emissionen im Vergleich zu oberflächlicher Ausbringung (WULF 2003).

**Gärreste rasch
einarbeiten aber
nicht injizieren**

Methanemissionen werden entsprechend den Emissionen bei der Applikation von Rindergülle mit 8 g/t Feuchtschubstanz (FS) Gärrest angenommen (CLEMENS et al. 2006, zitiert in CUHLS et al. 2008).

CH₄-Emissionen

Für die Berechnungen der Emissionsfaktoren wurden folgende Annahmen getroffen

- N-Gehalte für die eingesetzten Abfallarten: Biotonne: 9 kg/t FS, Küchen- und Kantinenabfälle: 6,5 kg/t FS, Marktabfälle: 7 kg/t FS, Grünschnitt: 3 kg/t FS (FNR 2004).
- Sämtlicher mit dem Gärsubstrat eingetragener Stickstoff verbleibt im Gärrest
- 60 % des Stickstoffs im Gärrest liegen als NH₄-N vor (40 % organisch gebunden) (FNR 2004)
- 50 % des NH₄-N im Gärrest emittieren

Für die betrachteten biogenen Abfallarten ergeben sich die folgenden Emissionsfaktoren für die Aufbringung der Gärreste:

- CH₄ 7 g/t,
- N₂O 38–92 g/t und
- NH₃ 910–3.280 g/t biogener Abfall.

**berechnete
Emissionsfaktoren**

Für die Berechnungen im gegenständlichen Projekt werden unabhängig von der Art des biogenen Abfalls die in der folgenden Tabelle angegebenen Emissionsfaktoren für die Ausbringung von unsepariertem Gärrest verwendet.

Tabelle 17: Emissionsfaktoren für die Aufbringung von unsepariertem Gärrest (in g je Tonne biogener Abfall); (Quelle: Umweltbundesamt).

	CH ₄	N ₂ O	NH ₃
Unseparierter Gärrest	7	85	2.100

6 EMISSIONSGUTSCHRIFTEN

Durch die Einspeisung von Strom, Wärme oder zu Methan aufbereitetem Biogas können andere Energieträger entsprechend eingespart werden und die verringerten THG-Emissionen den jeweiligen Verfahren zur Behandlung biogener Abfälle gutgeschrieben werden. Des Weiteren werden durch die Aufbringung von Komposten und Gärrückständen den Böden Nährstoffe zugeführt, wodurch unter Berücksichtigung der Nährstoffverfügbarkeit entsprechende Mengen an mineralischen Handelsdüngern eingespart werden können. Somit entfallen Produktionsemissionen bei der Erzeugung dieser Handelsdünger. Gleichzeitig werden Lachgasemissionen, die bei der Aufbringung N-haltiger Handelsdünger entstehen, vermieden. Eine weitere Gutschrift erfolgt auch durch die Fixierung von Kohlenstoff in langfristig stabilen Humusverbindungen in Komposten.

**Einsparung von
Dünger und
Energieträgern**

Der Ersatz von Torf wurde nicht als Gutschrift mit einbezogen.¹³

6.1 Gutschriften für Strom-, Wärme und Biomethaneinspeisung

Für die Berechnung der Gutschrift bei der Energiegewinnung aus Biogas wurde wie folgt vorgegangen:

Strom: Jede kWh Strom, die eingespeist wird (erzeugte Strommenge minus Stromeigenverbrauch) substituiert 1 kWh Strom mit dem österreichischen Strommix 2008: 0,253 kg CO_{2-eq}/kWh (GEMIS Österreich 4.5).

Wärme: Bei den Berechnungen wurden drei Varianten bezüglich Wärmeabgabe betrachtet: 0 % Wärmeabgabe, 50 % Wärmeabgabe und 100 % Wärmeabgabe.

**Varianten für
Wärmeabgabe**

Für die 50%ige und die 100%ige Wärmeabgabe wurden unterschiedliche Annahmen getroffen, da eine ganzjährige vollständige Abgabe der Abwärme nur in sehr seltenen Fällen gegeben ist, z. B. wenn industrielle/gewerbliche Abnehmer mit ganzjährigem Wärmebedarf versorgt werden.

Für die Abgabe von 50 % der Wärme wurde in Anlehnung an die Nutzenergieanalyse für die Nutzenergiekategorie Raumheizung und Klimaanlage (STATISTIK AUSTRIA 2010) eine Substitution von jeweils einem Drittel Heizöl extraleicht, Erdgas und Biogene (Holz, Pellets) angesetzt.¹⁴

**50%ige
Wärmeabgabe**

¹³ Nur wenige biogene Abfall- bzw. Reststoffe können mit entsprechender Aufbereitung als Torfersatzprodukte eingesetzt werden. Dies sind vor allem Holzabfälle. Abfallstoffe aus der Fraktion der Grünabfälle, der Garten- und Parkabfälle sowie der Friedhofsabfälle wären nur durch eine Änderung der Sammellogistik – beispielsweise der getrennten Sammlung und Aufbereitung von holzigem Material – als Torfersatz verwertbar. Die am erfolgreichsten eingesetzten Rohstoffe zur Erzeugung von Torfersatzstoffen sind Reststoffe aus der Holzverarbeitung und zellulosefaserhaltige Reststoffe aus der Landwirtschaft (REINHOFER et al. 2005).

¹⁴ Fernwärme wurde nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass diese nicht substituiert wird, Strom wurde nicht berücksichtigt, da der Stromanteil deutlich geringer ist und zusätzlich Klimaanlagen in der betrachteten Kategorie enthalten sind. Weitere Energieträger sind vernachlässigbar.

*Tabelle 18: Annahmen für Wärmegutschriften (50 % Wärmeabgabe);
(Quelle: Umweltbundesamt).*

Energieträger	Anteil	Energieinhalt (in MJ/kg)	kg CO _{2-eq} /MJ*	Wirkungsgrad
Heizöl extraleicht	33,33 %	42,8	0,086	90 %
Erdgas	33,33 %	50	0,071	90 %
Biogene (Holz, Pellets)	33,33 %	14,5	0	80 %

* GEMIS Österreich 4.5

**Gutschrift: 0,21 kg
CO_{2-eq} je kWh**

Unter diesen Annahmen ergibt sich ein gewichtetes Mittel für die Gutschrift bei 50 % Wärmeabgabe von 0,21 kg CO_{2-eq} je kWh Wärmeabgabe.

**100%ige
Wärmeabgabe**

Für die Gutschrift bei einer 100%igen Wärmeabgabe wurden die Anteile der Energieträger wie folgt modifiziert:

Heizöl extraleicht 45 %, Erdgas 45 %, Biogene (Holz, Pellets) 10 %.

**Gutschrift: 0,28 kg
CO_{2-eq} je kWh**

Unter diesen Annahmen ergibt sich ein gewichtetes Mittel für die Gutschrift bei 100 % Wärmeabgabe von 0,28 kg CO_{2-eq} je kWh Wärmeabgabe.

**Gutschrift Bio-
methan: 0,257 kg
CO_{2-eq} je kWh**

Für die Einspeisung von Biomethan wurde angenommen, dass 1 m³ Biomethan 1 m³ Erdgas ersetzt und dadurch CO_{2-eq} in Höhe von 0,257 kg/kWh (GEMIS Österreich 4.5) gutgeschrieben werden.

*Tabelle 19 Ermittelte Gutschriften für Energieeinspeisung (in kg CO_{2-eq}/kWh);
(Quelle: Umweltbundesamt).*

Strom	Wärme (50 % Wärmeabgabe)	Wärme (100 % Wärmeabgabe)	Biomethan
0,253	0,21	0,28	0,257

6.2 Substitution von Mineraldüngern

Die Erzeugung mineralischer Handelsdünger ist energieintensiv, insbesondere die Erzeugung von Stickstoffdüngern. Werden Kompost und Gärrest landwirtschaftlich verwertet, so kann dadurch mineralischer Handelsdünger eingespart werden und die vermiedenen Produktionsemissionen als Emissionsgutschrift verbucht werden.

**erreichbare
Gutschriften**

Die erzielbare Gutschrift für die Substitution von 1 kg Stickstoff in Handelsdüngern beträgt 7,56 kg CO_{2-eq}, die Gutschrift für 1 kg Phosphor beträgt 1,15 kg CO_{2-eq} (GEMIS Österreich 4.5).

6.2.1 Nährstoffgehalte und Nährstoffverfügbarkeit

Im Gegensatz zu Mineraldüngern liegen Stickstoff und Phosphor in Kompost und Gärrest nur teilweise in mineralischer, rasch verfügbarer Form vor. Die Nährstoffverfügbarkeit wird über die Mineraldüngeräquivalenz (MDÄ) ausgedrückt.

6.2.1.1 Nährstoffgehalt und Nährstoffverfügbarkeit in Kompost

Der düngewirksame Stickstoff aus Fertigkompost wird von CUHLS et al. (2008) auf Basis von Ansätzen nach KLUGE (2008) und REINHOLD (2008) mit dem Gehalt an löslichem Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$) und 30 % des organisch gebundenen Stickstoffs (jeweils 5 % Freisetzung über 6 Jahre) angegeben.

Verfügbarkeit von Stickstoff

Die Gesamtgehalte an Phosphor sind im Kompost zu 100 % düngewirksam (LANDWIRTSCHAFTLICHES TECHNOLOGIEZENTRUM AUGUSTENBERG 2008, EPEA 2004).

Verfügbarkeit von Phosphor

Unter Zugrundelegung von typischen Werten für N- und P-Gehalte von Komposten aus Bioabfall und Grüngut (BgK 2008) und einer durchschnittlichen Kompostmenge von 350 kg FS/t biogener Abfall ergeben sich Mineraldüngeräquivalente von 0,76–1,1 kg N/t biogener Abfall und von 1–1,7 kg P_2O_5 /t biogener Abfall (0,44–0,74 kg P/t). Im gegenständlichen Projekt wird angenommen, dass sich die Nährstoffgehalte in Komposten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien nicht unterscheiden. Geringfügige NH_3 -Verluste bei der Aufbringung (siehe Emissionen Kapitel 5.2.2.1) wurden nicht berücksichtigt.

berechnete Mineraldüngeräquivalente

Für die Berechnungen werden folgende Werte für die Mineraldüngeräquivalenz verwendet: Kompost aus einer Tonne biogener Abfall substituiert 0,93 kg N und 1,3 kg P_2O_5 (0,57 kg P).

6.2.1.2 Nährstoffgehalt und Nährstoffverfügbarkeit in Gärresten

Nährstoffgehalt und Nährstoffverfügbarkeit in kompostiertem Gärrest

Für die Abschätzung der Nährstoffverfügbarkeit für Kompost aus Gärrest wurden ebenfalls die in Kapitel 6.2.1.1 beschriebenen Ansätze nach CUHLS et al. (2008) verwendet.

Unter Zugrundelegung von Angaben zu N- und P-Gehalten von Komposten aus Gärrest aus der Trockenvergärung von Bio- und Grünabfall (BgK 2008) und einer durchschnittlichen Kompostmenge von 240 kg FS/t biogener Abfall ergeben sich Mineraldüngeräquivalente von 0,67 kg N/t biogener Abfall und von 1,2 kg P_2O_5 /t biogener Abfall (0,52 kg P/t). Im gegenständlichen Projekt wird angenommen, dass sich die Nährstoffgehalte in Komposten aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien und unterschiedlichen Vergärungsverfahren (Trocken- oder Nassvergärung) nicht unterscheiden. Geringfügige NH_3 -Verluste bei der Aufbringung (siehe Emissionen Kapitel 5.2.2.2) wurden nicht berücksichtigt.

berechnete Mineraldüngeräquivalente

Für die Berechnungen werden folgende Werte für die Mineraldüngeräquivalenz verwendet: Kompost aus festen Gärückständen aus einer Tonne biogener Abfall substituiert 0,67 kg N und 1,2 kg P_2O_5 (0,52 kg P).

Nährstoffgehalt und Nährstoffverfügbarkeit in nicht separierten Gärresten

Für Gärrückstände wird die Mineraldüngeräquivalenz für Stickstoff nach CUHLS et al. (2008) mit der Menge an eingebrachtem¹⁵ $\text{NH}_4\text{-N}$ plus 5 % des organisch gebundenen Stickstoff im ersten Jahr der Applikation und jeweils weiteren 5 % des organisch gebundenen Stickstoffs vom 2. bis zum 6. Jahr abgeschätzt.

Berechnung Mineraldünger- äquivalente

Für die Berechnungen der Mineraldüngeräquivalenz für Stickstoff wurde folgende Annahme getroffen: 60 % des Stickstoffs in den Gärresten liegen als $\text{NH}_4\text{-N}$, 40 % organisch gebunden vor (FNR 2004).

Für die betrachteten biogenen Abfallarten ergeben sich die folgende Werte für die Mineraldüngeräquivalenz der Gärreste: 2,2–6,5 kg N/t FS biogener Abfall.

Die Gesamtgehalte an Phosphor sind zu 100 % düngewirksam (LANDWIRTSCHAFTLICHE TECHNOLOGIEZENTRUM AUGUSTENBERG 2008, EPEA 2004).

Da Phosphor während der Vergärung nicht verloren geht, wird im Endprodukt die gleiche Menge an Phosphor je Tonne Ausgangsmaterial wie bei der Kompostierung angesetzt.

Für die Berechnungen werden folgende Werte für die Mineraldüngeräquivalenz verwendet: Nicht separierter Gärrest aus einer Tonne biogener Abfall substituiert 2,7 kg N und 1,3 kg P_2O_5 (0,57 kg P).

6.3 Vermeidung von Lachgasemissionen bei Aufbringung von Handelsdüngern

Die N_2O -Emissionen bei der Aufbringung von N-Handelsdünger bzw. der Vermeidung durch deren Substitution wurden mit 1,25 % des eingebrachten verfügbaren Stickstoffs angenommen (IPCC 2007).

6.4 Kohlenstoffspeicherung durch Aufbringung von Komposten und Gärresten

Es wird angenommen (SMITH et al. 2001), dass 92 % des in Kompost aufgebrauchten Kohlenstoffs innerhalb eines Zeithorizonts von 100 Jahren mineralisiert (zu CO_2 abgebaut) werden und etwa 8 % gespeichert werden.

Dieser Ansatz wird auch in (IFEU, ÖI 2010) verwendet. Darin heißt es: „Für die Anwendung von Komposten in der Landwirtschaft wird als Sensitivität auch die Möglichkeit einer Kohlenstoffspeicherung (C-Senke) berücksichtigt. Angerech-

¹⁵ „Eingebracht“: Gehalt an $\text{NH}_4\text{-N}$ im unseparierten Gärrest abzüglich der gasförmigen Verluste bei der Aufbringung.

net werden hierfür nach (AEA 2001) 8 % des im Kompost gebundenen Kohlenstoffs für den angenommen wird, dass er über einen 100 Jahreshorizont im Boden gespeichert bleibt. Bisher gibt es noch keine ausreichend langfristigen Untersuchungen, die belegen könnten, dass es durch die Kompostanwendung in der Landwirtschaft tatsächlich zu einer Langzeitspeicherung von Kohlenstoff und damit zu einem Beitrag zum Klimaschutz kommt. Dies wird auch in der jüngsten Veröffentlichung zu diesem Thema bestätigt (EdDE 2009). Allerdings leistet die Anwendung in der Landwirtschaft einen wichtigen Beitrag zur Humus-C-Reproduktion auch wenn sich dies nicht als Beitrag zum Klimaschutz niederschlagen sollte. Insbesondere auf verarmten Standorten kann durch Kompostanwendung mit einer erheblichen, für die landwirtschaftliche Produktion wichtigen, Humusanreicherung gerechnet werden.“

Für die Abschätzung der Kohlenstoffspeicherung durch das Aufbringen von Kompost und Gärrückständen werden folgende Annahmen getroffen:

Aus 1 Tonne (FS) biogener Abfälle entstehen bei der Kompostierung 350 kg FS Kompost. Der durchschnittliche Kohlenstoffgehalt wird mit 130 kg/t FS (BGK 2008a) angesetzt.

Aus 1 Tonne (FS) biogener Abfälle entstehen bei der Vergärung mit anschließender Separation und Kompostierung der Feststoffe 264 kg FS Kompost. Der durchschnittliche Kohlenstoffgehalt wird mit 140 kg/t FS (BGK 2008a) angesetzt.

Für die Ausbringung von flüssigem Gärrest wird angenommen, dass durch die Aufbringung der enthaltenen organischen Substanz gleich viel Kohlenstoff langfristig fixiert wird wie bei der Aufbringung von Kompost.

Für die Berechnungen wurde angesetzt, dass durch die Aufbringung von Kompost aus der Kompostierung 1 Tonne biogener Abfälle 13,3 kg CO₂ gespeichert werden, durch die Vergärung mit anschließender Kompostierung des Gärrestes 10,8 kg CO₂ je Tonne biogener Abfall und durch die Ausbringung von flüssigem Gärrest 13,3 kg CO₂ je Tonne biogener Abfall.

7 ENERGIEBILANZ UND ENERGIEEFFIZIENZ DER BEHANDLUNG BIOGENER ABFÄLLE

In der Energiebilanz wird im Folgenden der Nettoenergiegewinn der Vergärungsverfahren (= extern abgegebene Energie) dargestellt.

Die Energieeffizienz wurde als Netto-Primärwirkungsgrad (erzielter Nettoenergiegewinn aus dem Energiegehalt des behandelten Abfalls) definiert. Diese wurde für die beiden betrachteten Vergärungsverfahren (Nass- und Trockenvergärung, jeweils mit und ohne Separierung des Gärrestes) und den entsprechenden Produkten (Strom, Strom + Wärme, Einspeisung ins Erdgasnetz) berechnet.

Als Energieinhalt in den Ausgangsmaterialien wurden die Werte in Tabelle 20 verwendet.

Tabelle 20: Energiegehalt biogener Abfälle (in MJ/t FS); (Quelle: Umweltbundesamt).

Biotonne	Speisereste	Marktabfälle	Grünschnitt
3.500	5.000	3.500	6.000

Unter Zugrundelegung der in den Kapiteln 4.3.1 bis 4.3.4 beschriebenen Annahmen ergeben sich die im Folgenden dargestellten Energieeffizienzen für die Vergärung von biogenen Abfällen.

7.1 Energiebilanz und Energieeffizienz der Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes

7.1.1 Energiebilanz

höchster Nettoenergiegewinn bei Biomethan

Der Nettoenergiegewinn je Tonne an behandeltem biogenem Abfall ist bei der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan am höchsten und beträgt im Mittel 599 kWh/t biogener Abfall. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Ausgangssubstraten sind jedoch beachtlich und schwanken zwischen 425 kWh/t (Biotonne) und 856 kWh/t (Küchen- und Kantinenabfälle).

Der Nettoenergiegewinn ist bei der Nutzung von Biogas zur Strom- und Wärmeerzeugung bei vollständiger Abgabe der Wärme an externe NutzerInnen um rund 15 % geringer: der Nettoenergiegewinn beträgt 363 kWh/t (Biotonne, Nassvergärung) bis 732 kWh/t (Speisereste Trockenvergärung) und liegt im Mittel bei 514 Ausgangsmaterial.¹⁶

Bei Nutzung des Biogases in einem Blockheizkraftwerk mit ausschließlicher Stromgewinnung liegt der Nettoenergiegewinn je nach Material zwischen 159 kWh/t (Biotonne) und 342 kWh/t (Speisereste), im Mittel bei 230 kWh je Tonne Ausgangsmaterial.

¹⁶Beim Vergleich der Erzeugung von Strom und Wärme aus Biogas mit der Biomethanproduktion ist zu berücksichtigen, dass bei der Biomethanherzeugung noch keine Umwandlungsverluste angefallen sind.

Der Nettoenergiegewinn je Tonne ist für Küchen- und Kantinenabfälle unabhängig vom Vergärungsverfahren und der Nutzung des Biogases – und trotz des zusätzlichen Energiebedarfs für die Hygienisierung – am größten (von 342 kWh/t bei ausschließlicher Verstromung bis zu 856 kWh/t Input bei der Erzeugung von Biomethan). Grünschnitt liegt im mittleren Bereich gefolgt von Marktabfällen. Verglichen mit Speiseabfällen wird bei Biotonnematerial nur etwa die Hälfte an Nettoenergiegewinn je Tonne Input erzielt (Biotonnematerial von 159 kWh/t bei ausschließlicher Verstromung bis zu 425 kWh/t Input bei der Erzeugung von Biomethan).

**Nettoenergiegewinn
nach Ausgangs-
substraten**

7.1.2 Energieeffizienz

Im Schnitt über alle biogenen Abfälle werden bei der Erzeugung von Biomethan 48 % des Energieinhalts des Abfalls (38 % bei Grünschnitt bis 62 % bei Speiseresten), bei der Erzeugung von Strom und vollständiger Nutzung der erzeugten Wärme 41 % genutzt (33 % bei Grünschnitt bis 53 % bei Speiseresten). Wird aus Biogas ausschließlich Strom erzeugt, so werden im Schnitt nur 18 % des Energieinhalts des Abfalls genutzt (15 % bei Grünschnitt bis 25 % bei Speiseresten).

**höchste
Energieeffizienz bei
Biomethan-
erzeugung**

Bei der Vergärung von Küchen- und Kantinenabfällen ist die Energieeffizienz am höchsten (25 % bei ausschließlicher Verstromung bis zu 62 % bei der Erzeugung von Biomethan). Marktabfälle und Biotonnematerial liegen im mittleren Bereich. Bei Grünabfällen beträgt die Energieeffizienz 15 % bei ausschließlicher Verstromung und 38 % bei der Erzeugung von Biomethan.

**Energieeffizienz
nach Ausgangs-
substraten**

Tabelle 22 und Abbildung 1 zeigen zusammenfassend die Ergebnisse für den Nettoenergiegewinn und die Energieeffizienz bei der Nassvergärung von biogenen Abfällen ohne Separierung des Gärrestes für unterschiedliche Nutzungsarten der im erzeugten Biogas enthaltenen Energie.

Tabelle 21: Nettoenergiegewinn bei der Nassvergärung von biogenen Abfällen ohne Separierung des Gärrestes (kWh/t Input und Energieeffizienz); (Quelle: Umweltbundesamt).*

	Erzeugung von Strom und Wärme mittels BHKW			Erzeugung von Biomethan
	Anteil der an externe Verbraucher abgegebenen Wärme			-
	0 %	50 %	100 %	
Biotonne	159 16 %	261 27 %	363 37 %	425 44 %
Küchen- und Kantinenabfälle	342 25 %	537 39 %	732 53 %	856 62 %
Marktabfälle	178 18 %	292 31 %	406 42 %	478 49 %
Grünschnitt	242 15 %	397 24 %	553 33 %	635 38 %
Durchschnitt	230 18 %	372 30 %	514 41 %	599 48 %

* Energieeffizienz: Netto-Primärwirkungsgrad (erzielter Netto-Nutzen aus dem Energiegehalt des behandelten Abfalls)

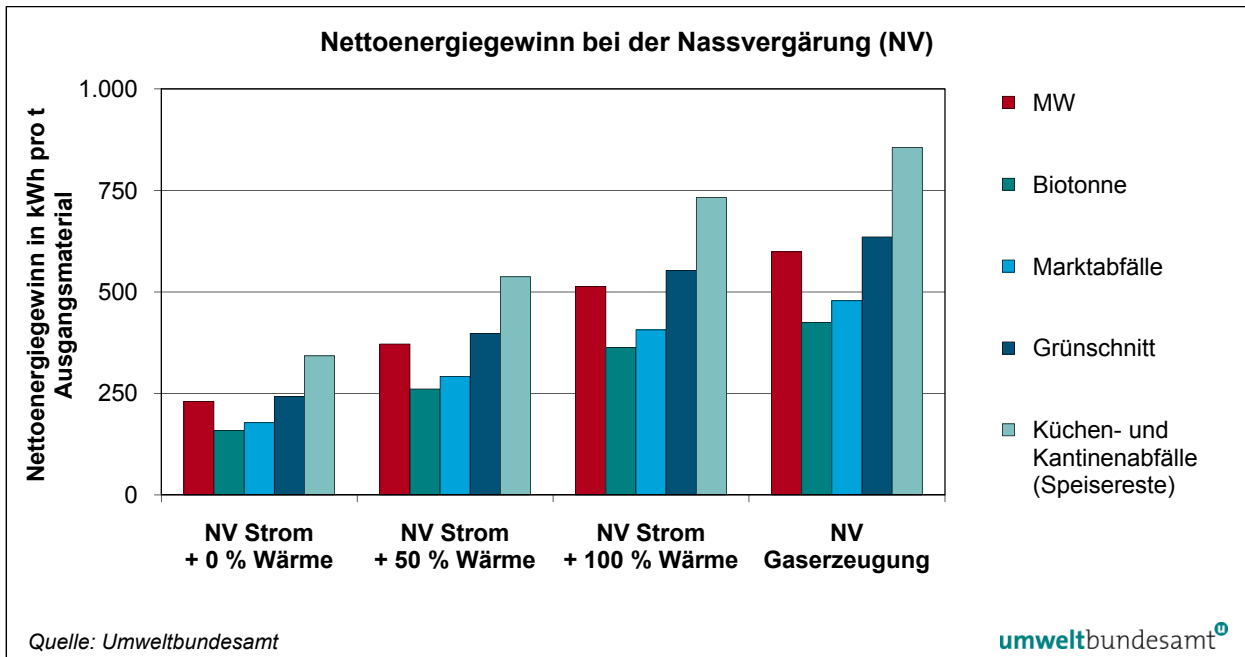


Abbildung 1: Nettoenergiegewinn bei der Nassvergärung (NV) von biogenen Abfällen ohne Separierung des Gärrestes.

7.2 Energiebilanz und Energieeffizienz der Vergärung mit Separierung des Gärrestes

geringere Energieeffizienz durch Kompostierung

Im Unterschied zur Energiebilanz und -effizienz bei der Vergärung ohne Separierung des Gärrestes werden hier die Energieaufwände für die teilgeschlossene Kompostierung des Gärrestes (Diesel, Stromeigenverbrauch) mit berücksichtigt. Diese Aufwände betragen je nach biogenem Ausgangsmaterial zwischen 38 und 50 kWh¹⁷ – im Mittel 44 kWh/t biogenes Ausgangsmaterial – und verschlechtern die Energiebilanz entsprechend.

Die Energieeffizienz verringert sich durch die Kompostierung des festen Gärrestes im Vergleich zur Vergärung ohne Separierung je nach Ausgangsmaterial um 2,5–5,5 Prozentpunkte.

Im Schnitt über alle biogenen Abfälle werden bei der Erzeugung von Biomethan bei der Nassvergärung 45 % des Energieinhalts des Abfalls (36 % bei Grünschnitt bis 59 % bei Speiseresten), bei der Erzeugung von Strom und vollständiger Nutzung der erzeugten Wärme 38 % genutzt (31 % bei Grünschnitt bis 50 % bei Speiseresten). Wird ausschließlich Strom aus Biogas erzeugt, so wird im Schnitt nur 15 % des Energieinhalts des Abfalls genutzt (12 % bei Grünschnitt bis 22 % bei Speiseresten).

Die Art des Vergärungsverfahrens (nass oder trocken) hat unter den getroffenen Annahmen einen sehr geringen Einfluss auf den Nettoenergiegewinn.

¹⁷ KEA des Fremdstrombezuges wurde berücksichtigt

Tabelle 22 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse für den Nettoenergiegewinn und die Energieeffizienz bei der Vergärung von biogenen Abfällen mit Separierung des Gärrestes und anschließender teilgeschlossener Kompostierung für unterschiedliche Nutzungsarten der im erzeugten Biogas enthaltenen Energie.

Tabelle 22: Nettoenergiegewinn bei der Vergärung von biogenen Abfällen mit Separierung des Gärrestes (kWh/t Input und Anteil der gewonnenen Energie, bezogen auf den Energieinhalt des Substrats); (Quelle: Umweltbundesamt).

	Erzeugung von Strom und Wärme mittels BHKW						Erzeugung von Biomethan	
	Anteil der an externe Verbraucher abgegebenen Wärme							
	0 %		50 %		100 %			
Art der Vergärung	Nass	Tr.	Nass	Tr.	Nass	Tr.	Nass	Tr.
Biotonne	109 11 %	109 11 %	211 22 %	221 23 %	313 32 %	333 34 %	375 39 %	398 41 %
Küchen- und Kantinenabfälle	305 22 %	305 22 %	500 36 %	510 37 %	695 50 %	715 51 %	818 59 %	841 61 %
Marktabfälle	127 13 %	127 13 %	241 25 %	251 26 %	355 37 %	375 39 %	427 44 %	449 46 %
Grünschnitt	204 12 %	204 12 %	359 22 %	369 22 %	514 31 %	534 32 %	597 36 %	619 37 %
Durchschnitt	186 (15 %)		333 (26 %)		479 (38 %)		566 (45 %)	

Tr ... Trockenvergärung

8 THG-BILANZ DER BEHANDLUNG BIOGENER ABFÄLLE

Die Treibhausgasbilanz der Behandlung biogener Abfälle ergibt sich aus den Emissionen, die mit der Behandlung und Verwertung verbunden sind, abzüglich der erzielbaren Gutschriften durch die Verwertung der erzeugten „Produkte“.

8.1 THG-Emissionen bei der Behandlung und Verwertung biogener Abfälle

Die THG-Emissionen betragen bei der teilgeschlossenen Kompostierung 60 kg CO_{2-eq}/t, bei der offenen Kompostierung 72 kg CO_{2-eq}/t.

Großteil der Emissionen aus der Kompostierung sind prozessbedingt

Bei der offenen Kompostierung sind 72 % der Emissionen durch die biologischen Prozesse und 15 % durch den Energieeinsatz bedingt. Auch bei der teilgeschlossenen Kompostierung stammt der größte Teil der Emissionen aus dem Prozess selbst (53 %), der Energieverbrauch trägt 33 % zu den Emissionen bei. Die jeweils verbleibenden Restemissionen sind vor allem durch die Anlieferung und Aufbereitung verursacht. Die Emissionen bei der Aufbringung betragen lediglich 5 % der Gesamtemissionen.

Emissionen bei Vergärung meist höher als bei Kompostierung

Die THG-Emissionen der betrachteten Vergärungsverfahren¹⁸ liegen zwischen 67 kg CO_{2-eq}/t (Nassvergärung von Biotonnenmaterial ohne Separierung des Gärrestes, Erzeugung von Strom und Wärme, 2 % Verluste vom Gärrestlager) und 155 kg CO_{2-eq}/t (Trockenvergärung von Speiseabfällen mit Separierung des Gärrestes, Aufbereitung des Biogases zu Biomethan).

Wesentliche Ergebnisse für die Emissionen bei der Vergärung:

höchste Emissionen bei Biomethan-Aufbereitung

- Die Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes hat dann geringere Emissionen als eine Vergärung mit Separation und anschließender Kompostierung des festen Gärrestes, wenn die Emissionen vom Gärrestlager maximal 5 % des gesamten Gasertrags ausmachen.
- Die Emissionen bei der Aufbereitung zu Biomethan sind um rund 30 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) bis rund 45 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste) höher als bei der Erzeugung von Strom und Wärme aus dem Biogas und mit Separierung des Gärrestes.
- Bei der Aufbereitung zu Biomethan sind bei den Varianten mit Kompostierung des Gärrestes 46 % der Emissionen auf die Kompostierung und 12 % auf das Abpressen des Gärrestes zurückzuführen. Die Methanverluste bei der Aufbereitung des Gases verursachen rund 20 % und der für die Aufbereitung notwendige Energieaufwand rund 10 %. Der Rest entfällt auf die benötigte Strommenge für die Vergärung sowie die Aufbereitung der Abfälle.

Wird der Gärrest nicht kompostiert, so stellen die Emissionen des Gärrestlagers die größte Emissionsquelle dar: Bei 2 % Emissionen des Gasertrags aus dem Gärrestlager tragen diese zu 27 % der Gesamtemissionen bei.

¹⁸ Bei den Vergärungsverfahren ohne Separierung des Gärrestes wird nur die Variante mit einer Emission von 2 % des gesamten Gasertrages aus dem Gärrestlager dargestellt.

- Bei der Erzeugung von Strom und Wärme aus dem Biogas stammen bei den Varianten mit Kompostierung des Gärrestes knapp über 60 % der Emissionen aus der Kompostierung des festen Gärrestes. Jeweils rund 15 % emittieren beim Abpressen des Gärrestes und dem Methanschlupf im Blockheizkraftwerk. Der Rest entfällt auf die Anlieferung und Aufbereitung sowie die Emissionen aus den aufgebrauchten Gärrestkomposten. Wird der Gärrest nicht kompostiert, so sind die Emissionen des Gärrestlagers die Hauptemissionsquelle: Bei 2 % Emissionen des Gasertrags aus dem Gärrestlager tragen diese zu 40 % der Gesamtemissionen bei.
- Der Methanschlupf bei den BHKW trägt zwischen 15 % und 20 % zu den THG-Emissionen bei.
- Die Emissionen bei Trocken- und Nassvergärung sind unter den getroffenen Annahmen sehr ähnlich.

Detaillierte Ergebnisse sind im Kapitel 8.3 sowie im Anhang Tabelle 24 bis Tabelle 29 dargestellt.

8.2 THG-Gutschriften durch die Behandlung und Verwertung biogener Abfälle

Bei der Kompostierung und der Vergärung werden durch die Aufbringung von Komposten und Gärrückständen den Böden Nährstoffe zugeführt, wodurch unter Berücksichtigung der Nährstoffverfügbarkeit entsprechende Mengen an mineralischen Handelsdüngern eingespart werden können. Somit werden Produktionsemissionen bei der Erzeugung dieser Handelsdünger sowie Lachgasemissionen, die bei der Aufbringung N-haltiger Handelsdünger entstehen, vermieden. Eine weitere Gutschrift erfolgt durch die Fixierung von Kohlenstoff in langfristig stabilen Humusverbindungen in Komposten. Bei der Vergärung kommen zusätzliche Gutschriften durch die Erzeugung von Strom, Wärme und Biomethan hinzu.

Die geringsten Gutschriften werden bei der offenen und teilgeschlossenen Kompostierung mit 24 kg CO_{2-eq}/t biogener Abfälle erzielt. Die Hälfte der Gutschrift stammt aus der Kohlenstoff-Fixierung, ein Drittel durch vermiedene Emissionen bei der Produktion von Handelsdüngern und 15 % stammen aus vermiedenen Lachgasemissionen durch die Aufbringung von Handelsdüngern.

Bei der Vergärung reicht die Spanne der Gutschriften von 48 kg CO_{2-eq}/t (Nassvergärung von Biotonnenmaterial mit Separierung des Gärrestes, nur Stromproduktion) bis 310 kg CO_{2-eq}/t (Nassvergärung von Speisabfällen ohne Separierung des Gärrestes, Produktion von Biomethan).

Folgende wesentliche Ergebnisse für die Gutschriften bei der Vergärung ergeben sich aus den Berechnungen:

- Die Biomethanerzeugung erzielt bei gleicher Abfallart die höchsten Gutschriften. Dabei sind die Gutschriften bei den Varianten ohne Gärresteseparierung um 25 kg CO_{2-eq}/t höher als bei den Varianten mit Gärresteseparierung.
- Wird das Biogas zur Erzeugung von Strom und Wärme genutzt, so sind die Gutschriften bei vollständiger Wärmenutzung um 55–75 kg CO_{2-eq}/t geringer als bei der Biomethanerzeugung.

**geringste
Gutschriften bei der
Kompostierung**

**höchste
Gutschriften bei der
Erzeugung von
Biomethan**

- Bei der Erzeugung von Strom und Wärme sind die Gutschriften bei den Varianten ohne Separierung des Gärrestes um 20–35 kg CO_{2-eq}/t höher als bei den Varianten mit Separierung des Gärrestes
- Die Gesamtgutschriften bei einer reinen Stromerzeugung liegen bei den Varianten mit Kompostierung zwischen 48 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) und 97 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste). Davon werden 29 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) bis 79 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste) durch den erzeugten Strom erzielt.
Bei den Varianten ohne Kompostierung liegen die Gesamtgutschriften zwischen 85 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) und 131 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste), davon werden 40 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) bis 87 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste) durch den erzeugten Strom erzielt.
- Eine zur Stromeinspeisung zusätzliche Nutzung von 50 % der erzeugten Wärme erhöht die Gutschrift um 20 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) bis 40 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste).
- Eine zur Stromeinspeisung zusätzliche Nutzung von 100 % der erzeugten Wärme erhöht die Gutschrift um 63 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) bis 113 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste).¹⁹
- Der Anteil der C-Fixierung durch die aufgebrachten Gärrestkomposte an den Gesamtgutschriften liegt auch in den Varianten, bei denen nur Strom genutzt wird, bei maximal 16 %.
- Die Gutschrift für die C-Fixierung ist bei einer Gärrestseparierung höher als die Gutschriften durch die eingesparte Produktion von Handelsdüngern und die vermiedenen Lachgasemissionen bei der Aufbringung dieser Dünger zusammen.

Detaillierte Ergebnisse sind in Kapitel 8.3 sowie im Anhang Tabelle 24 bis Tabelle 29 dargestellt.

8.3 Gesamt-THG-Bilanzen der Behandlung biogener Abfälle

Die Gesamtbilanz ergibt sich aus den Emissionen abzüglich der Gutschriften (Saldo).

In den folgenden Kapiteln werden nur die Mittelwerte aus den betrachteten vier Abfallarten dargestellt. Die Trockenvergärung wird nicht gesondert ausgewiesen, da die Ergebnisse aufgrund der getroffenen Annahmen sehr ähnlich zu jenen der Nassvergärung sind.

Die detaillierten Ergebnisse für die einzelnen Abfallarten finden sich in den Tabelle 23 bis Tabelle 29 im Anhang.

¹⁹ Im Vergleich zur zusätzlichen Gutschrift bei 50%iger Wärmenutzung ist das mehr als eine Verdoppelung. Ursache ist, dass für die beiden Wärmevarianten (50 %/100 %) unterschiedliche Energieträgersubstitutionen angenommen wurden.

8.3.1 THG-Bilanz der Kompostierung

Die THG-Bilanz ist sowohl bei der offenen (47,4 kg CO₂-eq/t) als auch bei der teilgeschlossenen Kompostierung (35,7 kg CO₂-eq/t) positiv. Die positiven Werte werden vor allem durch die Methan- und Lachgasemissionen durch die biologische Aktivität während des Kompostierungsprozesses verursacht.

**Emissionen
übersteigen die
Gutschriften**

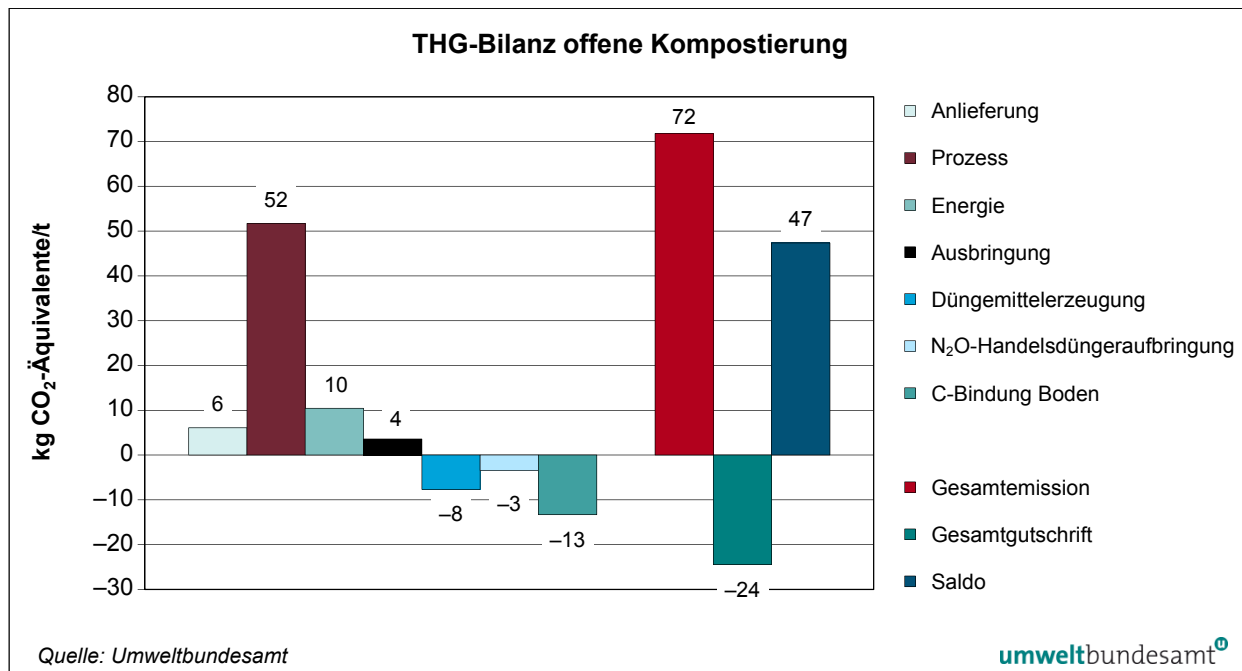


Abbildung 2: THG-Bilanz der offenen Kompostierung (in kg CO₂-eq/t Ausgangsmaterial).

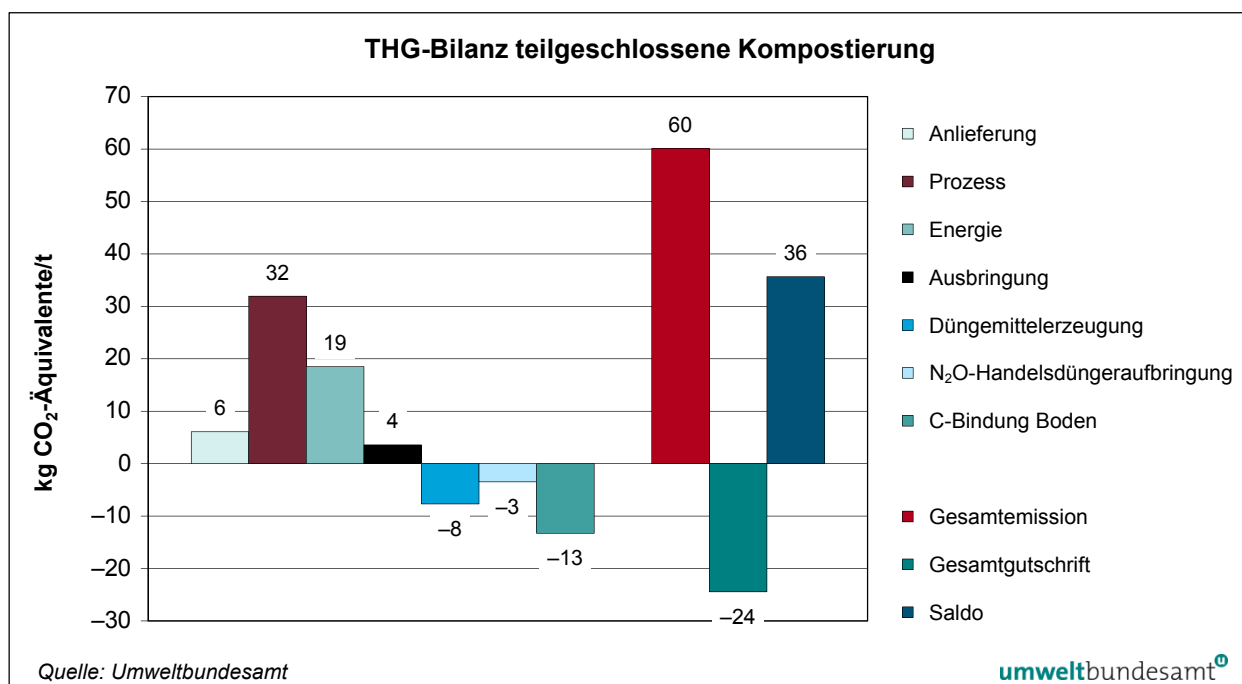


Abbildung 3: THG-Bilanz der teilgeschlossenen Kompostierung (in kg CO₂-eq/t Ausgangsmaterial).

8.3.2 THG-Bilanzen der Nassvergärung mit Kompostierung des Gärrestes

Bei der Nassvergärung mit Kompostierung wurden die Varianten

- (i) ausschließliche Stromerzeugung,
 - (ii) Stromerzeugung + 50%ige Nutzung der erzeugten Wärme,
 - (iii) Stromerzeugung + 100%ige Nutzung der erzeugten Wärme sowie
 - (iv) Aufbereitung von Biogas zu Biomethan
- betrachtet.

Die Varianten (i) bis (iii) unterscheiden sich nur in der jeweils erzielbaren Gesamtgutschrift für Strom und die abgegebene Wärme, die Gesamtemissionen sind jeweils gleich. Der Großteil (62 %) der Emissionen dieser Varianten wird durch die Kompostierung des festen Gärrestes verursacht. Weitere 15 % der Emissionen stammen aus dem Abpressen des Gärrestes.

Variante (iv) unterscheidet sich in zusätzlichen Punkten und wird getrennt betrachtet.

Die THG-Bilanzen der betrachteten Abfälle bei den vier Varianten reichen von – 38 kg CO_{2-eq}/t (ausschließlichen Stromerzeugung) bis zu – 75 kg CO_{2-eq}/t (Aufbereitung des Biogases zu Biomethan).

Die detaillierten Ergebnisse für die betrachteten Abfallströme für die Varianten (i) bis (iii) sind in Tabelle 24 im Anhang dargestellt.

Ad (i) ausschließliche Stromerzeugung

Emissionen übersteigen die Gutschriften

Die mittlere THG-Bilanz liegt bei 40 kg CO_{2-eq}/t, wobei die Bandbreite von 55 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) bis 13 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste) reicht.

Im Mittel stammen 72 % der Gutschriften aus dem erzeugten Strom, 16 % aus der C-Fixierung.

Ad (ii) Stromerzeugung + 50%ige Nutzung der erzeugten Wärme

Die mittlere THG-Bilanz liegt bei 10 kg CO_{2-eq}/t, wobei die Bandbreite von 33 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) bis – 28 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste) reicht.

Im Mittel stammen 50 % der Gutschriften aus dem erzeugten Strom, 31 % aus der erzeugten Wärme und 11 % aus der C-Fixierung.

Ad (iii) Stromerzeugung + 100%ige Nutzung der erzeugten Wärme

Gutschriften übersteigen die Emissionen

Die mittlere THG-Bilanz liegt bei – 41 kg CO_{2-eq}/t, wobei die Bandbreite von – 3 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) bis – 97 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste) reicht.

Im Mittel stammen 33 % der Gutschriften aus dem erzeugten Strom, 54 % aus der erzeugten Wärme und 7 % aus der C-Fixierung.

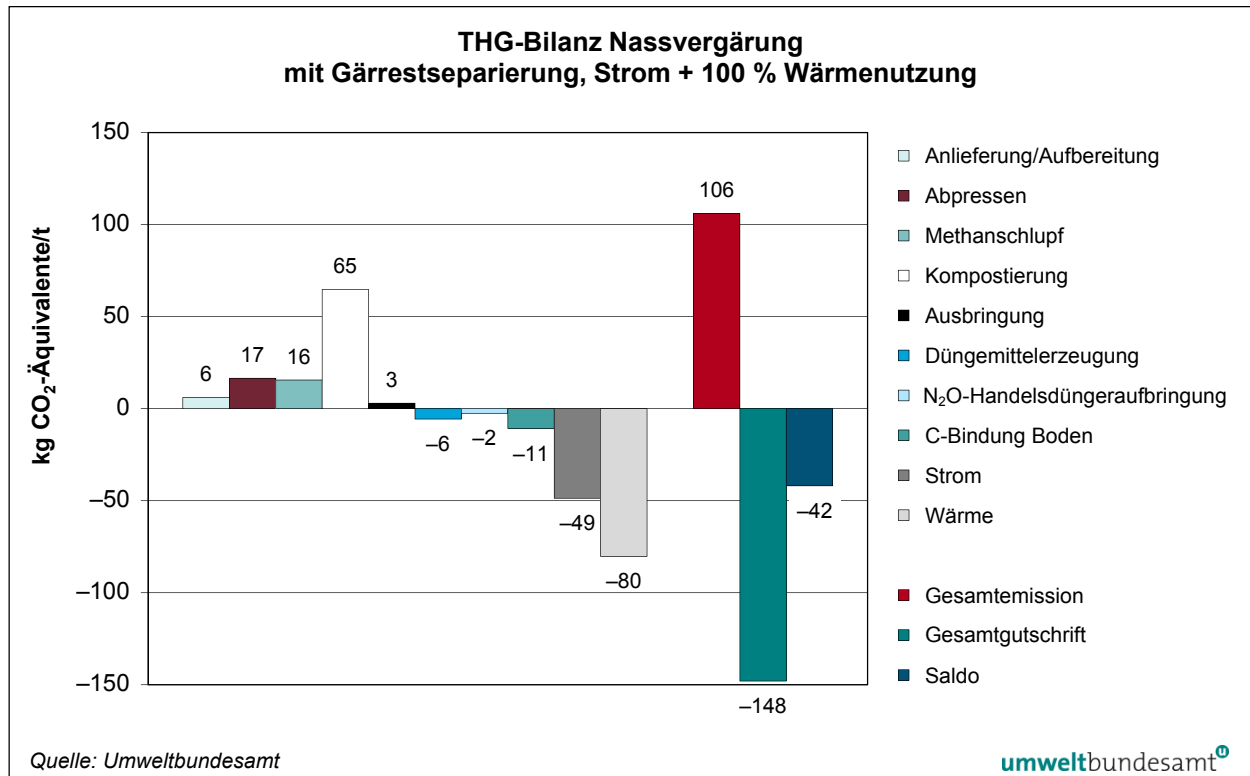


Abbildung 4: Emissionen, Gutschriften und Saldo bei der Nassvergärung mit Separierung des Gärrestes und Strom/Wärmenutzung in kg CO₂-eq/t Ausgangsmaterial.

Abbildung 4 zeigt Emissionen, Gutschriften und Saldo (Emissionen – Gutschriften) bei der Nassvergärung mit Separierung des Gärrestes mit der Nutzung des erzeugten Stroms sowie 100 % der erzeugten Wärme. Würde nur 50 % der Wärme genutzt, so wäre die Gutschrift für die Wärmenutzung und damit auch der Saldo um 50 kg CO₂-eq/t niedriger.

Ad (iv) Aufbereitung von Biogas zu Biomethan

46 % der Emissionen dieser Variante werden durch die Kompostierung des festen Gärrestes verursacht. Zweitgrößte Emissionsquelle mit 19 % sind Methanverluste bei der Aufbereitung des Biogases zu Biomethan. Weitere 12 % der Emissionen stammen aus dem Abpressen des Gärrestes, 10 % aus dem für die Aufbereitung des Biogases notwendigen Strom und 7 % aus dem für die Vergärung benötigten Strom.

Die THG-Bilanz beträgt im Mittel – 71 kg CO₂-eq/t, wobei die Bandbreite von – 30 kg CO₂-eq/t (Biotonne) bis – 131 kg CO₂-eq/t (Speisereste) reicht.

Im Mittel stammen 91 % der Gutschriften aus dem erzeugten Biomethan.

Die folgende Abbildung 5 zeigt Emissionen, Gutschriften und Saldo bei der Nassvergärung mit Separierung des Gärrestes und Aufbereitung des Biogases zu Biomethan. Die detaillierten Ergebnisse für die betrachteten Abfallströme für die Biomethanherzeugung sind in Tabelle 25 im Anhang dargestellt.

**Kompostierung ist
Hauptquelle der
Emissionen**

**Gutschriften sind
deutlich höher als
die Emissionen**

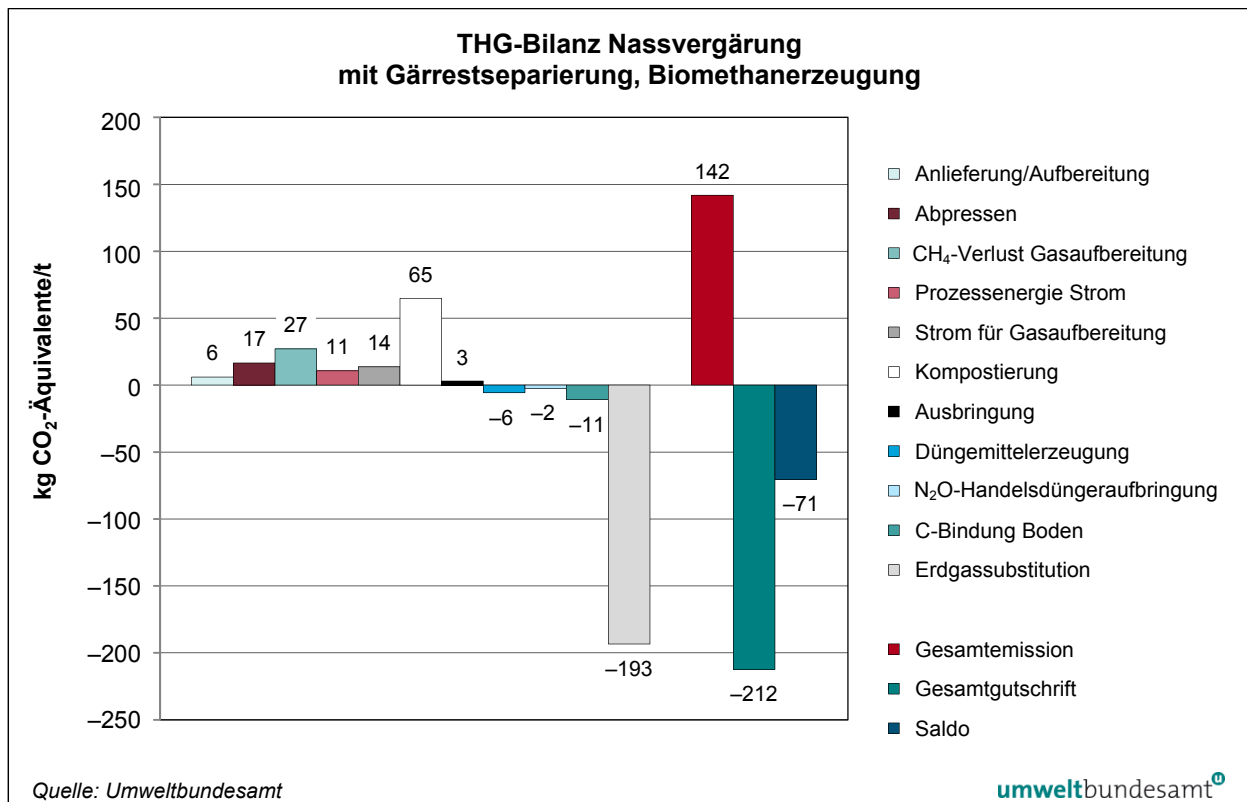


Abbildung 5: Emissionen, Gutschriften und Saldo bei der Nassvergärung mit Separierung des Gärrestes und Aufbereitung des Biogases zu Biomethan (in kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial).

8.3.3 THG-Bilanzen der Trockenvergärung mit Kompostierung des Gärrestes

Die getroffenen Annahmen für die Trockenvergärung sind weitestgehend ident mit jenen der Nassvergärung. Lediglich beim Wärmebedarf wurde bei der Trockenvergärung ein etwas geringerer Wert angenommen. Demzufolge sind die Ergebnisse mit jenen der Nassvergärung praktisch ident.

Bei einer Nutzung von 50 % der Wärme ist die Gutschrift um 2 kg CO_{2-eq}/t und bei 100%iger Nutzung um 6 kg CO_{2-eq}/t höher als bei der Nassvergärung. Die Detailergebnisse sind in Tabelle 26 im Anhang dargestellt.

Ähnlich gering fallen die Unterschiede bei der Biomethanerzeugung aus. Durch die etwas höhere zu verarbeitende Gasmenge steigen die Methanverluste um 1 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial. Gleichzeitig steigt jedoch die Gutschrift für die Substituierung von Erdgas um 6 kg CO_{2-eq}. Der Saldo ist somit um 5 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial niedriger als bei der Nassvergärung.

Die Detailergebnisse für die Biomethanerzeugung sind in Tabelle 27 im Anhang dargestellt.

8.3.4 THG Bilanzen der Nassvergärung ohne Kompostierung des Gärrestes

Bei der Nassvergärung ohne Kompostierung (Co-Vergärung) wurden die Varianten

- (i) ausschließliche Stromerzeugung,
 - (ii) Stromerzeugung + 50%ige Nutzung der erzeugten Wärme,
 - (iii) Stromerzeugung + 100%ige Nutzung der erzeugten Wärme sowie
 - (iv) Aufbereitung von Biogas zu Biomethan
- betrachtet.

Die Varianten (i) bis (iii) unterscheiden sich sowohl in den Emissionen aus dem Gärrestlager als auch in der jeweils erzielbaren Gesamtgutschrift für Strom und die abgegebene Wärme.

Variante (iv) unterscheidet sich in zusätzlichen Punkten und wird getrennt betrachtet.

Die THG-Bilanzen der betrachteten Abfälle bei den vier Varianten reichen dabei von – 16 kg CO_{2-eq}/t (ausschließlichen Stromerzeugung, 2 % des gesamten Gasertrages emittieren vom Gärrestlager) bis zu – 141 kg CO_{2-eq}/t (Aufbereitung des Biogases zu Biomethan, 2 % des gesamten Gasertrages emittieren vom Gärrestlager).

Die detaillierten Ergebnisse für die betrachteten Abfallströme für die Varianten (i) bis (iii) sind in Tabelle 28 im Anhang dargestellt.

Alle Bilanzen werden stark durch die Emissionen vom Gärrestlager beeinflusst. Entsprechend den getroffenen Annahmen nehmen die Emissionen bei Materialien mit höherem Gasertrag stärker zu. Die folgende Abbildung 6 zeigt den Einfluss der Emissionen vom Gärrestlager auf die THG-Bilanzen. Dabei wurde eine Emission vom Gärrestlager in Höhe von 2 %, von 5 % und von 10 % des Gasertrages angesetzt. Während bei Emissionen von 2 % in allen Fällen eine negative THG-Bilanz erzielt wird, ergeben sich bei einer Emission von 5 % bei einer alleinigen Gewinnung von Strom, aber auch bei einer zusätzlichen Nutzung von 50 % der Abwärme positive THG-Bilanzen. Bei Emissionen von 10 % der Gasmenge vom Gärrestlager wird auch bei der Aufbereitung zu Biomethan eine positive THG-Bilanz erzielt. Die THG-Bilanzen bei der alleinigen Nutzung von Strom und auch bei der zusätzlichen Nutzung von 50 % der Abwärme sind positiver als die THG-Bilanzen bei der Kompostierung.

THG-Bilanz stark durch Emissionen vom Gärrestlager geprägt

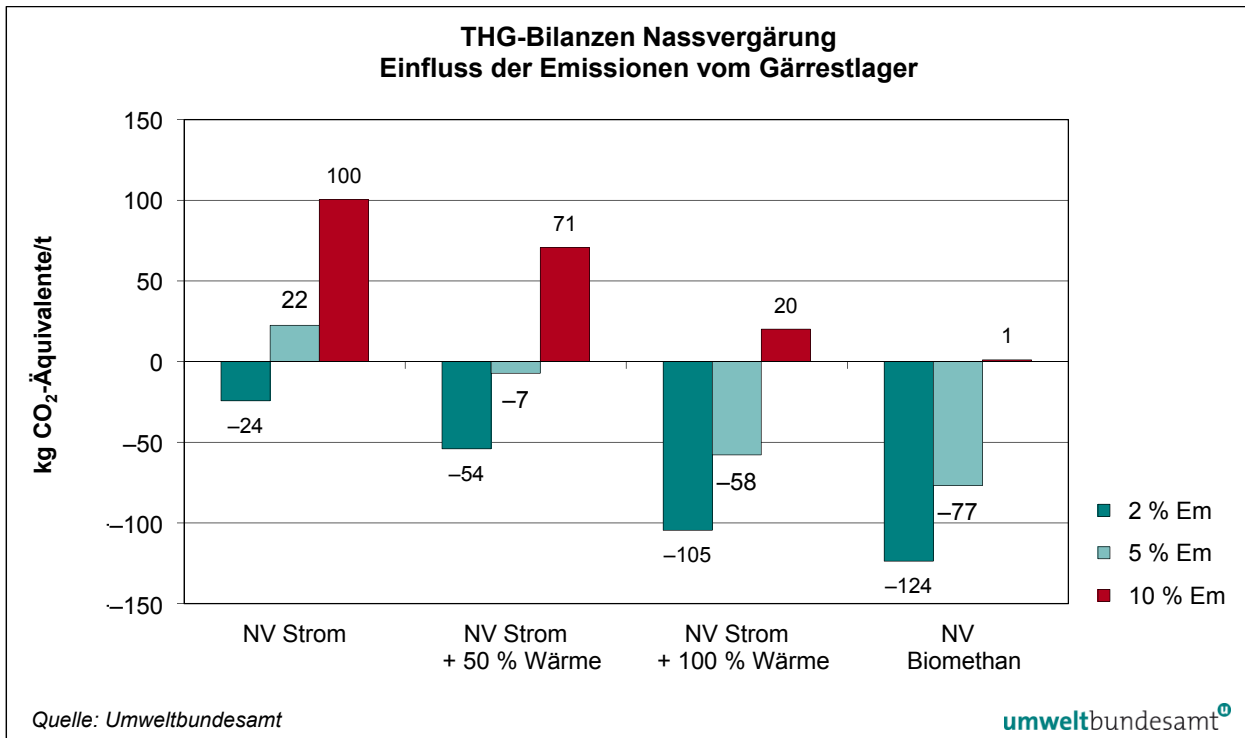


Abbildung 6: Mittlere Salden bei der Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes in Abhängigkeit von den Emissionen aus dem Gärrestlager (in kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial).
NV ... Nassvergärung

In den folgenden Abschnitten wird eine Emission von Methan vom Gärrestlager von 2 % des Gasertrages der Materialien dargestellt.

Ad (i) ausschließliche Stromerzeugung

Die THG-Bilanz der reinen Stromerzeugung beträgt – 24 kg CO_{2-eq}/t, wobei die Bandbreite von – 17 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) bis – 35 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste) reicht. Im Mittel stammen 40 % der Emissionen aus dem Gärrestlager, 32 % aus der Ausbringung und 20 % werden durch den Methanschluß verursacht. Der Anteil der Stromerzeugung an der Gutschrift beträgt 57 %, jener der eingesparten Emissionen bei der Düngemittelproduktion 20 %.

Ad (ii) Stromerzeugung + 50%ige Nutzung der erzeugten Wärme

Die THG-Bilanz der Stromerzeugung und 50%igen Nutzung der Abwärme beträgt – 54 kg CO_{2-eq}/t, wobei die Bandbreite von – 39 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) bis – 76 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste) reicht. Der Anteil der Stromerzeugung an der Gutschrift beträgt 44 %, die Abgabe von 50 % der erzeugten Wärme trägt 22 % und die eingesparten Emissionen bei der Düngemittelproduktion 16 % zu den Gutschriften bei.

Ad (iii) Stromerzeugung + 100%ige Nutzung der erzeugten Wärme

Die THG-Bilanz der Stromerzeugung und 100%igen Nutzung der Abwärme beträgt – 105 kg CO_{2-eq}/t, wobei die Bandbreite von – 75 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) bis – 146 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste) reicht. Der Anteil der Stromerzeugung an der

Gutschrift beträgt 32 %, die Abgabe von 100 % der erzeugten Wärme trägt 44 % und die eingesparten Emissionen bei der Düngemittelproduktion 12 % zu den Gutschriften bei.

Die folgende Abbildung 7 zeigt Emissionen, Gutschriften und Saldo bei der Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes mit der Nutzung des erzeugten Stroms sowie 100 % der erzeugten Wärme bei 2 % Emissionen vom Gärrestlager. Würden nur 50 % der Wärme genutzt, so wäre die Gutschrift für die Wärmenutzung und damit auch der Saldo um 50 kg CO_{2-eq}/t niedriger.²⁰

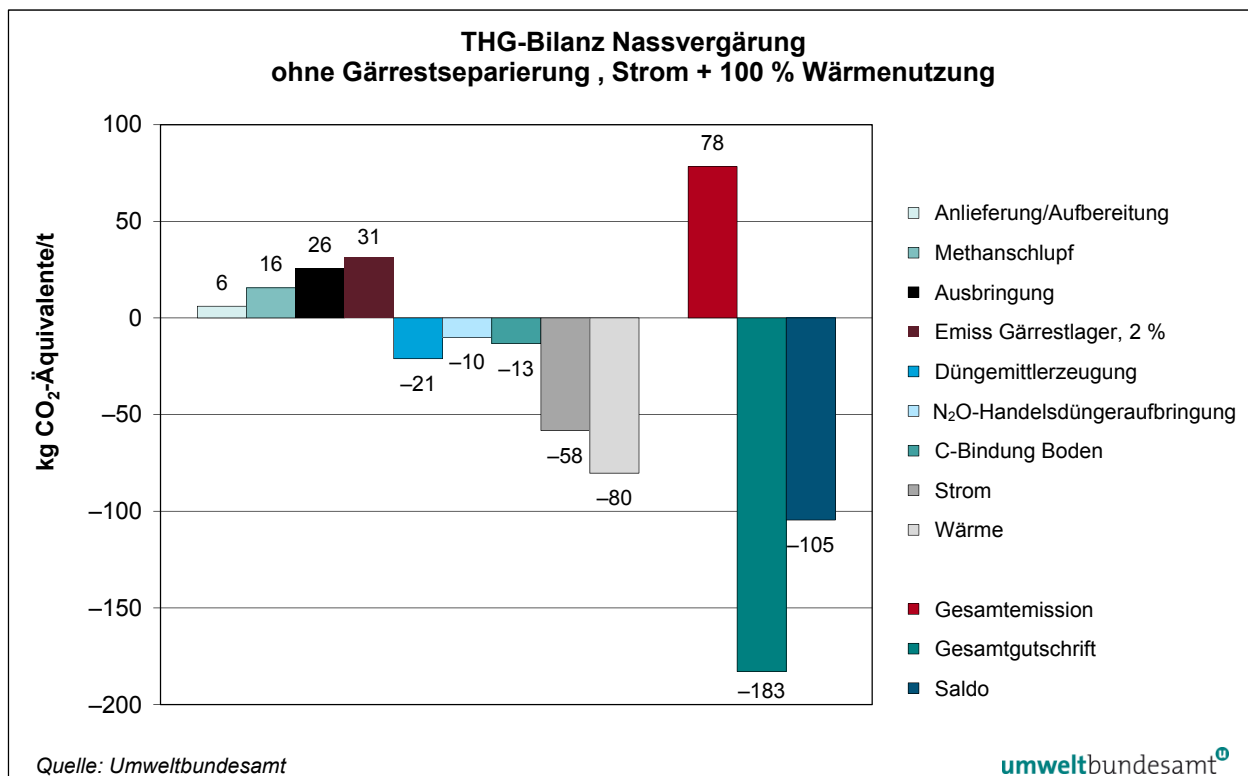


Abbildung 7: Emissionen, Gutschriften und Saldo bei der Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes, Strom und vollständiger Wärmenutzung bei 2 % Emissionen vom Gärrestlager (in kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial).

Ad (iv) Aufbereitung von Biogas zu Biomethan

Die THG-Bilanz der Biomethanherzeugung aus Biogas und 100%igen Nutzung der Abwärme beträgt – 124 kg CO_{2-eq}/t, wobei die Bandbreite von – 91 kg CO_{2-eq}/t (Biotonne) bis – 171 kg CO_{2-eq}/t (Speisereste) reicht. Im Mittel stammen 27 % der Emissionen aus dem Gärrestlager, 24 % der Emissionen sind Methanverluste bei der Aufbereitung. Weitere 12 % der Emissionen sind durch den benötigten Strom für die Gasaufbereitung und 9 % durch den Strombedarf der Vergärung bedingt. Der Anteil der Erdgassubstitution an der Gutschrift beträgt 81 %, jener der eingesparten Emissionen bei der Düngemittelproduktion 9 %.

²⁰ In den Varianten 50%ige 100%ige Abwärmenutzung wurde eine unterschiedliche Substitution von Energieträgern angesetzt.

Die detaillierten Ergebnisse für die betrachteten Abfallströme für die Biomethanherzeugung sind in Tabelle 29 im Anhang dargestellt.

Abbildung 8 zeigt Emissionen, Gutschriften und Saldo bei der Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes und Aufbereitung des Biogases zu Biomethan.

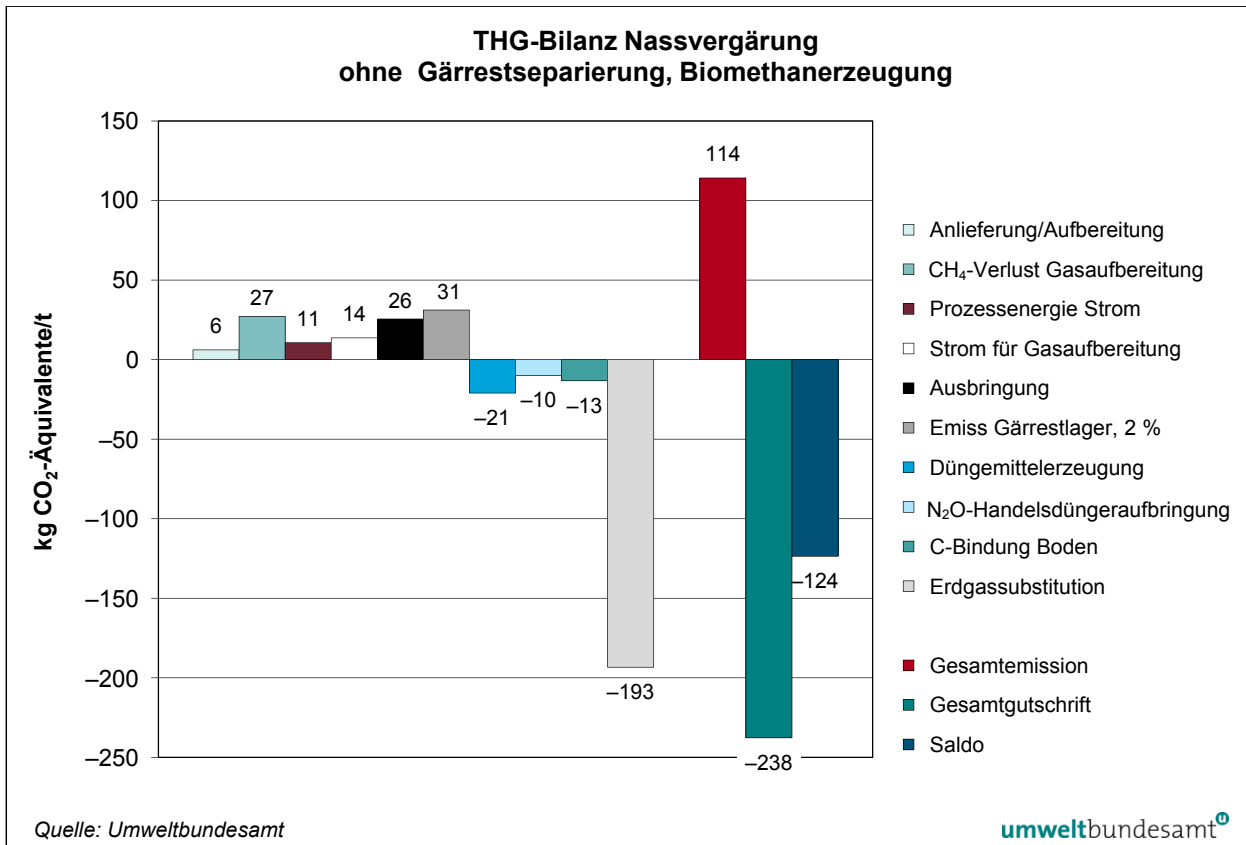


Abbildung 8: Emissionen, Gutschriften und Saldo bei der Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes und Aufbereitung des Biogases zu Biomethan bei 2 % Emissionen vom Gärrestlager (in kg CO₂-eq/t Ausgangsmaterial).

8.3.5 Vergleich der THG-Bilanzen der betrachteten Verfahren

Die Mittelwerte der THG-Bilanz (Emissionen abzüglich Gutschriften) liegen bei den betrachteten Behandlungsverfahren und den einzelnen Varianten zwischen 47 kg CO₂-eq je Tonne (offene Kompostierung) und – 124 kg CO₂-eq je Tonne Ausgangsmaterial (Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes, Aufbereitung von Biogas zu Biomethan und 2 % Emissionen vom Gärrestlager).

Detaillierte Ergebnisse sind im Anhang, Tabelle 24 bis Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 23: Emissionen, Gutschriften und Saldo bei den betrachteten Verfahren (in kg CO₂-eq/t Ausgangsmaterial); (Quelle: Umweltbundesamt).

	Emission	Gutschrift	Saldo
offene Kompostierung	72	– 24	47
teilgeschlossene Kompostierung	60	– 24	36
NVS Strom	106	– 68	38
NVS Strom + 50 % Wärme	106	– 97	9
NVS Strom + 100 % Wärme	106	– 148	– 42
NVS Gasaufbereitung	142	– 212	– 71
TVS Strom	106	– 68	38
TVS Strom + 50 % Wärme	106	– 100	7
TVS Strom + 100 % Wärme	106	– 154	– 48
TVS Gasaufbereitung	143	– 218	– 75
NV Strom 2 % Em	78	– 103	– 24
NV Strom + 50 % Wärme 2 % Em	78	– 132	– 54
NV Strom + 100 % Wärme 2 % Em	78	– 183	– 105
NV Gasaufbereitung 2 % Em	114	– 238	– 124

NVS ... Nassvergärung mit Separierung des Gärrestes; TVS ... Trockenvergärung mit Separierung des Gärrestes; NV.. Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes

NV ... Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes

Abbildung 9 zeigt die THG-Bilanzen der Behandlungsverfahren mit unterschiedlicher Nutzung des Biogases.

KEVBA – THG-Bilanz der Behandlung biogener Abfälle

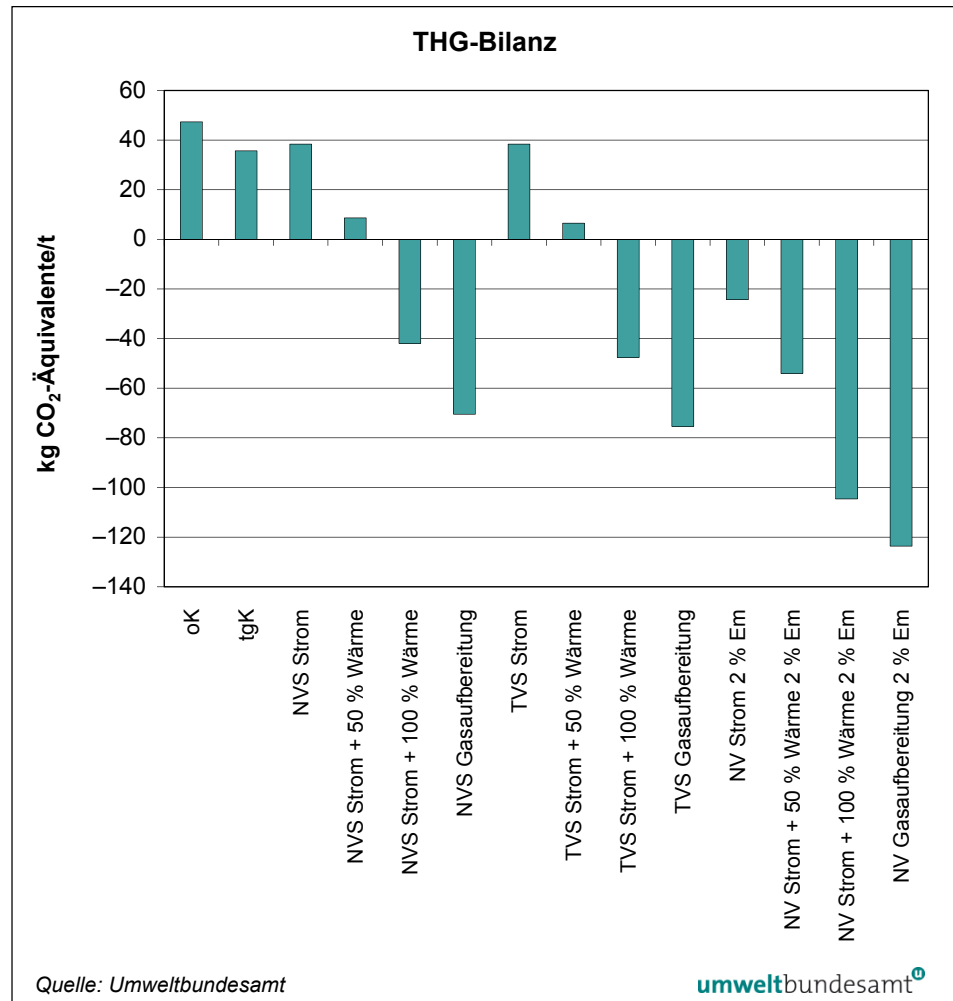


Abbildung 9: Mittelwerte der Gutschriften, Emissionen und Salden bei der Behandlung biogener Abfälle (in kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial).

NVS ... Nassvergärung mit Separierung des Gärrestes; TVS ... Trockenvergärung mit Separierung des Gärrestes; NV ... Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes

Wesentliche Ergebnisse:

Biomethanherzeugung zeigt beste THG-Bilanz

- Die Aufarbeitung des Biogases zu Biomethan zeigt die beste THG-Bilanz. Die Bilanz weist um 20–30 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial geringere Werte auf als die Erzeugung von Strom mit vollständiger Nutzung der erzeugten Wärme.²¹

Bei der Erzeugung von Biomethan sind in allen Varianten mit Ausnahme bei der Nassvergärung ohne Separierung und 10% Emissionen vom Gärrestlager die Emissionen geringer als die Gutschriften.

²¹ Beim Vergleich ist zu berücksichtigen, dass bei der Aufbereitung zu Biomethan Energieumwandlungsverluste bei der späteren Nutzung nicht berücksichtigt sind.

- Die Vergärung ohne Separierung des Gärrestes zeigt eine deutlich bessere THG-Bilanz als die Vergärung mit Separierung und anschließender Kompostierung. Dies ist dadurch bedingt, dass einerseits keine Prozessemissionen bei der Kompostierung entstehen und kein Energieaufwand für die Kompostierung des Gärrestes benötigt wird und andererseits mehr Handelsdünger substituiert werden kann.

Dieser Vorteil besteht jedoch nur dann, wenn die Methanemissionen aus dem Gärrestlager maximal 5 % betragen, da sie die Ergebnisse massiv beeinflussen. Wird nur Strom erzeugt, dann weist die Vergärung ohne Separierung des Gärrestes nur dann eine negative THG-Bilanz auf, wenn die Emissionen vom Gärrestlager kleiner als 3,5 % sind.

- Die Vergärung mit Separierung des Gärrestes und Nutzung zumindest eines Teils der Abwärme weist eine bessere THG-Bilanz auf als die Kompostierung. Wird jedoch das Biogas nur zur Erzeugung von Strom genutzt, so liegt die THG-Bilanz im Mittel der Abfälle bei 38 kg CO_{2-eq} je Tonne Ausgangsmaterial und ist damit leicht schlechter als die THG-Bilanz bei der teilgeschlossenen Kompostierung (36 kg CO_{2-eq} je Tonne Ausgangsmaterial). Zu berücksichtigen dabei ist jedoch, dass stark gasbildende Abfälle wie z. B. Speiseabfälle eine wesentlich bessere THG-Bilanz zeigen (13 kg CO_{2-eq} je t) als schwächer gasbildende Abfälle wie z. B. Biotonne (55 kg CO_{2-eq} je t).

Die THG-Bilanzen der Vergärung mit Separierung des Gärrestes von biogenen Abfällen mit relativ geringem Gasertrag (z. B. Biotonne) sind auch bei vollständiger Nutzung der erzeugten Wärme nur schwach negativ.

**Wärmenutzung
verbessert THG-
Bilanz deutlich**

8.3.5.1 Sensitivität der Recheneingangsgrößen

Im folgenden Abschnitt wird der Einfluss einzelner Eingangsgrößen der Berechnungen auf das Bilanzergebnis dargestellt (Sensitivitätsanalyse).

- Eine Veränderung der Emissionen vom Gärrestlager um 1 %-Punkt bedeutet eine Zu- oder Abnahme von 12–21 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial.
- Die Veränderung des elektrischen Wirkungsgrades des Blockheizkraftwerkes um 1 %-Punkt verändert die Gutschrift für die Stromsubstitution je nach Material um 2–3 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial.
- Die Veränderung des thermischen Wirkungsgrades des Blockheizkraftwerkes um 1 %-Punkt verändert die Gutschrift für die Stromsubstitution je nach Material um 1–3 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial.
- Eine Erhöhung der Wärmeabgabe um 10 %-Punkte erhöht die Gutschrift je nach Material um 5–10 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial.
- Eine Erhöhung des Energiebedarfs für die Gasaufbereitung um 10 %-Punkte erhöht die Emissionen um 1–1,5 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial.
- Ein um 50 % geringer angesetzter Eigenstromverbrauch bei der Nassvergärung reduziert die THG-Emissionen um 9 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial.
- Ein um 50 % geringer angesetzter Dieseleinsatz bei der offenen Kompostierung reduziert die Emissionen um 5 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial.
- Ein um 50 % geringer angesetzter Stromeinsatz bei der teilgeschlossenen Kompostierung reduziert die Emissionen um 7 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial.
- Eine Verringerung der THG-Emissionen bei der offenen Kompostierung um 10 % reduziert die Emissionen um 5 kg CO_{2-eq}, eine Halbierung um 26 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial.

KEVBA – THG-Bilanz der Behandlung biogener Abfälle

- Eine Verringerung der THG-Emissionen bei der teilgeschlossenen Kompostierung um 10 % reduziert die Emissionen um 3 kg CO_{2-eq}, eine Halbierung um 16 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial.
- Bei um 10 % höheren CO_{2-eq} des Strommixes erhöhen sich die Gutschriften für die Stromeinspeisung um 4–9 kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial.

9 EMPFEHLUNGEN ZUR BEHANDLUNG BIOGENER ABFÄLLE

9.1 Empfehlungen zur Zuordnung von Abfällen zu Behandlungsverfahren

- Die folgenden Empfehlungen basieren ausschließlich auf den dargestellten THG-Bilanzen. Wirtschaftlichkeit, Qualitäten des Gärrestes, Standortvoraussetzungen, Schonung fossiler Energiequellen etc. werden somit nicht berücksichtigt.
- Um optimale THG-Bilanzen zu erreichen, sollen biogene Abfälle mit wenigen Ausnahmen vergoren werden.

Ligninreiche (holzige) Materialien, wie Baum- und Strauchschnitt, sind für die Vergärung nicht geeignet. Bei Strauchschnitt und Ästen steht eine energetische Nutzung im Vordergrund. Ausreichend Strukturmaterial muss jedoch erhalten bleiben, um eine qualitativ hochwertige Kompostierung biogener Materialien oder fester Gärreste durchführen zu können.

9.2 Empfehlungen zur Verbesserung der THG-Bilanzen bei der Behandlung biogener Abfälle

- Eine gasdichte Abdeckung des Gärrestlagers mit energetischer Nutzung des Restgases ist als Stand der Technik vorzuschreiben, da im Gärrestlager hohe CH_4 -Emissionen auftreten können. Hohe Methanverluste können dazu führen, dass die THG-Bilanz positiv wird. Durch eine gasdichte Abdeckung kann zusätzlich eine Ertragssteigerung erzielt werden.
- Bei der Standortfindung ist auf die Möglichkeit einer weitgehenden Nutzung der erzeugten Wärme Augenmerk zu legen, da dies die THG-Bilanz der Biogasanlagen deutlich verbessert. Durch das Setzen gezielter Anreize kann der Anteil der genutzten Wärme erhöht werden.
- Die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan zeigt eine bessere THG-Bilanz als Anlagen mit BHKW, auch wenn diese zu 100 % die Abwärme nutzen.
- Bei der Biogasaufbereitung zu Biomethan sollen Verfahren mit geringem Strom-/Wärmebedarf und geringem Methanschlupf zur Anwendung kommen, da der Methanschwund bei der Aufbereitung je nach Aufbereitungsverfahren beträchtlich sein kann. Zusätzlich ist die Aufbereitung mit relativ hohem Energiebedarf an Strom und Wärme verbunden.
- Bei der Verstromung in Gasmotoren sollte ein Teillast- oder Schwachlastbetrieb der Gasmotoren vermieden werden, da der Wirkungsgrad der Motoren sinkt und gleichzeitig höhere Methanemissionen auftreten.
- Eine direkte landwirtschaftliche Verwertung des Gärrestes ist bei entsprechender Qualität in Hinblick auf die THG-Bilanz vorteilhafter als eine Verwertung von kompostierten festen Gärresten und eine Behandlung des flüssigen Gärrestes in einer Kläranlage, da die enthaltenen Nährstoffe weitergehend genutzt werden können. Entsprechend große Gärrestbehälter und ausreichend verfügbare landwirtschaftliche Flächen (Akzeptanz, Überdüngung) für die Ausbringung des Gärrestes sind vorzusehen.

- Gärreste sollen möglichst auf unbewachsene Böden ausgebracht und rasch (innerhalb einer Stunde) eingearbeitet werden. Auf bewachsenen Böden sollten Gärreste mit Schleppschlauch ausgebracht werden. Die Injektion von Gärresten sollte nicht angewendet werden, da diese Ausbringungsmethode die Lachgasemissionen um den Faktor 2 bis 3 erhöht.
- Bei der Kompostierung der festen Gärreste sind die anaeroben Gärrückstände rasch in einen aeroben Prozess überzuführen, da die anaeroben methanbildenden Prozesse nicht sofort beendet sind, sondern in Teilbereichen des Materials noch eine gewisse Zeit weiterlaufen. Die Aerobisierung kann optimiert werden, indem den strukturarmen und nassen Gärrückständen hohe Anteile an frischem Material – insbesondere strukturreiche, d. h. ligninreiche Stoffe – hinzugefügt werden (mindestens 30 Vol-%).
- Eine teilgeschlossene Kompostierung biogener Abfälle (Abfälle mit geringem Gasertrag) ist gegenüber einer offenen Kompostierung aus Sicht der THG-Bilanz vorteilhaft.
- Bei der Kompostierung biogener Abfälle ist eine gute Sauerstoffversorgung in der Heißrottephase sicherzustellen, um die Methanemissionen möglichst niedrig zu halten (ausreichender Strukturmaterialanteil, entsprechende Umsetzungshäufigkeit bzw. Belüftungsintensität, geeignete Mietengeometrie, Abdecken von Mieten im Falle hoher Niederschlagsmengen etc.). Laut Ö-NORM S2205 soll bei zwangsbelüfteten Systemen ein Sauerstoffregelungswert von mindestens 14 % des Volumens (gemessen in der Abluft) eingehalten werden, um sauerstoffunterversorgte Bereiche zu vermeiden.

In der Nachrottephase ist die Bildung von Lachgas durch eine reduzierte Umsetzhäufigkeit anzustreben, da durch zu häufiges Umsetzen in der Nachrotte verstärkt Lachgas gebildet und freigesetzt wird.
- Ammoniak in der Abluft geschlossener Anlagen ist vor der Behandlung in Biofiltern weitgehend abzuscheiden, da es im Biofilter durch den Ammoniakabbau teilweise zur Lachgasbildung kommt. Durch ein C:N-Verhältnis zwischen 25:1 und 40:1 werden ein Stickstoff-Überschuss und dadurch verstärkte Ammoniakverluste vermieden.

10 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BHKW	Blockheizkraftwerk
DWW	Druckwasserwäsche
EW	Einwohnerwert
FS	Feuchtsubstanz
KEA	Kumulierter Energieaufwand
NAWARO	Nachwachsende Rohstoffe
NV	Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes
NVS	Nassvergärung mit Separierung des Gärrestes
oK	offene Kompostierung
PSA	Druckwechseladsorption
tgK	teilgeschlossene Kompostierung
THG	Treibhausgas
TS	Trockensubstanz
TVS	Trockenvergärung mit Separierung des Gärrestes

11 LITERATURVERZEICHNIS

- ADEMILUA (2009): Prevention of edible food waste in Lower Austria. Proceedings of the 3rd BOKU Waste Conference 2009. Vienna.
- AEA (2001): siehe SMITH et al 2001
- AMLINGER, F.; PEYR, S.; HILDEBRANDT, U.; MÜSKEN, J.; CUHLS, C. & CLEMENS, J. (2005): Stand der Technik der Kompostierung, Richtlinie des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- ARGE BIOGAS: Multitalent Biogas; Folder der ARGE Kompost und Biogas, 4.11.2011
http://www.kompost-biogas.info/index.php?option=com_rsfiles&Itemid=145
- ARGE KOMPOST/BIOGAS Statistik Kompost; 4.11.2011
http://www.kompost-biogas.info/index.php?option=com_content&task=view&id=193&Itemid=227
- BAIER, U. et al. (2008): Methanverluste bei der Biogasaufbereitung. Studie erstellt von ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, IBT Institut für Biotechnologie und der Fachstelle Umweltbiotechnologie im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE).
- BECK, J. & ADOLPH, J. (2003): Anaerobe Verwertung von Speiseresten zur Energiegewinnung – Erfahrungen in Labor- und Pilotanlagen. Symposium Vergärung biogener Abfälle. <http://www.wien.gv.at/umweltschutz/abfall/pdf/beck.pdf>
- BEKKER, M. (2007): Charakterisierung der anaeroben Abbaubarkeit von spezifischen organischen Stoffen. Dissertation genehmigt von der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH).
- BGK – Bundesgütegemeinschaft Kompost (2008): Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft – Grundlagen der guten fachlichen Praxis. Thema des Abschlussprojektes: Kompostversuche Baden-Württemberg; Abschlussbericht April 2008; Nachfolgeprojekt des Verbund-Forschungsprojektes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Laufzeit 2000–2002); Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg – LTZ (Hrsg.)
- BGK – Bundesgütegemeinschaft Kompost (2008a): Persönliche Mitteilungen der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK). Herr Dr. Kehres zitiert in Cuhls et al. 2008.
- BIDLINGMAIER, W. & MÜSKEN, J. (1995): Biotechnische Verfahren zur Behandlung von Bioabfall. In: Bidlingmaier, W.: BioNet Netzwerk Umweltbiotechnologie, Universität Essen, Essen. <http://www.bionet.net>
- BIOGAS NETZEINSPEISUNG (2010): Gaspermeation mittels Membranen, 12.11.2010
<http://www.biogas-netzeinspeisung.at/technische-planung/aufbereitung/methananreicherung/gaspermeation.html>
- BIFA – Bayerisches Institut für Abfallforschung (1998): Gemeinsame Behandlung von biogenen Abfällen aus Haushalten und Gewerbe am Beispiel der Co-Vergärungsanlage der Fa. Högl in Dietrichsdorf, Lkr. Kelheim“.
- BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2006): Bundesabfallwirtschaftsplan 2006.

- BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2009): Bundesabfallwirtschaftsplan, Statusbericht 2009.
- BMWA – Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (2007): Technische Grundlage für die Beurteilung von Biogasanlagen.
- BRAUN, R. (2003): Prinzipien und Systeme von Vergärungsanlagen für biogene Kommunalabfälle, Symposium Vergärung biogener Abfälle
<http://www.wien.gv.at/umweltschutz/abfall/pdf/braun.pdf>
- BRAUN, R. (2006): Stand der Technik von Biogasanlagen.
- BRAUN, R.; LAABER, M.; MADLENER, R.; BRACHTL, E. & KIRCHMAYR, R. (2007): Aufbau eines Bewertungssystems für Biogasanlagen – „Gütesiegel Biogas“. Energiesysteme der Zukunft – Projektnummer 807742 (Endbericht), Mai 2007.
- CLEMENS, D. (2008): Separation in Trockenfermentationsanlagen.
http://www.treurat-partner.de/fileadmin/user_upload/PDF/Separation_in_Trockenfermentationsanlagen.pdf
- CUHLS, C.; MÄHL, B.; BERKAU, S. & CLEMENS, J. (2008): Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen; Förderkennzeichen: 206 33 326. Im Auftrag des Umweltbundesamt.
- DACHS, G. & REHM, W. (2006): Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zu dessen Reduzierung. Hrsg. Solarenergieförderverein Bayern e. V.; Studien 01.
- EdDE – Entsorgungsgemeinschaft der Deutschen Entsorgungswirtschaft (2009) Widmann, R. et al.: Bewertung der Kohlenstoffeinbindung in Böden durch Kompost. Literaturstudie im Auftrag der Entsorgungsgemeinschaft der Deutschen Entsorgungswirtschaft (EdDE) e.V., Januar 2009 zitiert in (IFEU, ÖI, 2010).
- EDELMANN, W. & SCHLEISS, K. (2001): Ökologischer, energetischer und ökonomischer Vergleich von Vergärung, Kompostierung und Verbrennung fester biogener Abfallstoffe. Im Auftrag von BFE, Bundesamt für Energie und BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- ENERGIE-CONTROL (2010) Ökostrombericht 2010: Bericht der Energie-Control GmbH gemäß § 25 Abs 1 Ökostromgesetz, September 2010.
- EPEA – Environmental Protection Encouragement Agency (2004): Boden-, Ressourcen- und Klimaschutz durch Kompostierung in Deutschland.
http://www.kompost.ch/beratung/xfachartikel/EPEA_2004.pdf
- EPEA – Environmental Protection Encouragement Agency (2008): Ökologisches Leistungsprofil von Verfahren zur Behandlung von biogenen Reststoffen. Kompass für die Entscheidungsfindung vor dem Hintergrund der geplanten Überarbeitung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes. EPEA Internationale Umweltforschung GmbH. Hamburg, April 2008.
- FAL – Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (2005): Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Hrsg. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Gülzow.
- FAL – Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (2007): Biogaserzeugung durch Trockenvergärung von organischen Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen aus der Landwirtschaft; Abschnitt 1: Grundlagen der Trockenfermentation und Darstellung des Standes der Technik.

- FGW – Fachverband Gas Wärme (2010): Bruck an der Leitha; 4.11.2011
<http://www.gaswaerme.at/bbg/themen/?uid=2671>
- FGW – Fachverband Gas Wärme (2010a): Pucking; 4.11.2011
<http://www.gaswaerme.at/bbg/themen/?uid=2669>
- FNR – Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (2004): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung.
- FNR – Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (2009): Biogas Messprogramm II, 61 Biogasanalgen im Vergleich.
- FNR – Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (2010): Trocken-Vergärung.
<http://www.fnr-server.de/cms35/index.php?id=315>
- FRICKE, K.; KUGELSTADT, O. & SCHWARZ, F. (2009): Eignung von Siebresten aus Bioabfallkompostanlagen zur energetischen Verwertung. Müll und Abfall, Ausgabe 12/2009.
- GESSLER, G. & KELLER, K. (1995): Vergleich verschiedener Verfahren zur Vergärung von Bioabfall. Abfallwirtschaftsjournal, (7) 377–383.
- GRASKRAFT (2010): Graskraft Reitbach; <http://www.graskraft-reitbach.at/>
- GRASMUG, M. & BRAUN, R. (2002): Vergärung biogener Abfälle aus Wien – Vergärbarkeit und Verwertbarkeit von Speiseresten und Marktabfällen; Wien, MA 22 und MA 48
- HEIN, T. & SCHNEBLE, H. (2008): Ist die Kompostierung von Bioabfällen noch zeitgemäß? Mit Biogas mehr Energieeffizienz. Institut für Weiterbildung im Beruf der FH Wiesbaden 12.09.2008 Mehrwert mit Abfall – Neue Chancen für Kommunen und Betriebe.
- HOPPENHEIDT, K.; HIRSCH, P.; KOTTMAYER, A.; NORDSIECK, H.; MÜCKE, W.; KÜBLER, H. & NIMMRICHTER, H. (2000): Co-Vergärung von Bioabfällen und organischen Gewerbeabfällen – Ergebnisse eines großtechnischen Pilotvorhabens; VDI-Seminar „Biogenen Abfälle/Holz/Klärschlamm – Verwertung/Behandlung/Beseitigung“ 13.4–15.4 2000, Bamberg. <http://www.bifa.de/download/coverg2.pdf>
- HUPE, K.; HEYER, K.U. & STEGMANN, R. (1997): Biologische Bioabfallverwertung Kompostierung kontra Vergärung.
<http://www.ifas-hamburg.com/pdf/bioabfal.pdf>
- IE – Institut für Energetik und Umwelt GmbH (2007): Biogaserzeugung durch Trockenvergärung von organischen Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen aus der Landwirtschaft – Abschnitt 2: Erhebung der mit Trockenfermentationsverfahren erschließbaren energetischen Potenziale in Deutschland Vergleichende ökonomische und ökologische Analyse landwirtschaftlicher Trockenfermentationsanlagen.
- IFEU, ÖI – Institut für Energie- und Umweltforschung, Öko-Institut e.V. (2010) Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz FKZ 3708 31 302
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): Climate Change – The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge.
- JUNGBLUTH, N.; CHUDACOFF, M.; DAURIAT, A.; DINKEL, F.; DOKA, G.; FAIST EMMENEGGER, M.; GNANSOUNOU, E.; KLJUN, N.; SCHLEISS, K.; SPIELMANN, M.; STETTLER, C. & SUTTER, J. (2007): Life Cycle Inventories of Bioenergy. Ecoinvent report No. 17; Swiss Centre for Life Cycle Inventories; Dübendorf.

- KELM, M. & TAUBE, F. (2007): Energiebilanz der Biogaserzeugung aus Gras- und Maissilage. http://www.lfl.bayern.de/ipz/gruenland/27570/aggf_2007_kelm_taub.pdf
- KERN, M. & RAUSSEN, T. (2005): Energetische Nutzung von Bio- und Grünabfällen; 9. Münsteraner Abfallwirtschaftstage.
- KERN, M. & RAUSSEN, T. (2009): Potenzieller Beitrag der Bioabfallverwertung zur Energieversorgung. http://www.abfallforum.de/downloads/ks_22_kern_raussen.pdf
- KERN M. & TURK, T. (2007): Wirtschaftliche Bewertung von Kompostierungsanlagen hinsichtlich der Integration einer Anaerob-Stufe als Vorschaltanlage. Teilbericht des Projektes „Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland“ FKZ 0327544.
- KERN, M.; RAUSSEN, T.; LOOTSMA, A. & FUNDEN, K. (2008): Vergleichende Verwertung der stofflichen und energetischen Verwertung von Bio- und Grünabfall; 2. Biomasseforum 2008. http://www.abfallforum.de/downloads/biomasse_2008_kern.pdf
- KOHLISCH, G.; OSTHOFF, T.; HOBUS, I. & HANSEN, J. (2010): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen; KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2010 (57) Nr. 10.
- KROGMANN, U. (1994): Kompostierung; Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung. Hamburger Berichte 7. Hrsg. Stegmann, Economica Verlag, Bonn.
- KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2007): Faustzahlen Biogas. Darmstadt.
- LANDWIRTSCHAFTLICHES TECHNOLOGIEZENTRUM AUGUSTENBERG (2008): Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft. Grundlagen der guten fachlichen Praxis.
- LECHNER, P.; LINZNER, R.; MOSTBAUER, P.; BINNER, E. & SMIDT, E. (2005): Klimarelevanz der Kompostierung unter Berücksichtigung der Verfahrenstechnik und Kompostanwendung (KliKo). Endbericht.
- LEHNER, A. & EFFENBERG, M. (2009): Möglichkeiten zur Senkung des Energiebedarfs von Biogasanlagen. In: Gülzower Fachgespräche, Band 32: Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. Tagungsband zum KTBL/FNR-Biogas-Kongress vom 15. bis 16. September 2009 in Weimar.
- LEHNER, A.; EFFENBERGER, M.; KISSEL, R. & GRONAUER, A. (2009): Verfahrenstechnische Kennzahlen der bayerischen Biogas-Pilotbetriebe. In: Neue Perspektiven für Biogas?! Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft.
- LEIBLE, L.; ARLT, A.; FÜRNIß, B.; KÄLBER, S.; KAPLLER, G.; LANGE, S.; NIEKE, E.; RÖSCH, C.; WINTZER, D. (2003): Energie aus biogenen Rest- und Abfallstoffen; Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6882.
- LFL – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2007): Biogashandbuch Bayern – Materialienband
<http://www.lfu.bayern.de/abfall/fachinformationen/biogashandbuch/index.htm>
- LFU BAYERN – Bayerisches Landesamt für Umwelt. (2006): Emissions- und Leistungsverhalten von Biogas-Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit von der Motorwartung. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben (LfU Projekt Nr. 1325).
- LINDTNER, S. (2010): Energieautarke Kläranlage – Wunschtraum oder Wirklichkeit? KA-Betriebs-Info 2010 (40) Nr. 2.

- LOLL, U. (2001): Behandlung von Prozesswässern aus der aeroben und anaeroben Behandlung von organischen Abfällen; Müllhandbuch A5350.
- MAILE (2008): persönliche Mitteilung zitiert in SPRINGER 2009.
- MARGULL, J. & STEGMANN, R. (1996): Stand der Technik bei der Vergärung von Bioabfällen. In: Abfallwirtschaft – quo vadis 1996? Fachtagung 11.–12. Juni 1996. Hrsg.: Haase Energietechnik GmbH, Neumünster, Lübeck, zitiert in: Hupe et al. 1997.
- OECHSNER, H. (2006): Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen und Bauwesen, Universität Hohenheim zitiert in: Biogashandbuch Bayern
- OÖ FERNGAS (2010): Aktuelle Presseaussendung zum download; Hintergrundinformationen; 4.11.2011
http://www.ooeferngas.at/ooefg/news_tipps/aktuell/archive/00879/index.aspx
- ÖWAV – Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (2008): Öffentlicher Bericht ARA 2007.
<http://www.abwasserbenchmarking.at/home/berichte/index.php?PHPSESSID=2f680eb34cf38a0fb45bb>
- PEHNT, M. & VOGT, R. (2007): Biomasse und Effizienz Vorschläge zur Erhöhung der Energieeffizienz von § 8 und § 7-Anlagen im Erneuerbare-Energien-Gesetz. Arbeitspapier Nr. 1 im Rahmen des Projektes „Energiebalance – Optimale Systemlösungen für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz“ in Zusammenarbeit mit dem Projekt „Optimierung für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland“; IFEU Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg.
- PFUNDTNER, E. (2007): Der Sachgerechte Einsatz von Biogasgülle und Gärrückständen im Acker und Grünland. 2. Auflage. Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz beim Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umweltschutz und Wasserwirtschaft, Wien.
- PUCHAS, K.; SCHRAMMEL, H.; KIRCHMEYR, F. & KIRCHMAYR, R. (2008): Optimierungsleitfaden Biogas. Erfahrungsbericht, Maßnahmenempfehlungen und Optimierungspotentiale für Biogasanlagen in Österreich; Projekt im Rahmen der Programmlinie „Energiesysteme der Zukunft“.
- RECYCLINGPORTAL (2010): Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Energieeffiziente Bioabfallverwertung“. Artikel vom 05.03.2010.
<http://www.recyclingportal.eu/artikel/23780.shtml>
- REINHOFFER, M.; LETTMAYER, G. & TAFFNER, K. (2005): Torfersatzprodukte Torfersatz durch biogene Rest- und Abfallstoffe. Vorprojekt Endbericht – Modul B Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Institut für Nachhaltige Techniken und Systeme – JOINTS Forschungsbereich Ökosystemtechnik.
- ROGALSKI, W. (2007): Anaerobe Behandlung biogener Abfälle in Wien. In: Lechner, P. (Hrsg.): Waste matters. Integrating views, 2nd BOKU Waste Conference, facultas.wuv, 19.04.2007, Wien
- SCHLEISS K. (1999): Kompostier- und Vergärungsanlagen im Kanton Zürich – Jahresbericht 1998. Zürcher Daten Service 8090 Zürich.
- SCHLEISS, K. & EDELMANN, W. (2000): Stromproduktion aus Feststoff-Vergärung Ökobilanz. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie und des Biogas Forum.

- SCHMIDT, M. & KEHRES, B. (2009): Positive Energiebilanz durch differenzierte Verwertung. H&K aktuell 09/2009, S. 5–6, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.
- SCHOLZ, V. (2000): Stand und Möglichkeiten der Biogasgewinnung im Land Brandenburg. Leitfaden Biogas 2000.
- SCHULTE-SCHULZE, A. (2006): Aufbereitung und Einspeisung von Biogas. ASUE-Fachtagung am 16. Mai 2006; Augsburg.
http://www.asue.de/images/veroeff_pdf/dr_schulte-schulze_berndt_mai_2006.pdf
[am 22.01.2009](http://www.asue.de/images/veroeff_pdf/dr_schulte-schulze_berndt_mai_2006.pdf)
- SMITH A.; BROWN, K.; OGILVIE, S.; RUSHTON, K. & BATES, J. (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final Report to the European Commission. DG Environment.
- SPRINGER, C. (2009): Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen verschiedener Kompostierungssysteme. Müll und Abfall Ausgabe 11/2009.
- STATISTIK AUSTRIA (2010): Nutzenergieanalyse Energetischer Endverbrauch 2005 bis 2009 nach Energieträgern und Nutzenergiekategorien für Österreich.
- UEC – Umwelt- und Energie-Consult GmbH (2010): Bewertung der vorhandenen Bioabfallbehandlungsstandort in Schleswig Holstein in Hinblick auf eine Ergänzung um Vergärungsstufen.
http://www.bioenergie-portal.info/uploads/media/10-02-28_Studie_Biogabfallverg_%C3%A4rung_S-H.pdf
- UR – Universität Rostock (2007): Experimentelle Untersuchungen zum Biogaspotenzial ausgewählter landwirtschaftlicher Substrate unter speziellen Bedingungen der Trockenfermentation.
- VOGT, R. (2009): Bewertung von energetischer und stofflicher Nutzung von Biomasse sowie Kombinationen. Vergleich verschiedener Verfahren und Ökobilanzierung. In: Biomasse aus Abfällen – Gibt es ein optimales Stoffstrommanagement? Tagungsband LANUV-Fachbericht 18.
- VOGT, R. et al. (2008): Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Verbundprojekt gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Projektträger: Forschungszentrum Jülich F&E-Vorhaben, FKZ: 0327544.
- WEILAND, P. (2001): Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate. VDI-Berichte, Nr. 1620 „Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven“; VDI-Verlag.
- WEILAND, P. (2006): Stand der Technik von Biogasanlagen und aktueller Forschungsbedarf. In: ISH Netzwerk: Internationaler Workshop Biogas: Bioenergie aus Biogasanlagen: Status und Perspektiven. 23.3.2006, Husum, ISH Netzwerk.
- WULF, S. (2003): Untersuchung der Emission direkt und indirekt klimawirksamer Spurengase (NH₃, N₂O und CH₄) während der Lagerung und nach der Ausbringung von Kofermentationsrückständen sowie Entwicklung von Verminderungsstrategien (DBU-AZ 08912). Abschlussbericht.
http://www.ipe.uni-bonn.de/publikationen/bonner-agrikulturchemische-reihe/bar_16.pdf

Rechtsnormen und Leitlinien

Indirekteinleiterverordnung (IEV; BGBl. II Nr. 222/1998 i.d.g.F): Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft betreffend Abwassereinleitungen in wasserrechtlich bewilligte Kanalisationen.

ÖNORM S2205: Technische Anforderungen an Kompostierungsanlagen zur Verarbeitung biogener Abfälle.

ÖWAV-Regelblatt 518: Anforderungen an den Betrieb von Kompostierungsanlagen; Wien 2009.

ÖWAV-Regelblatt 515: Anaerobe Abfallbehandlung; Wien 2005.

12 ANHANG

Tabelle 24: Emissionen, Gutschriften und Salden bei der Nassvergärung mit Separierung des Gärrestes und Strom/Wärmenutzung (in kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial); (Quelle: Umweltbundesamt).

	Biotonne	Speisereste	Marktabfälle	Grünschnitt	MW
Anlieferung/Aufbereitung	6	6	6	6	6
Abpressen	17	17	17	17	17
Methanschluß	12	21	13	16	16
Kompostierung	66	64	66	64	65
Ausbringung	3	3	3	3	3
Gesamtemission	103	111	105	106	106
Düngemittelerzeugung	– 6	– 6	– 6	– 6	– 6
N ₂ O-Handelsdüngeraufbringung	– 2	– 2	– 2	– 2	– 2
C-Bindung Boden	– 11	– 11	– 11	– 11	– 11
Strom	– 29	– 79	– 34	– 53	– 49
50 % Wärmenutzung	– 21	– 41	– 24	– 33	– 30
100 % Wärmenutzung	– 58	– 111	– 65	– 88	– 80
Gesamtgutschrift nur Strom	– 48	– 97	– 53	– 72	– 68
Gesamtgutschrift Strom + 50 % Wärme	– 70	– 138	– 77	– 105	– 97
Gesamtgutschrift Strom + 100 % Wärme	– 106	– 208	– 118	– 160	– 148
Saldo nur Strom	55	13	52	34	38
Saldo Strom + 50 % Wärme	33	– 28	28	1	9
Saldo Strom + 100 % Wärme	– 3	– 97	– 13	– 54	– 42

Tabelle 25: Emissionen, Gutschriften und Salden bei der Nassvergärung mit Separierung des Gärrestes und Biomethanerzeugung (in kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial); (Quelle: Umweltbundesamt).

	Biotonne	Speisereste	Marktabfälle	Grünschnitt	MW
Anlieferung Aufbereitung	6	6	6	6	6
Abpressen	17	17	17	17	17
CH ₄ -Verlust Gasaufbereitung	20	37	22	29	27
Prozessenergie Strom	11	11	11	11	11
Strom für Gasaufbereitung	11	17	11	15	14
Kompostierung	66	64	66	64	65
Ausbringung	3	3	3	3	3
Gesamtemission	133	154	136	144	142
Düngemittelerzeugung	– 6	– 6	– 6	– 6	– 6
N ₂ O-Handelsdüngeraufbringung	– 2	– 2	– 2	– 2	– 2
C-Bindung Boden	– 11	– 11	– 11	– 11	– 11
Erdgassubstitution	– 144	– 266	– 158	– 206	– 193
Gesamtgutschrift	– 163	– 285	– 177	– 225	– 212
Saldo	– 30	– 131	– 41	– 81	– 71

Tabelle 26: Emissionen, Gutschriften und Salden bei der Trockenvergärung mit Separierung des Gärrestes und Strom/Wärmenutzung (in kg CO₂-eq/t Ausgangsmaterial).

	Biotonne	Speisereste	Marktabfälle	Grünschnitt	MW
Anlieferung/Aufbereitung	6	6	6	6	6
Abpressen	17	17	17	17	17
Methanschluß	12	21	13	16	16
Kompostierung	66	64	66	64	65
Ausbringung	3	3	3	3	3
Gesamtemission	103	111	105	106	106
Düngemittelerzeugung	– 6	– 6	– 6	– 6	– 6
N ₂ O-Handelsdüngeraufbringung	– 2	– 2	– 2	– 2	– 2
C-Bindung Boden	– 11	– 11	– 11	– 11	– 11
Strom	– 29	– 79	– 34	– 53	– 49
50 % Wärmenutzung	– 24	– 43	– 26	– 35	– 32
100 % Wärmenutzung	– 63	– 116	– 70	– 94	– 86
Gesamtgutschrift nur Strom	– 48	– 97	– 53	– 72	– 68
Gesamtgutschrift Strom + 50 % Wärme	– 72	– 141	– 79	– 107	– 100
Gesamtgutschrift Strom + 100 % Wärme	– 112	– 214	– 123	– 166	– 154
Saldo nur Strom	55	13	52	34	38
Saldo Strom + 50 % Wärme	31	– 30	26	– 1	7
Saldo Strom + 100 % Wärme	– 9	– 103	– 19	– 60	– 48

Tabelle 27: Emissionen, Gutschriften und Salden bei der Trockenvergärung mit Separierung des Gärrestes und Biomethanerzeugung (in kg CO₂-eq/t Ausgangsmaterial).

	Biotonne	Speisereste	Marktabfälle	Grünschnitt	MW
Anlieferung Aufbereitung	6	6	6	6	6
Abpressen	17	17	17	17	17
CH₄-Verlust Gasaufbereitung	21	38	23	30	28
Prozessenergie Strom	11	11	11	11	11
Strom für Gasaufbereitung	11	17	11	15	14
Kompostierung	66	64	66	64	65
Ausbringung	3	3	3	3	3
Gesamtemission	134	155	136	145	143
Düngemittelerzeugung	– 6	– 6	– 6	– 6	– 6
N ₂ O-Handelsdüngeraufbringung	– 2	– 2	– 2	– 2	– 2
C-Bindung Boden	– 11	– 11	– 11	– 11	– 11
Erdgassubstitution	– 150	– 272	– 164	– 211	– 199
Gesamtgutschrift	– 169	– 291	– 183	– 230	– 218
Saldo	– 34	– 135	– 46	– 86	– 75

Tabelle 28: Emissionen, Gutschriften und Salden bei der Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes und Strom/Wärmenutzung (in kg CO₂-eq/t Ausgangsmaterial).

	Biotonne	Speisereste	Marktabfälle	Grünschnitt	MW
Anlieferung/Aufbereitung	6	6	6	6	6
Methanschluß	12	21	13	16	16
Ausbringung	26	26	26	26	26
Emiss Gärrestlager, 2 %	24	43	26	32	31
Emiss Gärrestlager, 5 %	59	107	64	81	78
Emiss Gärrestlager, 10 %	119	214	129	162	156
Gesamtemission 2 %	67	96	70	80	78
Gesamtemission 5 %	103	160	109	129	125
Gesamtemission 10 %	162	267	173	210	203
Düngemittelerzeugung	– 21	– 21	– 21	– 21	– 21
N₂O-Handelsdüngeraufbringung	– 10	– 10	– 10	– 10	– 10
C-Bindung Boden	– 13	– 13	– 13	– 13	– 13
Strom	– 40	– 87	– 45	– 61	– 58
50 % Wärmenutzung	– 21	– 41	– 24	– 33	– 30
100 % Wärmenutzung	– 58	– 111	– 65	– 88	– 80
Gesamtgutschrift nur Strom	– 85	– 131	– 89	– 106	– 103
Gesamtgutschrift Strom + 50 % Wärme	– 106	– 172	– 113	– 138	– 132
Gesamtgutschrift Strom + 100 % Wärme	– 142	– 242	– 154	– 194	– 183
Saldo 2 % Em. nur Strom	– 17	– 35	– 19	– 25	– 24
Saldo 2 % Em. Strom, 50 % Wärme	– 39	– 76	– 43	– 58	– 54
Saldo 2 % Em. Strom, 100 % Wärme	– 75	– 146	– 84	– 114	– 105
Saldo 5 % Em. nur Strom	18	29	19	23	22
Saldo 5 % Em. Strom, 50 % Wärme	– 3	– 12	– 5	– 9	– 7
Saldo 5 % Em. Strom, 100 % Wärme	– 40	– 81	– 45	– 65	– 58
Saldo 10 % Em. nur Strom	78	136	84	104	100
Saldo 10 % Em. Strom, 50 % Wärme	56	95	60	72	71
Saldo 10 % Em. Strom, 100 % Wärme	20	26	19	16	20

Tabelle 29: Emissionen, Gutschriften und Salden bei der Nassvergärung ohne Separierung des Gärrestes und Biomethanerzeugung (in kg CO_{2-eq}/t Ausgangsmaterial).

	Biotonne	Speisereste	Marktabfälle	Grünschnitt	MW
Anlieferung/Aufbereitung	6	6	6	6	6
CH ₄ -Verlust Gasaufbereitung	20	37	22	29	27
Prozessenergie Strom	11	11	11	11	11
Strom für Gasaufbereitung	11	17	11	15	14
Emission Gärrestlager, 2 %	24	43	26	32	31
Emission Gärrestlager, 5 %	59	107	64	81	78
Emission Gärrestlager, 10 %	119	214	129	162	156
Gesamtemission 2 %	72	114	76	93	89
Gesamtemission 5 %	107	178	114	142	135
Gesamtemission 10 %	167	285	179	223	213
Düngemittelerzeugung	– 21	– 21	– 21	– 21	– 21
N ₂ O-Handelsdüngeraufbringung	– 10	– 10	– 10	– 10	– 10
C-Bindung Boden	– 13	– 13	– 13	– 13	– 13
Erdgassubstitution	– 144	– 266	– 158	– 206	– 193
Gesamtgutschrift	– 188	– 310	– 202	– 250	– 238
Saldo Emission 2 %	– 117	– 196	– 127	– 157	– 149
Saldo Emission 5 %	– 81	– 132	– 88	– 108	– 102
Saldo Emission 10 %	– 22	– 25	– 24	– 27	– 24

Umweltbundesamt GmbH

Spittelauer Lände 5
1090 Wien/Österreich

Tel.: +43-(0)1-313 04
Fax: +43-(0)1-313 04/5400

office@umweltbundesamt.at
www.umweltbundesamt.at

Im Report des Umweltbundesamt werden die Kompostierung und Vergärung von biogenen Abfällen in Hinblick auf Klimarelevanz und Energieeffizienz verglichen. Dabei werden Treibhausgasbilanzen für die offene und die teilgeschlossene Kompostierung sowie die Nass- und Trockenvergärung berechnet.

Bei den Vergärungsverfahren werden verschiedene Varianten der Gärrestbehandlung sowie unterschiedliche Nutzungen des erzeugten Biogases (Stromerzeugung, Wärmenutzung, Biomethanerzeugung) untersucht.

Kompostierung weist eine schlechtere Treibhausgasbilanz als Vergärung auf. Die Treibhausgasbilanzen der Vergärungsvarianten unterscheiden sich je nach Abfall sehr stark. Die besten Bilanzen werden bei der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan erzielt. Offene Gärrestlager können zu hohen Treibhausgasemissionen führen und sollten deshalb gasdicht abgedeckt werden.