



**Bundesamt für Energie**  
**Office fédéral de l'énergie**  
**Ufficio federale dell'energia**  
**Swiss Federal Office of Energy**

---

Programm Biomasse

# **Stromproduktion aus Feststoff-Vergärung**

## **Ökobilanz**

### **Schlussbericht**

Projekt Nr.: 30 703

Vertrags Nr.: 70 620

---

ausgearbeitet durch

**Konrad Schleiss, Umwelt- und Kompostberatung,  
Eschenweg 4, 6340 Baar**

**Werner Edelmann, arbi GmbH, Unterdorf, 8933 Maschwanden**

im Auftrag des

**Bundesamtes für Energie  
und des Biogas Forum**

---

Januar 2000

Schlussbericht

---

# Ökobilanz zur Stromproduktion aus der Vergärung

## Zusammenfassung

Im neu liberalisierten Strommarkt haben die Kunden die Wahlmöglichkeit zwischen verschiedenen Stromangeboten, unter anderen wird dabei auch Ökostrom angeboten. Bisher wurde Ökostrom vor allem aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen gewonnen. In Zukunft möchten auch die Stromproduzenten aus der Feststoffvergärung ihren Strom unter dem Ökostromlabel vermarkten. Die vorliegende Untersuchung liefert Grundlagen zur Beurteilung der Frage, ob der Strom aus der Vergärung die Bedingungen des Ökostromlabels erfüllt.

Drei Vergärungsverfahren werden mit zwei Kompostierverfahren bezüglich ihrer Umweltaspekte verglichen. Die funktionelle Einheit für die Stromproduktion ist 1 kWh produzierter Strom, im Vergleich mit der Kompostierung 1 kg Grüngutverarbeitung. Die betrachteten Verfahren stammen von verschiedenen Herstellern, bei den Vergärverfahren werden unterschiedliche Anteile des Grünguts vergärt. Die maximale Vergärungsvariante geht von 100% Vergärung aus, die mittlere von 60% und die dritte von 40%, während die Kompostieranlagen 0% vergären. Die Abfallzusammensetzung wird einheitlich definiert (35% Trockensubstanz, 70% organische Substanz) und der biologisch abgebaute Anteil wird für alle Verfahren mit 55% angenommen.

Im Vergleich der Vergärung mit der Kompostierung weisen die Gäranlagen Vorteile bezüglich der energiebezogenen Aspekte vor. Die offene Kompostierung zeigt etwas tiefere Methanemissionen und die geschlossene Kompostieranlage die tiefsten Ammoniakemissionen. Zwischen den Vergärungsanlagen wird meistens die maximale Vergärungsvariante favorisiert.

Im Vergleich mit dem „technischen“ Photovoltaik- und Windenergiestrom fallen bei der Vergärung mehr „biologische“ Emissionen wie Methan, Ammoniak und Stickoxid auf. Dagegen wird sehr wenig treibhausaktives CO<sub>2</sub> emittiert, weil die Herkunft des Kohlenstoffes als gespeicherte Sonnenenergie in den Pflanzen biogen und nicht fossil ist. Bei der Biogasverwertung muss allerdings auf gut eingestellte Motoren mit Katalysator und sehr kleine Fackelverluste geachtet werden.

Die Resultate werden auch mit den Bewertungsmethoden Ecoindicator 95<sup>RF</sup> (EI95<sup>RF</sup>) und Umweltbelastungspunkte (UBP) dargestellt. Die Ergebnisse der Photovoltaik und Windenergie liegen bisher nur in Form von Sachbilanzen vor, wodurch es schwierig ist, die Werte von verschiedenen Emissionen miteinander zu vergleichen. Mit der Bewertung mit EI und UBP ist es möglich, die verschiedenen Stärken und Schwächen aus der Sachbilanz auf einer einheitlichen Skala miteinander zu vergleichen. Weil die Bedingungen für das Ökostromlabel noch nicht klar definiert sind, lässt sich zurzeit nicht entscheiden, welche der Vergärungsvarianten als ökostromtauglich gelten. Es wird Aufgabe der Zertifizierungsstelle für das Ökostromlabel sein, die genauen Bedingungen für das Label zu formulieren, damit sich die Produzenten in Zukunft an klaren Vorgaben messen können.

### **Life cycle analysis:**

### **Electricity production from biogas**

## Summary

As a result of the liberalisation of the electricity market clients have the opportunity to choose between different providers and qualities of products. One of it is "eco-power" sold in Switzerland under the brand name "naturemade star". Biogas from the digestion of source separated MSW is a potential energy source to produce naturemade star. The goal of the present study was to evaluate under which preconditions biogas from biowaste can fulfil the criteria set by the mentioned label.

The LCA's of three different systems of biowaste digestion have been compared to two types of composting plants (windrow and hallcomposting). The calculation was based on the production of 1 kWh of electricity. For the comparison with composting - which is an energy utiliser - 1 kg of biowaste was taken as a unit. Usually digestion is followed by a short aerobic post-treatment. In some installations only a part of the biowaste, i.e. the wetter, protein-rich fraction, is digested whereas the lignin-rich fraction is composted. All calculations were based on real installations however, it was assumed that the same amount of waste with an identical composition was treated (35% dry matter, 70% volatile solids, degradation rate 55%). The three anaerobic/aerobic systems digest 100%, 60% and 30% of the waste respectively. Composting includes only aerobic treatment.

All to the anaerobic systems are favoured when it comes to energy production whereas the windrow composting has lower methane emissions and the indoor composting decreased ammonia emissions.

Compared to electricity from PV and wind, biogas has higher emissions of methane, ammonia and  $\text{NO}_x$ , whereas  $\text{CO}_2$  is far lower thanks to the recycling into plant material. However, it is important to optimise CHP with respect to flue gas emissions.

Beside the direct comparison of the possible pollutants between the five technical solutions an overall LCA has been calculated by two different methods, Ecoindicator 95 and a point system (UBP) developed by BUWAL.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft und des Biogas Forum entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich

# Inhaltsverzeichnis

<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>5</b>
<b><u>1. EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG</u></b>	<b>6</b>
<b><u>2. SYSTEMABGRENZUNG, FUNKTIONELLE EINHEIT, ANNAHMEN</u></b>	<b>7</b>
<b><u>2.1 Systemgrenzen</u></b>	<b>7</b>
<b><u>2.2 Allokationen</u></b>	<b>7</b>
<b><u>2.3 Funktionelle Einheit</u></b>	<b>8</b>
<b><u>2.4 Umschreibung der untersuchten Verfahren</u></b>	<b>8</b>
<b><u>2.5 Herstellung der Anlagen</u></b>	<b>14</b>
<b><u>2.6 Modul 10000 t Grüngut frei Anlage</u></b>	<b>16</b>
<b><u>2.7 Annahmen zum biologischen Abbau (Abbaumodell)</u></b>	<b>17</b>
<b><u>2.8 Betriebsmittelbedarf und –emissionen</u></b>	<b>20</b>
<b><u>2.9 Modulverknüpfungen</u></b>	<b>24</b>
<b><u>2.10 Vorgehen bei der Allokation</u></b>	<b>25</b>
<b><u>3. RESULTATE IN DER SACHBILANZ</u></b>	<b>27</b>
<b><u>3.1 Zusammengefasste Ergebnisse der Sachbilanz</u></b>	<b>27</b>
<b><u>3.2 Ausgewählte Resultate pro kg Kompost und pro 0,1 MJ Strom in den 5 Varianten alloziert</u></b>	<b>30</b>
<b><u>3.3 Bewertungen mit Ecoindicator und Umweltbelastungspunkten (UBP)</u></b>	<b>37</b>
<b><u>4. QUALITÄT DER DATEN UND UNSICHERHEITEN</u></b>	<b>42</b>
<b><u>5. LITERATUR UND QUELLEN</u></b>	<b>44</b>
<b><u>ANHANG</u></b>	<b>47</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (früher AGW)
BfE	Bundesamt für Energiewirtschaft (früher BEW)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
C	Kohlenstoff
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
COD	Chemical oxygen demand = CSB Chemischer Sauerstoffbedarf
EI	Ecoindicator (Bewertungsmethode für Ökobilanzen)
HMT	Heissmischteer
Infra	Infrastruktur
KBq	Kilobecquerel (Mass für radioaktive Strahlung)
KG	Kompostierung eingehaust (geschlossen)
kg	Kilogramm
KO	Kompostierung offen (im Freien) mit Rotteboxen
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
KWh	Kilowattstunde (kWel = kW elektrisch)
MJ	Megajoule
NMVOC	Non-methane volatile organic carbon (flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen mit Ausnahme von Methan)
OS	Organische Substanz
T/a	Tonne pro Jahr (annum = lateinisch)
TS	Trockensubstanz
UBP	Umweltbelastungspunkte nach BUWAL (1998)
UBP	Umweltbelastungspunkte (Bewertungsmethode für Ökobilanzen)
UCPTE	Union pour la Coordination de la production et du transport de l'électricité (europäischer Stromverbund)
VG	40% Vergärung mit eingehauster Nachrotte
VN	100% Vergärung, maximaler Anteil
VO	60% Vergärung mit offener Nachrotte

Eine Excel-Tabelle mit den betrachteten Emissionsdaten kann beim Autor bezogen werden.

## **1. Einleitung und Fragestellung**

Initiative und umweltbewusste Strombezüger haben sich bereit erklärt, für ausgewiesenen ökologisch produzierten Strom einen bedeutend höheren Preis zu bezahlen. Bisher wird ausschliesslich Strom von Solaranlagen und von Windenergieanlagen unter der Bezeichnung Ökostrom vermarktet. Die Nachfrage nach solchem Strom ist grösser als das Angebot. Dadurch werden für die Erweiterung des Angebotes noch weitere Produktionsarten gesucht, welche die Anforderungen ebenfalls erfüllen können. Gleichzeitig ist das Ökostromlabel für die Stromproduzenten auch interessant, weil ein bedeutend höherer Preis pro kWh bezahlt wird. Bisher gilt das Vorhandensein einer Ökobilanz als Vorbedingung für diese Vermarktung (Grasser 1999). Weitere Aspekte sollen im Verlauf des Jahres 2000 definiert werden.

### **Fragestellung**

Welche Emissionen fallen bei der Feststoffvergärung pro produzierte kWh Strom an? Was sind die wichtigsten Emissionen aus der Vergärung im Vergleich mit der Kompostierung? Kann der Strom aus der Vergärung von festen, separat gesammelten Bioabfällen die Bedingungen für Ökostrom erfüllen und allenfalls unter welchen Bedingungen? Mit dieser Untersuchung sollen die Grundlagen geschaffen werden, mit denen über die Erteilung des Labels entschieden werden kann.

Praktisch der ganze Infrastrukturteil der Untersuchung stützt sich auf die Studie „Ökologischer, energetischer und ökonomischer Vergleich zwischen Kompostierung, Vergärung und Kehrlichtverbrennung“, die im Auftrag von BFE und BUWAL seit 1997 erarbeitet worden ist (Edelmann und Schleiss 1999).

## 2. Systemabgrenzung, funktionelle Einheit, Annahmen

### 2.1 Systemgrenzen

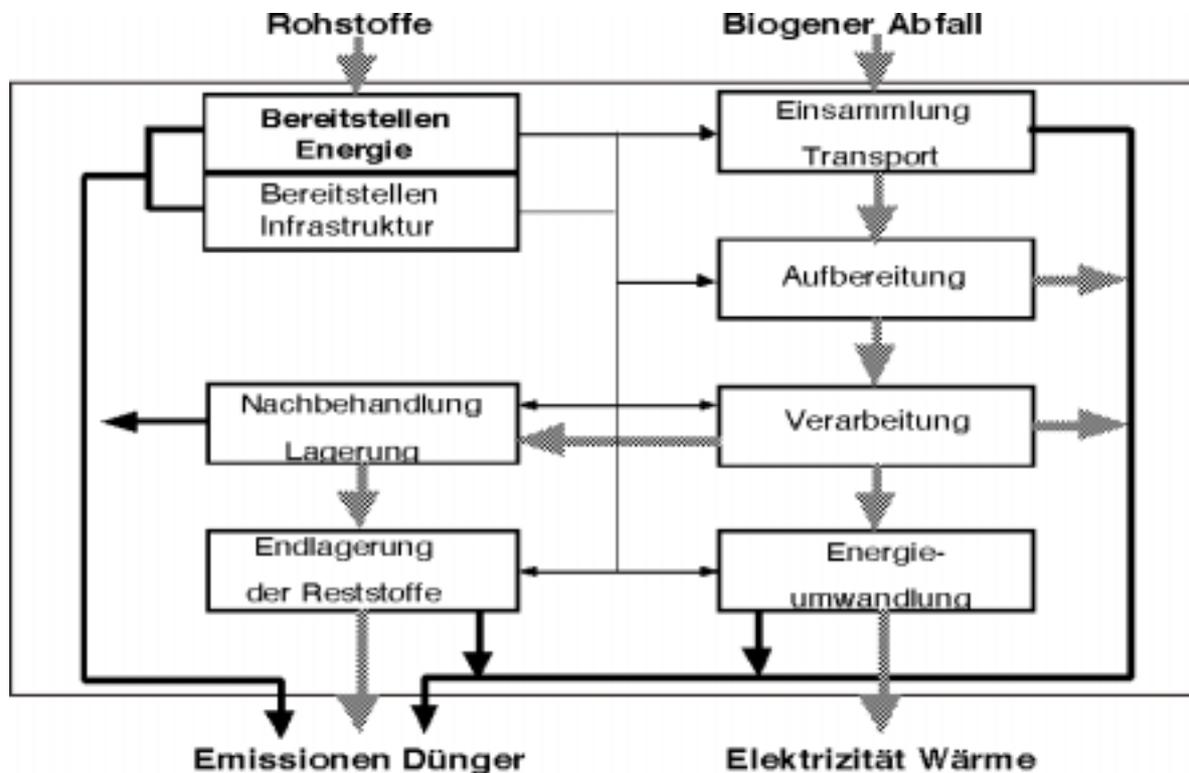


Abb. 1: Systemgrenzen des betrachteten Prozesses

Die Systemgrenzen liegen auf der Abfallseite bei der Einsammlung (Beladung der Kehrlichfahrzeuge), auf der Kompostseite liegt die Grenze beim Verlassen der Kompostieranlage (geladen für den Abtransport, aber ohne Ausbringung). Die Einsammlung wird für alle Verfahren zu 60% mit Kehrlichfahrzeugen berechnet, der Transport der Direktanlieferer wird den Gewerbe- und Gartenbaubetrieben alloziert. Für den Asphaltbelag wird bei allen Verfahren pro Quadratmeter der gleiche Aufbau bilanziert, der Materialverbrauch für Hallen, Bauten und Abwasserbecken basiert auf den Angaben der Betriebe und Hersteller.

### 2.2 Allokationen

Innerhalb der Systemgrenzen liegt die kommunale Einsammlung der Bioabfälle, jedoch nicht die Direktanlieferung der Gartenbauer und Gewerbebetriebe. Deren Transporte werden dem gärtnerischen oder dem gewerblichen Prozess angelastet. Die Nährstoffe des Kompostes werden als Düngerersatz, die Schwermetalle als Emissionen in Boden eingerechnet, nicht inbegriffen ist jedoch die Düngerausbringung. Diese wird dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau alloziert, da andere Düngemittel auch ausgebracht werden müssten. Weiter unten unter 2.10 wird das

Vorgehen zur Allokation zwischen Kompost und Strom vertieft dargestellt. Wärme wird unter den gewählten Bedingungen nicht verkauft, deshalb wird Wärme hier nicht alloziert.

## 2.3 Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit wird 10'000 t Grünabfall (60% aus kommunaler Sammlung, 40% aus direkter Anlieferung) gleicher Zusammensetzung definiert. Die Zusammensetzung wurde für das BFE/BUWAL-Projekt für 40% Trockensubstanz bestimmt (Edelmann und Schleiss 1999). Weil der hier untersuchte Abfall vor allem für die Vergärung geeignet sein soll, wurde eine tiefere Trockensubstanz von 35% und eine höhere organische Substanz (70% gegenüber 66%) gewählt. Die Nährstoff- und Spurenelementgehalte wurden linear von 40% auf 35% Trockensubstanz heruntergerechnet.

Die Zusammensetzung der Abfallfraktion wird in der elementaren Zusammensetzung definiert (Anhang 1). Diese Abfall-Zusammensetzung wurde mit dem Softwaretool von Zimmermann et al. (1996, Version Juni 1998) errechnet. Angaben zum Wasser- und organischen Substanzgehalt stammen von arbi (1998), Krogmann U. (1994) und vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (Gronauer et al. 1997). Die Prozentanteile von verschiedenen Elementen stammen aus den Daten von Kehres (1991) und Krogmann (1994). Bei den am häufigsten untersuchten Elementen (P, K, Ca, Mg, Cd, Cu, Pb, Ni, Cr und Zn) wurde von grossen Analysesätzen (AWEL 1991 - 1998) von Kompost auf die Abfallzusammensetzung hochgerechnet.

## 2.4 Umschreibung der untersuchten Verfahren

In der Untersuchung wird angenommen, dass der Anteil der lokalen Kompostierung bei allen Verfahren ähnlich hoch und dadurch für diese Betrachtung vernachlässigbar ist. Damit steht für alle verglichenen Verfahren eine gleich grosse Grüngutmenge gleicher Zusammensetzung zur Diskussion. Falls also das biogene Material nicht auf den Kompostier- und Vergärungsanlagen verarbeitet wird, wird es in einer Kehrichtverbrennungsanlage verbrannt, die dem heutigen schweizerischen Durchschnitt entspricht (Zimmermann et al. 1996, S.86). Weil jedoch mit der angenommenen Abfallzusammensetzung bei 35% Trockensubstanz in der KVA kein Stromüberschuss mehr entsteht, wird die KVA in dieser Untersuchung nicht weiter verfolgt (Berechnungen nach Zimmermann et al.). Folgende fünf Anlagentypen werden im Detail verglichen und beschrieben:

Betriebssystem	Typ	Abk.
Voll geschlossene (eingehauste), automatisierte Kompostierung	Komp.	KG

Offene Kompostierung in gedeckten Rotteboxen und auf offenen Mieten	Komp.	KO
Thermophile, einstufige Vergärung mit eingehauster Nachrotte	Verg.	VN
Kombination von einstufiger Vergärung mit eingehauster Kompostierung	Verg.	VG
Kombination von zweistufiger Vergärung mit offener Kompostierung	Verg.	VO

***KG: Geschlossene (eingehauste), automatisierte Kompostierung***

Bei der geschlossenen, automatisierten Kompostierung findet der ganze Prozess von der Anlieferung, der Zerkleinerung und Mischung bis ans Ende der Intensivrotte in einer voll geschlossenen Halle statt. Automatisiert ist vor allem die Arbeit in der Rottehalle, damit möglichst wenig menschliche Arbeit im feuchtheissen Klima geleistet werden muss. Bei der hier untersuchten Kanalrotte ist das biogene Material in der Halle auf Höhen von 2-3 Metern aufgeschichtet und durch Trennwände im Längsverlauf der Halle in mehrere Kanäle unterteilt. Durch einen automatischen Umsetzer, welcher sich auf den beiden seitlichen Trennwänden des bearbeiteten Kanals vorwärtsbewegt, wird das Kompostiergut gemischt. Durch den Umsetzprozess wird das Rottegut im Verlauf der Rotte vom Eintragsende Richtung Austragsende des Kanals transportiert. Das Material durchläuft dabei die Intensivrottephase. Sämtliche Abgase der Rottehalle und des Eintragsbereichs werden abgesaugt und durch einen Biofilter gereinigt. Der aus der Halle ausgetragene Kompost wird in einer offenen Halle gelagert, bis er an die Verbraucher abgegeben wird.

Die vielen baulichen Einrichtungen mit den Rottekanälen, den automatisierten Schritten zum Transport und der Umschichtung verlangen sehr grosse Mengen Baumaterialien, armierten Beton vor allem, aber auch Maschinenstahl und Holz. Zusätzlich werden vor allem für die intensive Belüftung und Entlüftung der Halle beim Betrieb sehr grosse Strommengen benötigt.

Lieferant der untersuchten Anlage war IPS. Ähnliche Anlagen werden z.B. durch die Firma SUTCO (Biofix) vor allem in Deutschland erstellt. Vergleichbar, jedoch ohne Unterteilung in Kanäle, läuft die Kompostierung in der Wandertafelmiete (z.B. System Wendelin-BÜHLER) ab.

***Datenerhebung bei KEWU AG, Krauchthal (BE) (KEWU 1993)***

Die Anlage KEWU in Krauchthal verarbeitet biogene Abfälle aus der Region Bern. Die Verarbeitungskapazität der Anlage beträgt 12'000 t/a. Beim Bau der Anlage wurde teilweise auf bereits vorhandene Infrastruktur der früheren Kehrriechkompostierung zurückgegriffen. Der hohe Automatisierungsgrad der Anlage ermöglicht es, dass sich das Personal nur relativ selten in der Rottehalle aufhalten muss. Die erwärmte und mit Wasserdampf weitgehend gesättigte Abluft aus der Rottehalle wird über zwei Kompostbiofilter gereinigt. Das Kompostsickerwasser wird zur Kompensation des verdunsteten Wassers für die Mietenbewässerung eingesetzt. Die Anlage wurde aus Geruchsemissionsgründen eingehaust und mit Biofiltern ausgerüstet. Das Geruchsproblem scheint seither gelöst.

### **KO: Offene Kompostierung mit Rotteboxen**

Bei der offenen Kompostierung entweicht die Abluft auch während der Intensivrotte direkt in die Umgebung. Die Kompostierung verläuft zuerst in einer belüfteten, überdachten Rottebox mit 2,5 bis 3m Höhe und wird auf einem befestigten Platz unter freiem Himmel abgeschlossen. Die rund 1,5 Meter hohen Mieten werden meist mit einem luftdurchlässigen, wasserabstossenden Kunststoff-Vlies abgedeckt. Reifkompost wird unter Belüftung in einer offenen Halle gelagert. In der vorliegenden Studie wurde die Kombination von Rotteboxen mit Kleinmieten betrachtet. In der Praxis wird in der Rottebox nur Frischkompost und auf den Kleinmieten meistens nur Reifkompost produziert.

Durch die kleinen Mieten verlangt die OK am meisten Fläche mit Asphaltierung, gleichzeitig aber wenig Material für Hochbauten und auch wenig Strom für den Betrieb. Hingegen sind zeitweise Geruchsemissionen an der Tagesordnung.

#### *Datenerhebung bei Gerber Gemüsebau, Fehraltorf (Kt. ZH)*

Die Firma Gerber in Fehraltorf ist im Hauptgewerbe Gemüseproduzent. In Treibhäusern werden teilweise auf eigenen Komposten und Substraten Jungpflanzen und Setzlinge grossgezogen. Deshalb wird hier der Kompostqualität ein spezielles Augenmerk geschenkt. Auf einem asphaltierten Platz mit Sickerwassererfassung werden die Abfälle des Gemüsebetriebs z.T. mit weiteren biogenen Abfällen in Dreieckmieten von rund 1,5 m Höhe kompostiert. Die Mieten werden in Abhängigkeit von Temperatur und des CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Gehalts der Rottegase (bzw. des Rottestadiums) speziell in der ersten Rottephasen sehr häufig umgesetzt. Sie werden mit einem semipermeablen Vlies als Schutz gegen die Niederschläge abgedeckt. Die Umsetzmaschine, welche in Längsrichtung über die Mieten fährt, ist für eine allfällige Befeuchtung des Komposts ausgerüstet.

Neben den Kleinmieten befinden sich 8 überdachte Rotteboxen à 240 m<sup>3</sup> Inhalt (Hersteller Firma COMPAG AG, Gossau SG), welche in regelmässigen Intervallen belüftet und durch einen Spiralmischer durchmischt werden. Hier durchläuft Bioabfall, welcher aus den Gemeinden der Region stammt, die Intensivrotte. Die Verarbeitungskapazität der Anlage beträgt rund 6'000 t/a.

### **VN: Thermophile, einstufige Vergärung mit Nachrotte**

Die thermophile, einstufige Feststoffvergärung findet in geschlossenen Räumen mit Abluftreinigung über einen Biofilter statt. Die Anlieferung erfolgt in einen Tiefbunker. Das Material wird nach der Zerkleinerung, dem Aussortieren der Störstoffe und einer Lagerung in einem Zwischenbunker einem voll geschlossenen Behälter unter Luftabschluss dem anaeroben Abbau zugeführt. Die thermophile Vergärung läuft bei einer Temperatur um 55°C ab. Im untersuchten Fall handelt es sich um einen Pfropfstromprozess, bei welchem das Material stirnseitig in einen liegenden Zylinder eintritt, diesen (als Pfropfen) durchläuft und auf der andern Seite wieder austritt. Das austretende Gärgut wird abgepresst, der Feststoff wird nachgerottet. Mit der

abgepressten Flüssigkeit wird das Frischmaterial auf rund 25% Trockensubstanz verdünnt und gleichzeitig mit Bakterien angeimpft, die restliche Menge kann zur Bewässerung der Nachrotte verwendet werden. Ein Teil wird auch als Flüssigdünger (Presswasser) in der Landwirtschaft ausgebracht (Schleiss 1998). Im Jahr 1998 wurden 4400 m<sup>3</sup> Presswasser, die rund 4400 t wiegen, im Vergleich zu rund 7'500 t Kompost von Kompostgas-Anlagen abgegeben (Schleiss 1999).

Das entstehende Biogas wird in einer Wärme-Kraft-Kopplung in Strom und Wärme, oder auf speziell ausgerüsteten Anlagen auch in Treibstoff für Motorfahrzeuge, umgewandelt. Nach der Vergärung wird das abgepresste Gärgut noch während einigen Wochen aerob nachgerottet, bevor es als Kompost hauptsächlich in die Landwirtschaft abgegeben wird.

Obwohl Holz von den anaeroben Bakterien nicht vergoren werden kann, stört es den Gärprozess nicht, wenn man von der Beanspruchung von Gärvolumen absieht. Dünnere Äste mit Blattwerk können daher problemlos zerkleinert und mitvergoren werden. Stark verholztes Material wird vor der Vergärung ausgeschieden, um als Holzschnitzel für gärtnerische Zwecke oder als Beigabe für die Nachrotte eingesetzt zu werden. Stark verholztes Material könnte auch zu Energieschnitzeln aufbereitet werden, was hier aber nicht betrachtet wird. Alle Maschinen in der Anlage sind strombetrieben, nur der Pneulader zum Verladen des Kompostes hat einen Dieselmotor.

### ***Datenerhebung bei KOMPOGAS FURTTAL-LIMMATTAL AG, Otelfingen (Kt. ZH)***

Die KOMPOGAS-Anlagen zeichnen sich durch liegende, zylindrische Gärbehälter aus, welche radial durchmischbar sind. Die Verarbeitungskapazität der Anlagen beträgt 10'000 t/a. Der gesamte Gebäudekomplex steht unter leichtem Unterdruck und die abgezogene Abluft wird über Biowäscher/Biofilter gereinigt.

Weil auf den bestehenden Kompostgasanlagen meistens Material mit tieferen Trockensubstanzgehalten als 40% verarbeitet werden, weisen die Anlagen häufig einen Wasserüberschuss auf. Auf der Anlage Otelfingen sind noch speziell verschiedenste Optionen zur Verwertung von überschüssigem Presswasser eingerichtet worden: Einerseits wird das noch nährstoffreiche Presswasser von Landwirten aus der Umgebung zur Düngung der Felder verwendet, wie dies auch auf anderen Kompostgasanlagen noch üblich ist. Andererseits ist eine Anlage zur Presswasserreinigung auf Reinwasserqualität mit Umkehrosmose und allfällig vorgeschalteter Nitrifizierung/Denitrifizierung vorhanden. Als weitere Option ist kürzlich eine Anlage in Betrieb genommen worden, wo das überschüssige Presswasser zur Algenzucht für eine Aufzucht von Nilbarschen (*Tilapia*) in warmem Wasser sowie zur Produktion von Gemüse im Gewächshaus eingesetzt wird (Staudenmann 1999). Auf eine Bilanzierung der Abwasseraufbereitung mit Umkehrosmose und Stickstoffelimination wird hier verzichtet. Bei Ausgangsmaterial mit 40% TS soll kein überschüssiges Wasser auftreten (Kogas 1999). Bei 35% Trockensubstanz wird aber mit 250 lt Presswasser pro t Abfall gerechnet.

### **Kombinierte Kompostier- und Vergärungsanlagen**

Die kombinierten Kompostier- und Vergärungsanlagen trennen den biogenen Stoffstrom auf: Nasse, leicht abbaubare Stoffe werden vergoren, Material mit höherem Holzanteil kompostiert. Der vergorene Schlamm wird dem Kompostiergut zur Befeuchtung beigemischt und damit nachgerottet. Im Folgenden werden die zwei Verfahren VG und VO beschrieben:

### ***VG: Vergärung mit geschlossener Kompostierung***

Bei dieser Verfahrenstechnik handelt es sich um die Kombination einer thermophilen, einstufigen Feststoffvergärung (40% des Frischgewichtes) mit einer voll geschlossenen, automatisierten Intensivrotte in Rotteboxen. Das vergorene Material wird in den Rotteboxen mit frischem Rottegut gemischt. Nach einer Rottezeit von 5-6 Wochen wird der Frischkompost unter einer Überdachung offen gelagert und anschliessend an die umliegenden Landwirtschaftsbetriebe oder an Gartenbaubetriebe abgegeben. Die Anlage ist baulich ähnlich aufwendig wie die GK, auch für den Betrieb wird viel Energie aufgewendet, falls das produzierte Biogas nicht eingerechnet würde.

#### *Datenerhebung bei BRV-Anlage Allmig, Baar (Kt. ZG)*

Die aktuelle Anlage "Allmig" in Baar wurde 1994 durch die Firma BRV erstellt und war damals eine Pionieranlage zur kombinierten Behandlung biogener Abfälle. Sie ist für rund 18'000 Jahrestonnen ausgelegt, wobei knapp ein Viertel des biogenen Materials über die Gärlinie verarbeitet wird. Diese aus heutiger Sicht sehr kleine Gärmenge ist eine Folge der gewählten Verfahrenstechnik: Das vergorene, nasse Material wird nach der Vergärung ohne Abpressung unter das frische Rottematerial gemischt. Bei einem höheren Anteil an nassem Gärgut könnte es zu einer Durchnässung der Mieten kommen, was den Rotteprozess stören würde. Eine detaillierte Beschreibung der Anlage inklusive der detaillierten Energiebilanzen findet sich in einem Bericht für das Bundesamt für Energie (Edelmann, Brotschi und Joss 1998).

Die Anlage Allmig verfügt über einen Biowäscher zur Reinigung der Abluft. Mit Kompostsickerwasser angereichertes Dachwasser rieselt in einem Filterturm über Kunststoff-Füllkörper, welche als Aufwuchsfläche für Bakterien dienen. Die Abluft wird von unten durch den Turm gepresst. In der Anlage Allmig wird die Hallenluft mit der Abwärme des Blockheizkraftwerks, in dem das Biogas verwertet wird, vorgewärmt. Dies hat den grossen Vorteil, dass in der Komposthalle der Taupunkt der Luft nicht erreicht wird, was Kondenswasserbildung und damit Korrosionsschäden verhindert.

Für den vorliegenden Vergleich wurde von einem aktuelleren, nach Angaben der Erbauer leicht modifizierten Anlagendesign ausgegangen, bei welchem 40% des Materials vergärt, der Rest kompostiert wird (BRV 1998). Während die "Allmig" 1997 rund 90% ihres Energiebedarfs mit dem selbst produzierten Biogas aus der Vergärung decken konnte, kann beim im Vergleich gewählten Verhältnis mit 40% Vergärung sogar ein kleiner Energieüberschuss erwirtschaftet werden.

## **VO: Vergärung mit offener Nachkompostierung**

Hier handelt es sich um die Kombination einer mehrstufigen, thermophilen Vergärung mit einer offenen Kompostierung in Rotteboxen. Im beschriebenen Fall wird 60% vergoren und 40% strukturreiches Material direkt kompostiert. Nach der eingehausten Anlieferung im Flachbunker wird mit einem dieselbetriebenen Schredder grob zerkleinert und in einem nachfolgenden Siebschritt das gärbare vom kompostierbaren Material getrennt. In der Gärlinie gelangt das Material nach der Feinzerkleinerung in eine Hydrolyse und von dort batchweise in mehrere hintereinandergeschaltete Gärbehälter, in welchen die Vergärung abläuft. Das Gärgut wird schliesslich mit dem ligninreicheren Material, zunächst in einer geschlossenen Halle und nach 10 Tagen offen kompostiert. Die Abluft der Gäranlage und der Halle wird über einen Biofilter gereinigt.

Die Anlage ist ebenerdig konzipiert, was beim Bau weniger aufwendig ist. Hingegen ist der Energiebedarf für den Betrieb relativ hoch. Einerseits wird in der Gärlinie relativ viel gepumpt und gemischt, andererseits braucht die vollständig dieselbetriebene Kompostierlinie ähnlich viel Diesel wie die offene Kompostierung (AGW-1997, Jahresbericht zu den Kompostier- und Vergärungsanlagen im Kanton Zürich 1996)

## **Datenerhebung bei ROMOPUR, Kefikon/ Kompostieranlage Winterthur**

Da die erste ROMOPUR-Grossanlage in Frauenfeld zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht in Betrieb war, wurden die Daten auf der Pilotanlage in Kefikon (TG) erhoben. Die Verarbeitungskapazität der Pilotanlage betrug 2'500 t/a. Das ausgegorene Material wurde in Winterthur und Frauenfeld zusammen mit strukturreichen Abfällen aus der Region nachgerottet. Bei der ROMOPUR -Anlage wird von einem Verhältnis von 60% vergären und 40% direkter Kompostierung ausgegangen. Anders als im Fall der Allmig wird hier das Gärgut spezifisch entsprechend dem Befeuchtungsbedarf in den Kompostierphasen zugegeben. Es durchläuft dann zusammen mit bereits vorgerottetem Material eine Nachrotte von rund drei Wochen. In Winterthur waren die Gärgutanteile im Kompost etwas tiefer als im Vergleich angenommen, bzw. als bei der nun realisierten Grossanlage. Dabei soll kein überschüssiges Presswasser entstehen.

**Tab.1: Praxisgrösse der untersuchten Anlagen und Anteile in der Vergärung**

		<b>KG</b>	<b>KO</b>	<b>VN</b>	<b>VO</b>	<b>VG</b>
Verarbeitungsmenge 1998	t	12000	6200	9200	12400	16800
Vergärungsmenge 1998	t	0	0	9200	2500	3880
in %	%			100%	20%	23%
Vergärungsmenge in diesem Projekt	t	0	0	10000	6000	4000
	%			100%	60%	40%

Die Tabelle 1 zeigt auf, dass sich die für die Untersuchung gewählten von den verglichenen Vergärungsverfahren teilweise unterscheiden. VN ist das einzige Verfahren, das nahezu die angenommenen 10000 t Vergärung 1998 bereits erreicht

hat. VO ist in der gewählten Grösse 1999 realisiert worden, bietet aber damit nicht eine genügend lange Messperiode, um alle Grössen (Gasertrag, Stromverbrauch etc.) vom laufenden Anlagenbetrieb zu beziehen. Im Vergleich dazu ist VG mit dem kleinen Anteil Vergärung schon länger in Betrieb, produziert aber kaum Überschussstrom. Vom Anlagenbauer BRV wurde klargestellt, dass ein vergleichbares Verfahren nur mit mindestens 40% Vergärung aufgebaut würde. Weil VG auch die Vergärung noch entsprechend ausbauen könnte und damit zum Stromproduzenten würde, wurde das Verfahren mit 40% Vergärung gewählt.

## **2.5 Herstellung der Anlagen**

Weil Zahlen in praxisüblicher Grösse leichter zugänglich sind, werden die Bauteile pro 10'000 Tonnen, also in der modellhaft betrachteten Betriebsgrösse dargestellt. Diese Angaben sind bereits auf den Verbrauch pro Jahr heruntergerechnet. Dahinter steckt die Anzahl Jahre, über welche eine Einrichtung genutzt werden kann. Diese Abschreibungsdauer ist gleich gewählt worden wie bei den ökonomischen Betrachtungen, 10 Jahre für stationäre Maschinen und 25 Jahre für den Bauteil. Diese Angaben spielen in der Bilanz eine eher untergeordnete Rolle, weil sie vom jährlichen Betriebsmittelverbrauch und den Emissionen überlagert werden.

Die Baustoffe Beton, Armierungseisen, Stahl usw. sind gemäss den Angaben der Anlagenbauer eingesetzt worden. Die hier ausgewiesenen Daten entsprechen jeweils 4% des gesamten Materialaufwandes. Die Anlagen werden damit innert 25 Jahren abgeschrieben. Es wäre wahrscheinlich denkbar, die Anlagen länger zu betreiben, aber weil der bauliche Aufwand im Vergleich zum Betriebsaufwand nicht den Hauptteil ausmachen dürfte, kann auf diese feinere Betrachtung verzichtet werden. Ebenfalls eher grob sind auch die Aufnahmen bei den stationären Maschinen erfolgt. Das Maschinengewicht wurde als Gusseisen eingesetzt, für den Elektroanteil wurde die Kupfermenge abgeschätzt, Gärtank, Transportbänder und Leitungen wurden als niedriglegiert eingesetzt.

**Tab.2: Eingabedaten: Bauteile für die Verarbeitung von 10000 t Bioabfall in 1 Jahr**

Mname		Infra KG	Infra KO	Infra VN	Infra VO	Infra VG
*Flaeche III-IV	m <sup>2</sup>	563.2	768	256	358.4	353.3
Beton (ohne Armierungseisen)	kg	192000	25824	163200	124800	109440
Stahl unlegiert	kg	6400	680	4800	3200	4800
Holzbaustoff Brettschichtholz	kg	4160	4000	0	2400	8000
Aluminium 0% Rec.	kg	20	0	40	20	40
Polystyrol schlagfest	kg	313.2	0	156.8	40	288
PUR-Hartschaum	kg	0	0	0	192	288
PVC schlagfest	kg	127.2	0	140	93.36	140
Sand fuer Bau	kg	12600	37320	4256	19400	14144
Betonkies	kg	233576	692080	78896	359360	262120
Bitumen ab Raffinerie CH	t	1.3232	3.916	0.4464	2.032	1.488
Stahl niedriglegiert	kg	800	1200	0	600	3600
Gusseisen	kg	8240	1600	7520	9600	4000
Kupfer	kg	240	12	120	120	200
Infra Strom BHKW 160 kWel	Stk	0	0	0.2	0.1	0.1
Infra Waerme BHKW 160 kWel	Stk	0	0	0.2	0.1	0.1
Infra Waerme+Strom BHKW 160 kWel	Stk	0	0	0.2	0.1	0.1
Transport LKW 28 t	tkm	41409	38711	20069	34215	37472
Transport Schiene	tkm	142884	422714	48319	219582	160368
Beton in Inertstoffdeponie	kg	198400	26504	168000	128000	114240
Asphalt in Reaktordeponie	kg	13923	41236	4702	21432	15632
Holz unbehandelt in KVA	kg	4160	4000	0	2400	8000
Polystyrol in KVA	kg	313.2	0	156.8	40	288
PVC in KVA	kg	127.2	0	140	93.36	140
Kunststoffe in KVA	kg	0	0	0	192	288

\*Kommentar: Die Fläche dient der Infrastruktur als Trägerin. Für sie wird mit einem Jahr Bauzeit, einem Jahr für den Abbau und 5 Jahren für die Rekultivierung gerechnet. Für die Bauten, die 25 Jahre brauchbar sein sollen, gibt das 32 Jahre Landverbrauch. Die zusätzlichen 7 Jahre machen 28% mehr Flächenverbrauch pro Jahr aus.

**Hinweise zu diesen Eingabedaten:** Das Armierungseisen liegt im Verhältnis zum Beton zwischen 2,6 und 3,3%. Stationäre Maschinen sind als Gusseisen und Stahleinbauten als niedrig legierter Stahl eingesetzt. Die Gärbehälter sind aus C-Stahl und nicht wie erwartet aus rostfreiem Stahl hergestellt worden.

Das Verfahren KO weist am wenigsten Baustoffe und stationäre Maschinen auf, weil es in der offenen Kompostierung nur die Rotteboxen und das überdachte Kompostlager als Hochbauten gibt. Hingegen braucht KO infolge der niedrigen Lagerhöhe des Kompostes am meisten asphaltierte Fläche. Die Asphaltfläche ist nach fbb-Labor, Hinwil (FBB 1998) einheitlich berechnet worden. Als Unterbau wird mit 50 cm Wandkies (1,8 t/m<sup>3</sup>) gerechnet, darauf wird ein HMT-Belag von 6 cm aufgetragen. Der HMT 22 mit einer Rohdichte von 2,4 t/ m<sup>3</sup> enthält pro Tonne 42 kg Destillationsbitumen, 400 kg Sand und 558 kg Split. Die Mischung werde sofern

vorhanden mit Recyclingmaterial hergestellt, was hier nicht berücksichtigt wird (FBB 1998).

Die Biogasverwertung erfolgt in Blockheizkraftwerken mit 160 kW elektrischer Leistung. Das Verfahren VN verfügt über zwei, VO und VG über je ein BHKW, die in der Bilanz im 24 Stundenbetrieb eingerechnet sind. Sie werden innert 10 Jahren mit rund 80000 Betriebsstunden abgeschrieben (im Vergleich zu Frischknecht 1996 mit 100000 Betriebsstunden). In der Praxis werden an verschiedenen Standorten Versuche gemacht, um den Strom nur zu Tagesstunden zu liefern. Dazu würde es dann etwas grössere Gasometer und ev. auch grössere BHKW brauchen. Hier werden die Eingaben vom Ökoinventar von Frischknecht et al (ESU 1996, XIV, S.21) übernommen: Infra Wärme, Infra Strom und Infra Wärme +Strom.

**Abfälle:** Die Entsorgung der Metalle wird in der Annahme eines vollständigen Recyclings nicht weiter bilanziert. Es wird angenommen, dass Beton mit Armierungseisen in einer Inertstoffdeponie, der Asphaltbelag in einer Reaktordeponie und die Isolationsmaterialien und das Bauholz in eine KVA entsorgt werden.

**Tab.3: Annahmen für Transporte der Baustoffe zur Baustelle und zur Entsorgung**

Transport		LKW 28 t	Schiene	Quelle
Beton (ohne Armierungseisen)	km	20		ESU 1996:III:30
Stahl unlegiert	km	100		eigene Annahme
Holzbaustoff Brettschichtholz	km	100		ESU 1996:III:30
Aluminium 0% Rec.	km	50	200	ESU 1996:III:30
Kupfer	km	50	600	ESU 1996:III:30
Polystyrol schlagfest	km	50	200	ESU 1996:III:30
PUR-Hartschaum	km	50	200	ESU 1996:III:30
PVC schlagfest	km	50	200	ESU 1996:III:30
Stahl niedriglegiert	km	50	600	ESU 1996:III:30
Gusseisen	km	50	600	ESU 1996:III:30
Sand fuer Bau	km	20		ESU 1996:III:30
Betonkies	km	20		ESU 1996:III:30
Bitumen ab Raffinerie CH (in t)*	km	100000		(=100x1'000*) eigene Annahme

- alle andern Grössen sind in kg, Bitumen ist in Tonnen angegeben, deshalb der Faktor 1000.

## 2.6 Modul 10000 t Grüngut frei Anlage

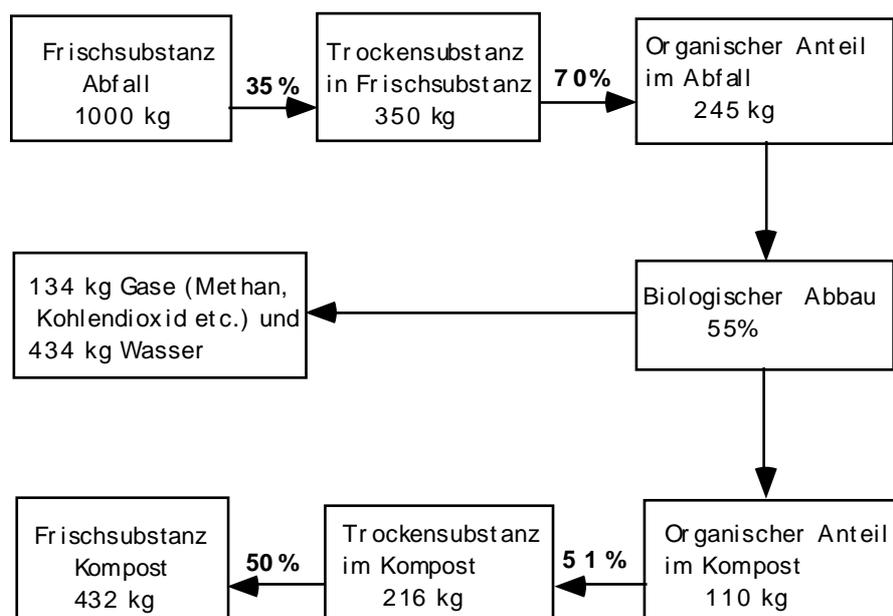
In diesem Modul sind die kommunale Einsammlung, die Entsorgung von einem Prozent Fremdstoffe im Grüngut, sowie eine Gutschrift für den biogenen Kohlenstoff zusammengefasst. Sie gelten für alle Verfahren.

**Tab. 4: Grüngut frei Anlage (für alle Verfahren gleich)**

Abfall CH95 in KVA	kg pro kg	0,01
Kommunale Abfallsammlung pro kg	kg pro kg	0,60
CO <sub>2</sub> -Gutschrift aus Grüngut	kg pro kg	-0,262

Diese CO<sub>2</sub>-Gutschrift wird gemäss Abbildung 2 berechnet (245 kg organische Substanz à 53% C dividiert durch 12 (Molgewicht von C) mal 44 (Molgewicht CO<sub>2</sub>) = 476 kg CO<sub>2</sub> pro Tonne x 10000 x 0,55 = 262 kg pro Tonne oder 0,262 kg pro kg, weil nur der abgebaute Teil des Kohlenstoffs gutgeschrieben wird). Die Kohlenstoffströme pro Verfahren werden in der folgenden Tabelle 5 beurteilt.

## 2.7 Annahmen zum biologischen Abbau (Abbaumodell)



**Abb. 2: Mengenannahmen zum biologischen Abbau vom Abfall zum Kompost**

Die Mengenentwicklung von 1000 kg Frischsubstanz zu 432 kg Kompost ist in Abbildung 2 dargestellt. Dabei ist mit 35% Trockensubstanz und 70% organischer Substanz und 55% biologischem Abbau gerechnet worden. Als Annahme gilt auch, dass alle Verfahren gleich viel Kompost produzieren.

Der Kohlenstoffgehalt ist mit 53% C in der organischen Substanz gerechnet. Dieser Wert stimmt für den Kompost mit Marb et al. (1997) überein. Für Bioabfall analysierte er 47%. Für Humus im Boden und im Kompost ist gemäss Referenzmethoden der

eidg. Forschungsanstalten mit 58% zu rechnen (FAL 1999). Für die Berechnung sollte beim Abfall und im Produkt mit dem gleichen Wert gerechnet werden, weshalb wir uns für 53% entschieden haben.

Wenn wir die rund 1,3 Mio. kg C zu CO<sub>2</sub> (gemäss den Molgewichten /12 x 44) umrechnen, erhalten wir 4,76 Mio kg CO<sub>2</sub>. Die biologisch abgebauten 55% von diesen 4,76 Mio. kg CO<sub>2</sub> (also 2,62 Mio.) sollen als biogenes Kohlendioxid im Vergleich z.B. zum fossilen Erdgas gutgeschrieben werden, weil damit keine zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht werden.

Tab. 5: Berechnungen der C-Mengen in den verschiedenen Verfahren (aerob und anaerob)

Zeile			KG	KO	VN	VO	VG
1	Kohlenstoffgehalt in 10000 t Grüngut	kg	1298500	1298500	1298500	1298500	1298500
2	CO <sub>2</sub> -Gutschrift für biogenen Kohlenstoff 55% des CO <sub>2</sub>	kg	2618642	2618642	2618642	2618642	2618642
3	Anteil Vergärung bei den Verfahren		0%	0%	100%	60%	40%
4	Kohlenstoff frei bei 55% biologischem Abbau	kg	714175	714175	714175	714175	714175
5	Kohlenstoffabbau bei 76% im anaeroben Prozess	kg	0	0	542773	325664	217109
6	Kohlenstoffabbau in Kompostierung	kg	714175	714175	171402	388511	497066
7	Gemessene Anteile Methan aus Kompostierungsabluft-C		<b>10.26%</b>	<b>5.12%</b>	<b>29.18%</b>	<b>20.32%</b>	<b>19.12%</b>
8	Methan-C aus Kompostierung	kg	73274	36566	50015	78945	95039
<b>9</b>	<b>CH<sub>4</sub> Methan p</b>	kg	<b>97699</b>	<b>48754</b>	<b>66687</b>	<b>105261</b>	<b>126719</b>
10	CO <sub>2</sub> -C aus Kompostierung	kg	640901	677609	121387	309566	402027
11	CO <sub>2</sub> Kohlendioxid p	kg	2349969	2484567	445085	1135074	1474098
	Biogas in BHKW						
12	Biogas mit 67% Methan, 32,3% CO <sub>2</sub> , 0,7% N <sub>2</sub>	kg			<b>1121085</b>	<b>672651</b>	<b>448434</b>
13	Biogas bei 1,121 kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>			<b>1000000</b>	<b>600000</b>	<b>400000</b>
14	CO <sub>2</sub> aus BHKW				1990168	1194101	796067

Gemäss Abbildung 2 rechnen wir für alle Verfahren mit 55% biologischem Abbau. Davon werden bei den vergärten Anteilen 76% anaerob und die restlichen 24% aerob abgebaut. Beim Verfahren VN verbleiben folglich für den Kompostierprozess noch 24% des abzubauenen Kohlenstoffs (Nachrotte), bei VO 54,4% (40% +24% von 60%), bzw. bei VG 69,9% (60% + 24% von 40%) (vgl. Tab.1, Tab.5 Zeile 5 und 6).

Beim Kompostierprozess, vor allem wenn er nicht optimal verläuft, wird ein Teil des abgebauten C als Methan freigesetzt. In Messungen für das BFE/BUWAL (Edelmann und Schleiss 1999) wurden die Prozentsätze in Zeile 7 der Tabelle 5 gefunden. Diese Prozentsätze werden für dieses Projekt übernommen, weil sie für die

Vergärung am ehesten zutreffen dürften, die Kompostierung dürfte durch die schlechtere Struktur dieses Materials wahrscheinlich noch etwas höhere Methananteile aufweisen. VN weist den höchsten Prozentanteil auf, gefolgt von VO und VG und den Kompostierverfahren. Das ist insofern nicht erstaunlich, weil das Material vor der Nachrotte vollständig von anaeroben Mikroorganismen besetzt und auf Methanbildung eingespart war.

Der rasche Übergang von der anaeroben Schiene zu aeroben Verhältnissen verlangt spezielle Aufmerksamkeit, ist jedoch in der Praxis noch nicht optimal gelöst. Hier besteht noch ein grosses Verbesserungspotential. Bei VN sind die Methanemissionen allerdings trotz hohen Konzentrationen in der Anlagenabluft kleiner als bei VG und VO, da ein spürbar kleinerer C-Anteil während der Kompostierung abgebaut wird. VN erreicht bezüglich der emittierten Methanfracht nach der offenen Kompostierung den zweiten Rang (Zeile 9).

Zeilen 10 und 11 weisen sodann die CO<sub>2</sub>-C, bzw. die CO<sub>2</sub>-Mengen aus, welche den Rest neben den Vergärungs-C- und den Methan-C-Mengen ausmachen. Damit beträgt der biologisch abgebaute Kohlenstoff wieder bei allen Verfahren 55%.

**Tab. 6: Zusammensetzung von Biogas und seine Heizwerte**

	Gew.%	Vol.%	Quellen
Methan	42.66%	67%	Fankhauser + Moser, FAT18
Kohlendioxid	56.56%	32.3%	eigene Berechnung
Spurengase (v.a. N <sub>2</sub> )	0.78%	0.7%	Edelmann + Engeli 1996
Dichte kg/ Nm <sup>3</sup>		1,13	Fankhauser + Moser, FAT18
Unterer Heizwert MJ/Nm <sup>3</sup>		24	Fankhauser + Moser, FAT18
Unterer Heizwert MJ/kg	21,4		Fankhauser + Moser, FAT18
Oberer Heizwert MJ/kg	23,7		Baehr 1989
Oberer Heizwert MJ/ Nm <sup>3</sup>		26,6	Baehr 1989

In Zeile 13 ist die Menge Biogas als kg aus den 76% anaerobem Abbau berechnet. Grundlage für diese Berechnung ist eine übliche Biogaszusammensetzung von rund zwei Drittel Methan und einem Drittel Kohlendioxid. Weil noch etwas Spurengase (hier als N<sub>2</sub> eingesetzt) vorhanden sind, wird Methan auf 67% eingesetzt, CO<sub>2</sub> jedoch auf 32,3% reduziert. Die Berechnung mit den Molmassen ((0,67x16 + 0,323 x44 + 0,007x28)/22,414) ergibt ein spezifisches Gewicht von 1,121 kg pro m<sup>3</sup>.

Die Annahme von 100 m<sup>3</sup> Biogas pro Tonne Grüngut ist in verschiedenen Quellen als übliche Menge dargestellt (Schleiss 1999 für VN, Edelmann et al. 1998 für VG). Das ergibt in Tab. 5 Zeile 14 die 1 Mio. m<sup>3</sup> Biogas für VN, 0,6 Mio m<sup>3</sup> für VO und 0,4 Mio m<sup>3</sup> für VG. Die Gaszusammensetzung wird für alle drei Verfahren als identisch angenommen, der Hu wird von W.Schmid AG mit 6 kWh oder mit 21,6 MJ pro m<sup>3</sup> angegeben. Von den 24 MJ/Nm<sup>3</sup> von Fankhauser und Moser (1983) auf ein kg Biogas zurückgerechnet, gibt das 21,4 MJ/kg. Die Berechnung des oberen Heizwertes von 55,65 MJ/kg reinem Methan erfolgte mit der Angabe von Baehr (1989). Damit liegt der Hu bei 90% des Ho, wie es von Zimmermann et al. (1996, Tab.IV.13, S.28) auch verwendet wurde.

## 2.8 Betriebsmittelbedarf und –emissionen

In Tabelle 7 sind unter anderem die Verbrauchszahlen von Strom und Diesel zusammengestellt. Die Angaben zum Diesel sind bei den Betriebsaufnahmen gemacht worden. Im Jahresbericht 1996 (AGW 1997) sind die Dieserverbrauchszahlen zur offenen Kompostierung detailliert dargestellt worden. Der mittlere Energieverbrauch (Strom + Diesel) beträgt seit einigen Jahren rund 30 kWh pro Tonne verarbeitetem Grüngut (Schleiss 99). Der mittlere Dieserverbrauch ist für die Verfahren KO und VO übernommen worden. Der Stromverbrauch bei Vergärungsanlagen wird in der folgenden Tab. 13 noch detaillierter dargestellt.

**Tab. 7: Eingaben in die Module Betrieb je Verfahren**

		Betrieb KG	Betrieb KO	Betrieb VN	Betrieb VO	Betrieb VG
Infra KG, KO, VN, VO, VG	Jahr	1	1	1	1	1
Diesel in Baumaschine	TJ	0.07	1.03	0.07	0.95	0.22
Strom Niederspannung - Bezug in CH	TJ	3.96	0.23	0.24	0.36	0.54
Gruengut frei Anlage	kg	10'000'000	10'000'000	10'000'000	10'000'000	10'000'000
Biogas in BHKW	kg	0	0	1'121'085	672'651	448'434
Wartung BHKW 160 kWel	Stk	0	0	0,2	0,1	0,1
CH <sub>4</sub> Methan p	kg	97'699	48'754	66'687	105'261	126'719
CO <sub>2</sub> Kohlendioxid p	kg	2'349'969	2'484'567	445'085	1'135'074	1'474'098
NH <sub>3</sub> Ammoniak p	kg	210	4200	2285	2923	840
N <sub>2</sub> O Lachgas p	kg	998	998	998	998	998
H <sub>2</sub> S Schwefelwasserstoff p	kg	2450	2450	2450	2450	2450
Abwasser CH- Durchschnitt: pro m <sup>3</sup> in ARA Gr.Kl. 2	m <sup>3</sup>	1620	4500	450	2100	1515
COD f	kg	397	1103	110	515	371
Schwermetalle in Boden	kg	2160000	2160000	2160000	2160000	2160000
Naehrstoffe in Kompost	kg	2160000	2160000	2160000	2160000	2160000
Naehrstoffe Presswasser	kg	0	0	2500000	0	0

Nach Gronauer et al. (1997) entweicht rund 12% des Gesamtstickstoffs aus dem Ausgangsmaterial in Form von Ammoniak. Falls ein Biofilter vorhanden ist, wird darin Ammoniak in der Grössenordnung von 95% zurückgehalten und nitrifiziert. Weil die offene Kompostierung KO keinen Biofilter hat, weist dieses Verfahren die höchste Emission auf, gefolgt von VO. Auch bei VG findet noch ein Teil des Kompostierprozesses im Freien statt, weshalb dort noch mit einem Fünftel der Gesamtemission gerechnet wird. KG weist nur 5% aus, gleich wie VN. Bei VN kommen noch Ammoniakemissionen aus der Presswasseranwendung in der Grösse von 60% der Gesamtemission dazu. Diese Ammoniakmenge wurde mit dem Excel-Programm Ammonia von H. Menzi (1998) aus der gesamten Ammonium-N-Menge im Presswasser berechnet.

Das Lachgas macht als N in der Stoffbilanz von Gronauer et al (1997) 1,8% des N im Ausgangsmaterial aus. Durch die Hochrechnung auf N<sub>2</sub>O wird daraus 2,8%, die mit 35000 kg N multipliziert die 998 kg N<sub>2</sub>O ergeben. Im Biofilter erfolgt keine Reduktion der N<sub>2</sub>O-Menge, weshalb sie für alle gleich eingesetzt wurde. Zur Emission von Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) aus dem Rottegut ist die Datenlage eher dürftig. Als eine der wenigen, aber relativ hohen Angaben geben auch Gronauer et al. (1997) um 700 g pro t Input-Trockensubstanz an. Das ergibt 2450 kg H<sub>2</sub>S pro 10000 t mit 35% Trockensubstanz.

Im Durchschnitt fällt pro Quadratmeter offener Kompostierfläche zwischen 250 und 300 lt Abwasser mit mittlerer Belastung an (AGW 1992). Wir rechnen hier mit 300 lt pro m<sup>2</sup> offener Asphaltfläche. Weitere Betrachtungen zu den Belastungen im Abwasser finden sich in Tabelle 8.

**Tab.8: Mittlere Gehalte im Abwasser von Kompostieranlagen im Vergleich zu ARA**

In mg/lt	Median AGW 1993	Zimmermann (1996)	*Anteil im Ablauf
BSB <sub>5</sub>	137	103.6	8%
CSB	1516	155.6	18%
Ammonium-N	20	13.9	46.8%
Gesamt-P	9	3	20%

\*Anteil im Ablauf bedeutet die Emissionen, welche nach der ARA in die Gewässer gelangen.

In grober Näherung können die Parameter BSB<sub>5</sub>, Ammonium und Phosphat in den Mittelwert von Zimmermann eingefasst werden. Die Median-Daten des AGW (1992) weisen sehr grosse Schwankungen auf, je nachdem ob vor der Messperiode grössere Niederschläge auftraten oder nicht. Der CSB-Wert weist jedoch fast das Zehnfache der mittleren Konzentration von Zimmermann (1996) auf und hier erscheint eine Korrektur in Tab. 8 angebracht. Die Korrektur errechnet sich aus 18% von 1516 minus die in der Grundbelastung eingerechneten 18% von 155.6 = 244,87 und wird auf 245 mg /lt aufgerundet.

Das feuchtere Material könnte bei der offenen Kompostierung am Anfang eventuell zu höheren Abwassermengen führen, für die geschlossenen Vergärungsverfahren spielt das aber nicht eine grosse Rolle. Einzig das Verfahren VN weist mit dieser Art von Abfall in der Praxis einen Wasserüberschuss im geschlossenen Anlagenbereich aus. Die andern Verfahren erreichen nach Aussagen der Betreiber eine vollständige Verdampfung des Wassers im Nachrotteprozess. Bei VN sind pro 1000 kg Frischabfall neben den 432 kg Kompost noch 250 kg Presswasser mit 13% Trockensubstanz (weitergehende Analysen in Schleiss 1998) eingesetzt worden. Das Verhältnis Kompost zu Presswasser stimmt in den letzten Jahren etwa mit der Praxis überein, könnte sich aber stark ändern, wenn intensiv nachgerottet würde. Dabei entsteht ein grosser Bewässerungsbedarf, was die Presswassermenge reduzieren würde. Für diese Studie scheint das Einsetzen des Status quo vertretbar.

Weil das ganze Presswasser auch landwirtschaftlich verwertet wird und dafür die ganzen Nährstoffe im Kompost gutgeschrieben werden, müssen hier nur die Ammoniakemissionen speziell betrachtet werden. Weil im Presswasser der Stickstoff

zu einem grösseren Teil als Ammonium-N vorliegt, muss bei der Ausbringung mit einem relativ hohen Ammoniakverlust gerechnet werden. Wie in Tab. 7 ersichtlich ist, macht der Ammoniakverlust von VN rund 60% des gesamten Ammoniakverlustes von KO bei der Kompostierung aus. Das deutet wiederum ziemlich verschiedene Prozesse an. Weil hier Ammoniak belastet wird, darf, wie in Tab. 11 auch vorgesehen, eine N-Gutschrift entsprechend dem in der Nährstoffbilanz eingesetzten Stickstoff gegeben werden.

**Tab. 9: Emissionen pro kg Biogas in BHKW**

CO <sub>2</sub> Kohlendioxid s	kg	1.775
CH <sub>4</sub> Methan s	kg	0.000053
NMVOC	kg	0.000053
CO Kohlenmonoxid s	kg	0.0011
NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> s	kg	0.00042
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> s	kg	3.08E-7

Die Emissionen pro kg Biogas in BHKW werden aus dem Modul Erdgas in BHKW (ausser dem Erdgas selber) übernommen. Einzig die Frage des Schwefels ist weiter zu diskutieren: Dem Erdgas wird zur Geruchsmarkierung 8,4 mg Schwefel pro m<sup>3</sup> zugefügt (ESU 1996, Tab. V.3.5). Eine einmalige Messung in der Anfangsphase bei der ROMOPUR-Anlage in Frauenfeld ergab 13 mg Schwefel pro m<sup>3</sup> (ROM 1999). Hans Engeli (engeli 1999) beurteilte eine Grössenordnung um 10 mg S pro m<sup>3</sup> als plausible Grössenordnung bei üblichen Schwefelgehalten im Ausgangsmaterial. Speziell Hühner- und Schweinegülle kann zu bedeutend höheren H<sub>2</sub>S-Gehalten im Biogas führen (Edelmann und Engeli 1996 S. 65 ff). Höhere Werte würden als aggressive Gerüche (faule Eier) auf den Anlagen wahrgenommen, was auf den Vergärungsanlagen jedoch bisher nicht der Fall ist.

**Tab. 10: Schwermetallgehalte pro kg Kompost-Trockensubstanz (für alle Verfahren gleich)**

As in Boden	kg	0.000008
Cd in Boden	kg	0.0000006
Cr in Boden	kg	0.000034
Cu in Boden	kg	0.000072
Fe in Boden	kg	0.0024
Hg in Boden	kg	0.0000003
Mn in Boden	kg	0.000017
Ni in Boden	kg	0.000022
Pb in Boden	kg	0.000075
Zn in Boden	kg	0.00024

Die Schwermetallgehalte im Kompost stammen aus über 300 Analysen (AGW 1991 – 97, Schleiss 1998 + 99) und sind für alle Verfahren gleich eingesetzt worden. Das folgt aus der Annahme vom gleichen Ausgangsmaterial und identischen

Metalleinträgen bei den verschiedenen Verfahren. Die vielen Kompostanalysen haben nicht signifikant unterschiedliche Schwermetallwerte bei den verschiedenen Verfahren ergeben.

Die Nährstoffsituation in der Schweizer Landwirtschaft ist in Tabelle 11 dargestellt. Dabei beträgt der Kompostanteil beim Phosphor nur 1,7%, bei den andern Nährstoffen liegt er gar unter 1%. Weil in der gesamten Landwirtschaft ein Nährstoffüberschuss von 50% bis 70% herrscht (Braun et al. 1994), wird manchmal gefordert, den Kompost nicht mehr landwirtschaftlich zu verwerten. Dieses Vorgehen würde zwar die Kompostwirtschaft an der Achillesferse treffen, jedoch das Nährstoffproblem der Schweizer Landwirtschaft nicht lösen. Weil jedoch in den letzten Jahren der ganze Kompost zum grossen Teil landwirtschaftlich verwertet worden ist – und damit auch in den betrieblichen Nährstoffbilanzen eingesetzt worden ist – wird in dieser Studie auch die volle Nährstoffgutschrift für eingesparte Mineraldünger eingesetzt.

**Tab. 11:** Anteile an Nährstoffen und an organischer Substanz in Kompost und anderen Düngern am Eintrag in Schweizer Böden 1995

Eintrag in CH-Böden	Hofdünger		Mineraldünger		Klärschlamm		Kompost	
	in 1'000 t pro Jahr	in %	in 1'000 t pro Jahr	in %	in 1'000 t pro Jahr	in %	in 1'000 t pro Jahr	in %
Stickstoff (N)	1) 128,6	64,8%	2) 64,8	32,7%	3,36	1,7%	1,6	0,8%
Phosphor (P)	1) 25,2	64,0%	2) 11,5	29,2%	2,0	5,1%	0,68	1,7%
Kalium (K)	187,2	76,0%	58,5	23,7%	0,22	0,1%	0,48	0,2%
*Org. Substanz	2500	95,3%	0	0,0%	100	3,8%	22	0,8%

\*Nicht inbegriffen in dieser Berechnung sind rund 4 Mio. t OS von Ernterückständen und Wurzelmasse, welche die Felder gar nicht verlassen (Frei et al. 1993)

- 1) Quelle: SBV und Hochrechnung aus FAC-Schriftenreihe Nr. 18 „Stickstoff- und Phosphorüberschüsse in der Landwirtschaft“ Braun, Hurni, Spiess, 1994 S. 28
- 2) Quelle: Schweizerischer Bauernverband Brugg: Gesamtverbrauch von zugekauftem Dünger in der Schweiz (SBV 1996)

Die Nährstoffgutschriften folgen den Angaben von N. Jungbluth (1999), wonach die Nährstoffmengen pro Düngereinheit nicht auf das Element bezogen sind (N-Dünger enthalten 28,5% N, P-Dünger 32% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K-Dünger 60% K<sub>2</sub>O, Mg und Ca je 100%). Für P, K, Ca und Mg sind die Nährstoffmengen aus dem anfangs definierten Abfall zu 100% in die Nährstoffgutschrift übernommen worden. Für N sind es gemäss den Vorgaben für die Berechnung des gesamtbetrieblichen Nährstoffhaushaltes eines landw. Betriebes für Kompost nur 10% des Gesamt-N (LBL 1995). Der Ammoniumstickstoff aus Presswasser (wie auch im Klärschlamm) ist vollständig in die Nährstoffbilanz einzusetzen. Das erfolgt separat nur für das Verfahren VN.

**Tab. 12:** Nährstoffgutschriften pro kg Kompost-Trockensubstanz (für alle Verfahren gleich)

N-Duenger	kg	0.0057
P-Duenger	kg	0.014
Mg-Duenger	kg	0.011
K-Duenger	kg	0.014
Kalk (CaO) neu	kg	0.105
N-Duenger aus Presswasser	kg	0.008

Tab. 13: Stromproduktion, Stromverbrauch, Strombezug vom Netz und Stromlieferung ins Netz

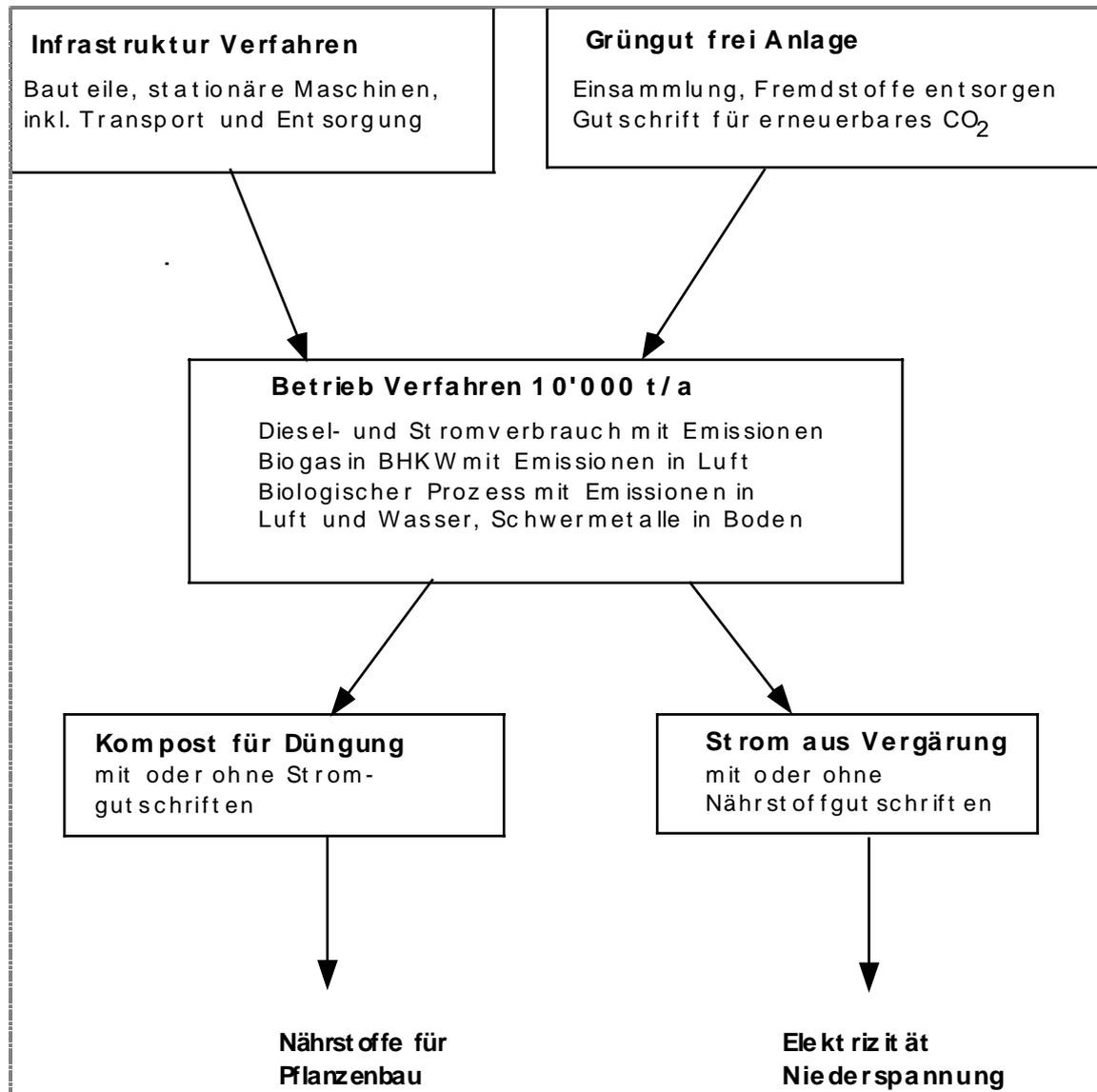
Basis 1998	Einheit	VN	VO	VG
Stromproduktion	MWh	1670	1002	668
Stromverbrauch	MWh	670	502	501
Strombezug vom Netz	MWh	67	100.4	150.3
Stromlieferung ins Netz	MWh	1067	600.4	317.3
Strombezug vom Netz	TJ	0.241	0.361	0.541
Stromlieferung ins Netz	TJ	3.841	2.161	1.142

Die Stromproduktion VN entspricht den abgelesenen MWh, für VO und VG sind es von VN heruntergerechnete Mengen, die aber bei den angenommenen Gasmengen und den gleichen BHKW realistisch sein dürften. Die vier VN-Anlagen im Kanton Zürich verbrauchen zwischen 43 und 71 kWh pro Tonne. Auf den meisten Anlagen laufen noch Nebenprozesse, teils wird Biogas zu Treibstoff aufbereitet oder ins Erdgasnetz eingespeist. Der Strombezug VN betrug in Otelfingen 1998 gemäss Rechnungen (EGO 1998) 60 MWh. Hier wurde es auf 67 MWh aufgerundet. Das entspricht zwar 10% des Gesamtverbrauchs, aber nur 6% der ins Netz eingespeisten Strommenge. Für VO wurde mangels weiterer Angaben ein Anteil von 20% vom Netz eingesetzt, weil VO nur 60% des Grüngutes für die Stromproduktion nutzt (aktuelle Messungen stehen noch nicht zur Verfügung). Weil VG nur 40% des Grüngutes vergärt und damit am wenigsten Strom produziert, wurde dort der Anteil mit 30% eingesetzt. Die Angabe in Edelmann et al. (1998) beträgt sogar über 40%, jedoch bei nur 23% Vergärungsanteil. Diese Annahmen stellen Grössenordnungen dar, die in ein paar Jahren zu überprüfen sind.

## 2.9 Modulverknüpfungen

Alle Verfahren haben spezifisch ein Modul Infra und ein Modul Betrieb. Für alle Verfahren gleich sind die Module Grüngut frei Anlage, Schwermetalle in Boden, und mit Ausnahme VN, wo Presswasser-N zusätzlich dazukommt, Nährstoffe im Kompost. Biogas wird bei den 3 Vergärungsverfahren im Verhältnis 10 zu 6 zu 4 ins BHKW gespiesen. Aus dem Prozess entstehen zwei Hauptkoppelprodukte, nämlich Kompost und Strom. Die Kompostieranlagen weisen nur das Produkt Kompost auf,

für die Vergärungsanlagen ist der Aufwand auf die beiden Produkte zu verteilen. Separat betrachtet wird noch, ob oder ob nicht Gutschriften für die Nährstoffe eingesetzt werden. Auch der Aufwand für die Kompostherstellung wird mit oder ohne Stromgutschriften betrachtet.



**Abb. 3: Module für die Berechnung von Kompost und Strom aus der Vergärung**

## 2.10 Vorgehen bei der Allokation

Beim Prozess Vergärung von Grüngut entstehen zwei Produkte, deren Mengen im Prozess nicht verändert werden können. Bei solchen Prozessen spricht man von starrer Kuppelproduktion (Frisknecht 1998). Beim Vergärungsprozess fallen die beiden Produkte Strom und Kompost mehr oder weniger zeitgleich an, allerdings lässt sich Kompost besser lagern als Strom. Wenn ein alleiniger Entscheider, aber kein perfekter Markt angenommen wird, erfolgt die Allokation nach dem Entschei-

dungsbaum in Frischknecht (1998) nach der ökonomischen Preis-Mengen-Optimierung. Das ist für die Vergärung als Bestandteil der Abfallbewirtschaftung nicht plausibel, weil der ökonomische Ertrag aus der Bezahlung der Abfälle und weniger aus dem Preis der Produkte entsteht.

Weil die KVA bei der Verbrennung von Grüngut weder Strom noch Kompost produziert, wird sie hier nicht einbezogen. Als Alternativvariante bietet sich die Kompostierung an, deren Produkt nur Kompost ist. Es könnte damit angenommen werden, dass alle über die Kompostierung hinausgehenden Emissionen dem Strom aus der Vergärung angelastet werden. Dieses Vorgehen wird aber nicht gewählt, weil der Vergärungsprozess doch bedeutend vom Kompostierprozess abweicht. Deshalb wird hier die Allokation auf die Produkte Kompost und Strom bezogen. Zu welchen Teilen der Strom und zu welchen der Kompost zu belasten ist, muss noch weiter diskutiert werden.

Kompost wird als Reifkompost zu rund Fr. 20.– bis Fr. 50.– pro m<sup>3</sup> in kleineren Teilen verkauft, der grössere Teil wird als Frischkompost gratis abgegeben bis ausgebracht. Für Strom wird in der Regel Fr. 0,12 bis Fr. 0,16 pro kWh bezahlt. Würde die ganze Menge Kompost zu Fr. 50.– pro m<sup>3</sup> als Reifkompost verkauft, ergäbe sich ein Ertrag von Fr. 33.– pro Tonne Grüngut (432 kg mit spezifischem Gewicht von 0,65). Demgegenüber stehen Fr. 16.– für 100 kWh Stromverkauf bei 100% Vergärung. Aufgrund dieses Verhältnisses könnte maximal drei Viertel dem Kompost alloziert werden. Wird nur ein kleinerer Teil des Grüngutes vergärt, nimmt der Ertrag aus dem Strom noch ab. Wird jedoch der ganze Kompost gratis abgegeben, würde die Allokation aus ökonomischer Sicht vollständig dem Strom zufallen. Wird jedoch der Wert von Kompost als Ersatzwert von Mineraldünger berechnet, ergibt sich ein Betrag zwischen Fr. 5.– und Fr. 10.–. Wie aus Umfragen bei Landwirten mit Kompostanwendungserfahrung hervorging, schätzen die Landwirte den Wert der organischen Substanz mindestens ebenso hoch ein wie den Wert der Nährstoffe. Eine mögliche Allokation aufgrund dieser Preisermittlung liegt bei rund Fr. 10.– für den Kompost und eine ähnliche Grösse bei 60% Vergärung, also bei einer Allokation von 50% zu 50%.

Um diese Frage den Entscheidungsträgern einfacher darzustellen, werden fünf Allokationsvarianten präsentiert (Tab. 14). Eine wahrscheinliche Allokation liegt wahrscheinlich im mittleren Bereich. In den Resultaten werden jeweils die reinen Kompostiervarianten auch dargestellt.

**Tab. 14: Varianten für die Allokation zu Strom und Kompost**

<b>Allokation</b>	<b>Strom</b>	<b>Kompost</b>
Variante 1	100%	0%
Variante 2	75%	25%
Variante 3	50%	50%
Variante 4	25%	75%

Variante 5	0%	100%
------------	----	------

Bei den Resultaten werden vor allem die verschiedenen Belastungen zwischen dem Kompost und dem Strom nach diesen fünf Varianten aufgeteilt. Damit ergibt sich auch die Möglichkeit eines direkten Vergleichs mit Photovoltaik- und Windstromanlagen, weil dazu Ergebnisse für die Stromproduktion bereits vorliegen. Ausgewählte Sachbilanzgrössen für Windstrom (Typ Grenchenberg) und Solarstrom (Typ 3kWp m-SiPan/auf) werden aus dem Ökoinventar für Energiesysteme (ESU 1996) in den Grafiken mitberücksichtigt.

Nach ISO/FDIS 14041 soll nach Buxmann (1998) die Allokation in 5 Schritten vorgenommen werden. Im 1. Schritt sind die Module zu identifizieren, bei denen eine Allokation notwendig ist. Im 2. Schritt soll durch Systemaufteilung oder –erweiterung versucht werden, eine Allokation zu vermeiden. Wenn die Allokation unvermeidlich ist, soll im 3. Schritt ein physikalischer Parameter gesucht werden, der naturwissenschaftlich begründet werden kann. Wenn kein physikalischer Faktor eindeutig begründet werden kann, sind im 4. Schritt andere Kriterien heran zu ziehen, z.B. ökonomische Kriterien, sofern sie besser begründbar sind. Als 5. Schritt ist eine Überprüfung (Massenbilanzen, ev. Sensitivitätsanalysen) bei verschiedenen Allokationssätzen vorzunehmen.

Weil die Produkte Kompost und Strom aus der Vergärung starr gekoppelt sind, lässt sich eine Allokation nicht vermeiden. Die Hauptmotivation für die Vergärung stammt jedoch klar aus der Abfallentsorgung und deren Bezahlung. Weil jedoch die Entsorgung von Grüngut auch in den alternativen Entsorgungsvarianten Emissionen in einer ähnlichen Grössenordnung verursacht, kann die Entsorgung als Ursache des Prozesses betrachtet werden, jedoch die Allokation nicht verhindern. Die Schlussfolgerung, bei der Kompostierung entstehen ähnlich grosse Emissionen, deshalb seien die Emissionen der Vergärung vollständig dem Kompost zu allozieren und der Strom stehe als blütenweisses Produkt da, klingt etwas gar einseitig gefärbt. Wie aus Tab. 16, Vergleich der Verfahren pro kg Kompost ohne Stromgutschriften, ersichtlich ist, liegen die meisten Vorteile auf Seiten der Kompostierverfahren. Daher wäre es möglich zusätzliche Emissionen der Vergärung anzulasten.

Um die Entscheidung möglichst wissenschaftlich korrekt fällen zu können, sind auch die Resultate zu betrachten. Diese Untersuchung soll die Sachdaten sauber darlegen. Der Entscheid, wie zu allozieren ist, und wie hoch die Hürde für Ökostrom ist, ist durch andere Gremien zu fällen. Im folgenden Resultateteil soll die Entscheidung durch möglichst aufschlussreiche Darstellung erleichtert werden.

### 3. Resultate in der Sachbilanz

#### 3.1 Zusammengefasste Ergebnisse der Sachbilanz

**Tab.15: Kumulierte Ergebnisse pro kg Kompost mit Stromgutschriften bei den Gärverfahren**

		KG	KO	VG mit*	VN mit*	VO mit*
Flächeninanspruchnahme III-IV	m <sup>2</sup> a	0.00079	0.00086	0.00063	0.00056	0.00070
<b>POTENTIELLE ENERGIE</b>	TJ	1.62E-06	1.06E-07	-2.22E-07	-1.44E-06	-7.08E-07

**Strom	TJ	2.21E-06	1.67E-07	-2.62E-07	-1.90E-06	-9.12E-07
**Transport Schiene	tkm	0.01340	0.00635	0.00980	0.00902	0.01230
**Transport Strasse	tkm	0.01930	0.02310	0.01690	0.01420	0.02200
**Transport Wasser	tkm	0.19300	0.15700	0.15700	0.13700	0.20900
Methan CH <sub>4</sub>	kg	0.04540	0.02280	0.05900	0.03110	0.04880
CO <sub>2</sub> feuerungsbedingt	kg	0.10400	0.10800	0.46000	0.99000	0.66600
CO <sub>2</sub> mobil	kg	0.03310	0.03340	0.03290	0.03250	0.03370
CO <sub>2</sub> prozessbedingt	kg	-0.12300	-0.06450	-0.53600	-0.99300	-0.67600
CO <sub>2</sub> total	kg	0.01430	0.07700	-0.04330	0.02900	0.02450
Stickoxid NO <sub>x</sub>	kg	0.00068	0.00109	0.00079	0.00082	0.00119
Schwefeldioxid SO <sub>x</sub>	kg	0.00036	0.00020	0.00021	0.00014	0.00026
Kohlenmonoxid CO total	kg	0.00049	0.00049	0.00071	0.00098	0.00094
NH <sub>3</sub> Ammoniak p	kg	0.00010	0.00195	0.00039	0.00106	0.00135
Sulfate	kg	0.00175	0.00176	0.00126	0.00074	0.00126
	m <sup>3</sup>	1.50E-08	1.11E-09	-1.84E-09	-1.30E-08	-6.28E-09
<b>RADON RN222 TOTAL</b>	kBq	362	27	-44	-312	-150

mit\* bedeutet mit Stromgutschriften für die ins Netz eingespeiste Strommenge

\*\* Die Emissionen der Transporte sind in den andern Emissionsaspekten bereits mitberücksichtigt.

Die favorisierten Verfahren pro Aspekt sind in Tabelle 15 schraffiert dargestellt. Die meisten schraffierten Felder sind beim Verfahren VN zu finden, am zweitmeisten bei KG, gefolgt von KO. Allerdings wird diese Art Rangierung der Sache nicht gerecht. Nicht alle Emissionsaspekte weisen die gleiche Bedeutung auf. Weiter ist VN das Verfahren mit dem grössten Stromertrag. Deshalb wird VN vor allem bei den stromabhängigen Aspekten favorisiert, in der Regel aber gefolgt von VO und VG. Der wichtige Aspekt, in dem KO favorisiert wird, ist die Methanemission. KO liegt hier rund einen Drittel tiefer als VN. KG wird in einigen Aspekten favorisiert, in denen die Gärverfahren durch die Biogasverbrennung belastet werden z.B. CO, NO<sub>x</sub> und CO<sub>2</sub> f. KG ist aber auch Favorit bei der Ammoniakemission, rund 4x besser als VG und 10x besser als VN. Bei VN stammt der Grossteil der Ammoniakemission von der Presswasserausbringung.

**Tab.16: Kumulierte Ergebnisse pro kg Kompost ohne Stromgutschriften**

		KG	KO	VG ohne	VN ohne	VO ohne
Flaecheninanspruchnahme III-IV	m <sup>2</sup> a	0.000785	0.000857	0.00064	0.000591	0.00072
<b>POTENTIELLE ENERGIE</b>	TJ	1.62E-06	1.06E-07	2.41E-07	1.23E-07	1.68E-07
<b>WASSERKRAFT</b>						
Strom	TJ	2.21E-06	1.67E-07	3.60E-07	1.96E-07	2.64E-07
Transport Schiene	tkm	0.0134	0.00635	0.0105	0.0113	0.0136
Transport Strasse	tkm	0.0193	0.0231	0.0173	0.0154	0.0227

Transport Wasser	tkm	0.193	0.157	0.166	0.167	0.225
Methan CH <sub>4</sub>	kg	0.0454	0.0228	0.059	0.0311	0.0489
CO <sub>2</sub> feuerungsbedingt	kg	0.104	0.108	0.465	1.01	0.676
CO <sub>2</sub> mobil	kg	0.0331	0.0334	0.033	0.0329	0.0339
CO <sub>2</sub> prozessbedingt	kg	-0.123	-0.0645	-0.537	-0.996	-0.677
CO <sub>2</sub> total	kg	0.0143	0.077	-0.0388	0.0441	0.033
Stickoxid NO <sub>x</sub>	kg	0.000676	0.00109	0.000796	0.000851	0.00121
Schwefeldioxid SO <sub>x</sub>	kg	0.000362	0.000196	0.000244	0.00026	0.000329
Kohlenmonoxid CO total	kg	0.000493	0.000493	0.000721	0.00102	0.000961
NH <sub>3</sub> Ammoniak p	kg	0.0000979	0.00195	0.00039	0.00106	0.00135
Sulfate	kg	0.00175	0.00176	0.00138	0.00116	0.00149
<b>SCHWACH- UND MITTEL-RADIOAKTIVE ABFÄLLE</b>	m <sup>3</sup>	1.50E-08	1.11E-09	2.41E-09	1.29E-09	1.75E-09
<b>RADON RN222 TOTAL</b>	kBq	362	27	58.5	31.6	42.8

Aufgrund der Tabelle 16 lässt sich kaum ein klarer Favorit zwischen den fünf Verfahren ermitteln. KO weist am meisten, VN am zweitmeisten schraffierte Felder auf. Im Vergleich mit Tabelle 15 zeigt sich vor allem, welche Aspekte durch die Stromlieferung ins Netz zugunsten der Gärverfahren beeinflusst worden sind. Die Darstellung in Tab. 16 ist in dem Sinne nicht praxisnah, weil zwar die Emissionen aus der Biogasverbrennung eingesetzt sind, aber weder Wärme noch Strom als Nutzen eingesetzt ist. Typisch erhöht sind infolge der Biogasverbrennung in den Blockheizkraftwerken die feuerungsbedingte Menge CO<sub>2</sub>, das CO und etwas NO<sub>x</sub>. Die emittierte Menge SO<sub>x</sub> wird durch die Biogasverbrennung kaum erhöht.

**Tab. 17: Kumulierte Ergebnisse pro 1 TJ Strom produziert mit und ohne Nährstoffgutschriften für Kompost**

		VG mit*	VG ohne	VN mit*	VN ohne	VO mit*	VO ohne
Flächeninanspruchnahme III-IV	m <sup>2</sup> a	365	1210	2.38	332	221	720
<b>POTENTIELLE ENERGIE WASSERKRAFT</b>	TJ	0.203	0.456	0.0304	0.0691	0.0868	0.168

Strom	TJ	0.253	0.681	0.000253	0.11	0.0881	0.264
Transport Schiene	tkm	1450	19800	-3900	6320	186	13600
Transport Strasse	tkm	4880	32700	-5120	8630	2940	22700
Transport Wasser	tkm	-11400	314000	-100000	94000	-25600	225000
Methan CH <sub>4</sub>	kg	52700	111000	10900	17500	29000	48900
CO <sub>2</sub> feuerungsbedingt	kg	313000	880000	257000	566000	300000	676000
CO <sub>2</sub> mobil	kg	27600	62300	9790	18500	18300	33900
CO <sub>2</sub> prozessbedingt	kg	-682000	-1020000	-558000	-560000	-605000	-677000
CO <sub>2</sub> total	kg	-342000	-73400	-291000	24800	-287000	33000
Stickoxid NO <sub>x</sub>	kg	495	1510	85.7	478	506	1210
Schwefeldioxid SO <sub>x</sub>	kg	-225	460	-350	146	-246	329
Kohlenmonoxid CO total	kg	553	1360	271	571	481	961
NH <sub>3</sub> Ammoniak p	kg	350	736	381	596	810	1350
Sulfate	kg	955	2610	132	652	609	1490
<b>SCHWACH- UND MITTEL-RADIOAKTIVE ABFÄLLE</b>	m <sup>3</sup>	0.00174	0.00455	0.00004	0.00073	0.00063	0.00175
<b>RADON RN222</b>	kBq	41400000	110000000	239000	17700000	14500000	42800000
<b>TOTAL</b>							

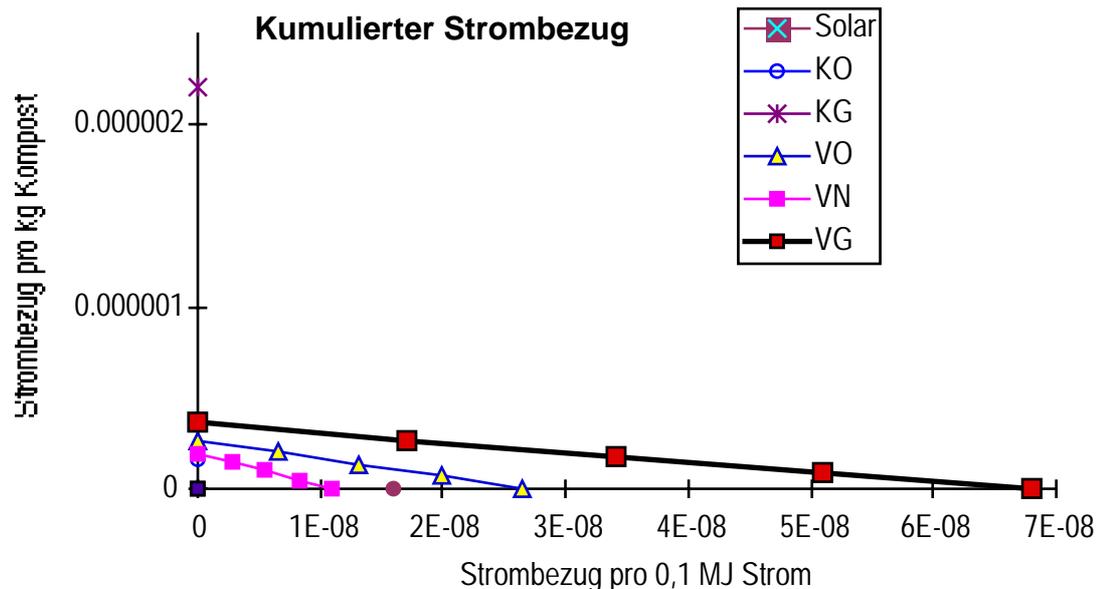
mit\* bedeutet mit Nährstoffgutschriften für im Kompost enthaltene Nährstoffmengen (N, P, K, Ca, Mg)

Der Vergleich zwischen den Gärverfahren in Tabelle 17 zeigt die Überlegenheit von VN bezogen auf 1 TJ Stromlieferung ins Netz. Weiter ist der grosse Einfluss der Nährstoffgutschriften auf das gesamte Resultat ersichtlich. Häufig ist der Unterschied zwischen den Verfahren kleiner als bei der Unterscheidung ob mit oder ohne Nährstoffgutschriften. In den nachfolgenden Grafiken wird die Grundannahme mit den Nährstoffgutschriften verwendet. Weil die Strommenge pro t Abfall bei den verschiedenen Verfahren nicht gleich hoch ist, verlaufen die Linien nicht wie pro kg Kompost parallel.

### 3.2 Ausgewählte Resultate pro kg Kompost und pro 0,1 MJ Strom in den 5 Varianten alloziert

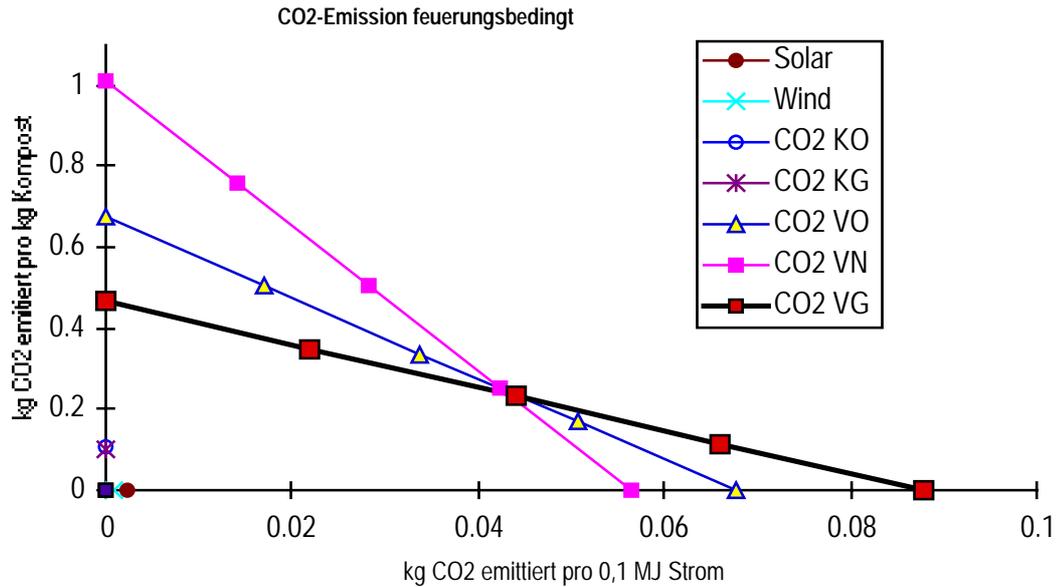
In Abbildung 4 ist der kumulierte Strombezug der Verfahren auf der Ordinate pro kg Kompost und auf der Abszisse pro 0,1 MJ Stromproduktion dargestellt. Die Abszisse wurde in dieser Grösse gewählt, um eine ähnliche Grösse wie bei Kompost zu

erhalten. Die Punkte auf der Ordinate gelten, wenn der ganze Strombezug dem Kompost alloziert wird, die Punkte auf der Abszisse, wenn er nur der Stromproduktion angelastet wird. Weil KO und KG keinen Strom produzieren, sind dazu nur Punkte auf der Ordinate zu finden. Am meisten Strom bezieht KG, am wenigsten KO. VN produziert am meisten Strom und bezieht gleichzeitig weniger als die andern Gärverfahren, VG produziert am wenigsten und bezieht von den Gäranlagen am meisten, VO liegt in der Mitte. Die Emissionen des Strombezugs sind allerdings in den Schadenkategorien wie den radioaktiven Abfällen etc. enthalten.

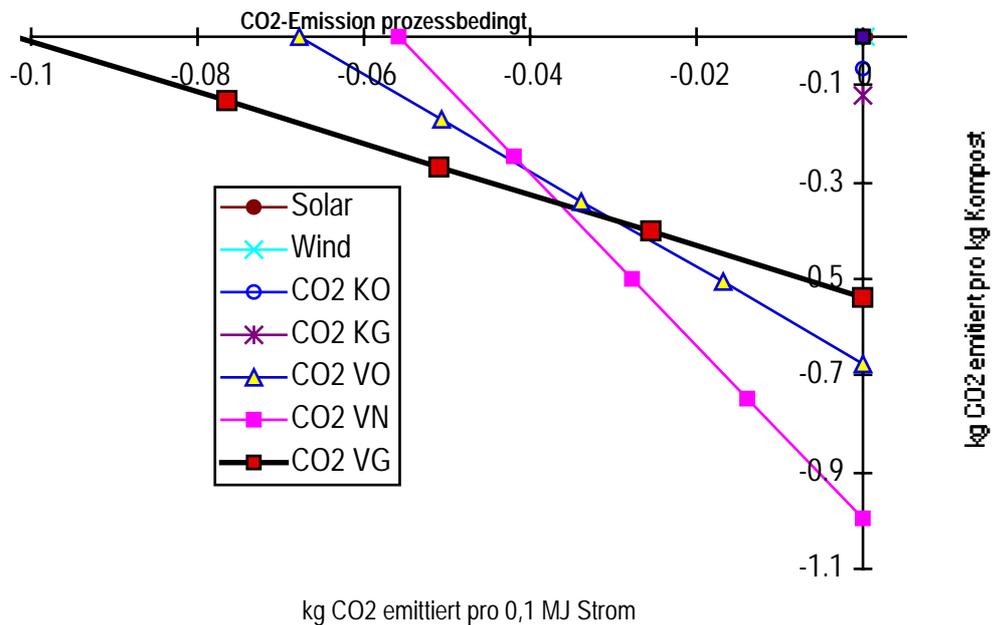


**Abb. 4:** Kumulierter Strombezug der Verfahren KG, KO, VG, VO und VN pro kg Kompost oder pro 0,1 MJ Stromproduktion mit 100%/0%, 75%/25%, 50%/50%, 25%/75% und 0%/100% zu Kompost/ Strom alloziert.

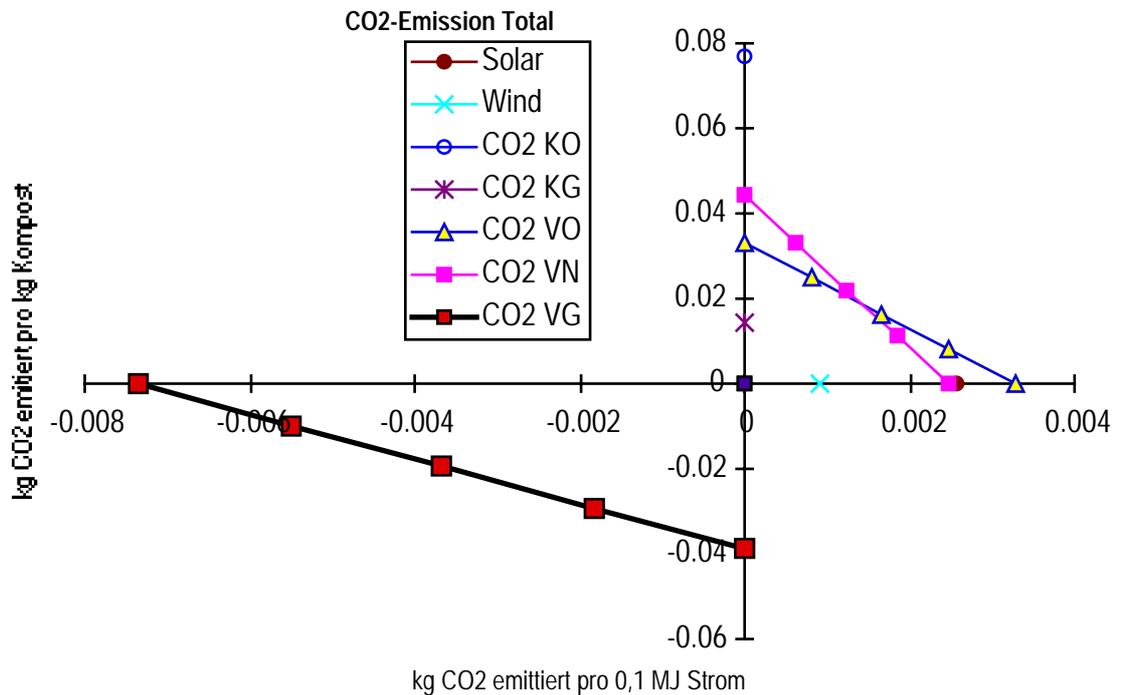
Die folgenden drei Abbildungen betreffen die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dabei gilt die Annahme, dass die biogene Herkunft des biologisch abgebauten Kohlenstoffs mit entsprechenden Gutschriften bewertet wird. Die feuerungsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Vergärungsvarianten werden durch entsprechende negative Werte im Prozess kompensiert. Daraus resultiert in der Summe (CO<sub>2</sub> total) ein Wert, der für die meisten Anlagen nahe bei null liegt. Weil der biologische Abbau für alle gleich mit 55% des gesamten Kohlenstoffs angenommen wurde, ist die CO<sub>2</sub>-Emission von VG durch grosse Methanmengen – die auch biogenen C enthalten – sogar leicht negativ. Allerdings ist Methan rund zwanzigmal stärker treibhausaktiv als CO<sub>2</sub>, weshalb das in der Gesamtbewertung für VG nicht zum Guten führen wird.



**Abb. 5:** Kumulierte feuerungsbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der Verfahren KG, KO, VG, VO und VN pro kg Kompost oder pro 0,1 MJ Stromproduktion mit 100%/0%, 75%/25%, 50%/50%, 25%/75% und 0%/100% zu Kompost/ Strom alloziert.



**Abb. 6:** Kumulierte prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der Verfahren KG, KO, VG, VO und VN pro kg Kompost oder pro 0,1 MJ Stromproduktion mit 100%/0%, 75%/25%, 50%/50%, 25%/75% und 0%/100% zu Kompost/ Strom alloziert.



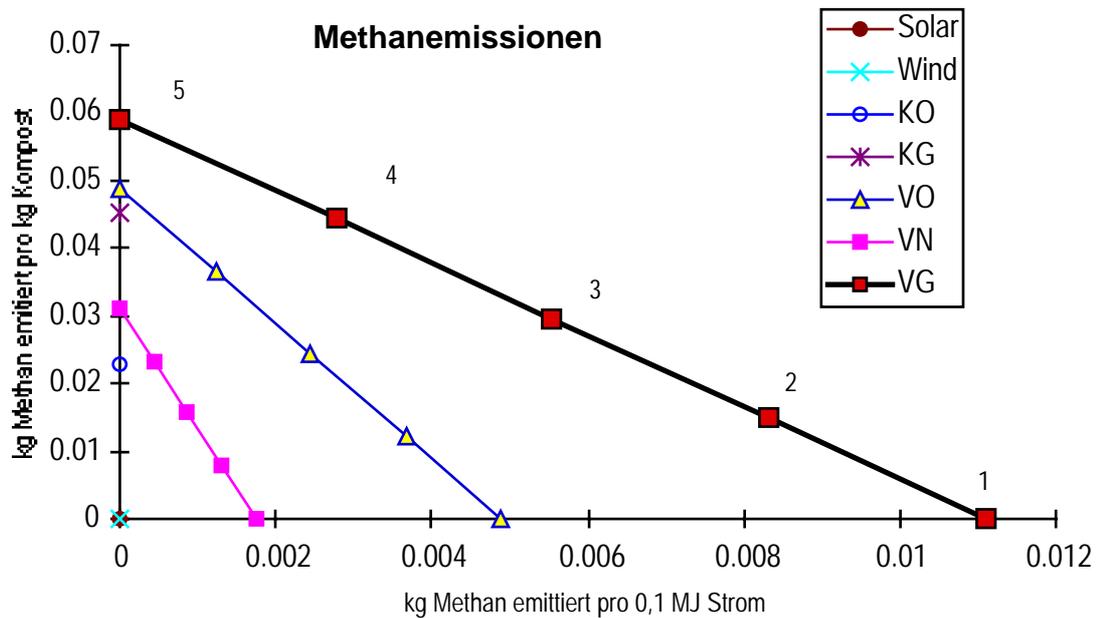
**Abb. 7:** Kumulierte CO<sub>2</sub>-Emissionen der Verfahren KG, KO, VG, VO und VN pro kg Kompost oder pro 0,1 MJ Stromproduktion mit 100%/0%, 75%/25%, 50%/50%, 25%/75% und 0%/100% zu Kompost/ Strom alloziert.

Bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen sind auf der Abszisse auch die Werte des Solar- und des Windstroms eingezeichnet. Nur VO liegt etwas höher als die Solarvariante, die andern Vergärungsverfahren liegen bei 100% Strom-Allokation tiefer. Bei 50%/50%-Allokation zwischen Kompost und Strom sind alle Gärverfahren besser als die Photovoltaik, VO und VN sind dabei nahe bei der Windenergieanlage. KG ist infolge hoher Methanemissionen (bei einheitlichem C-Abbau) leicht negativ.

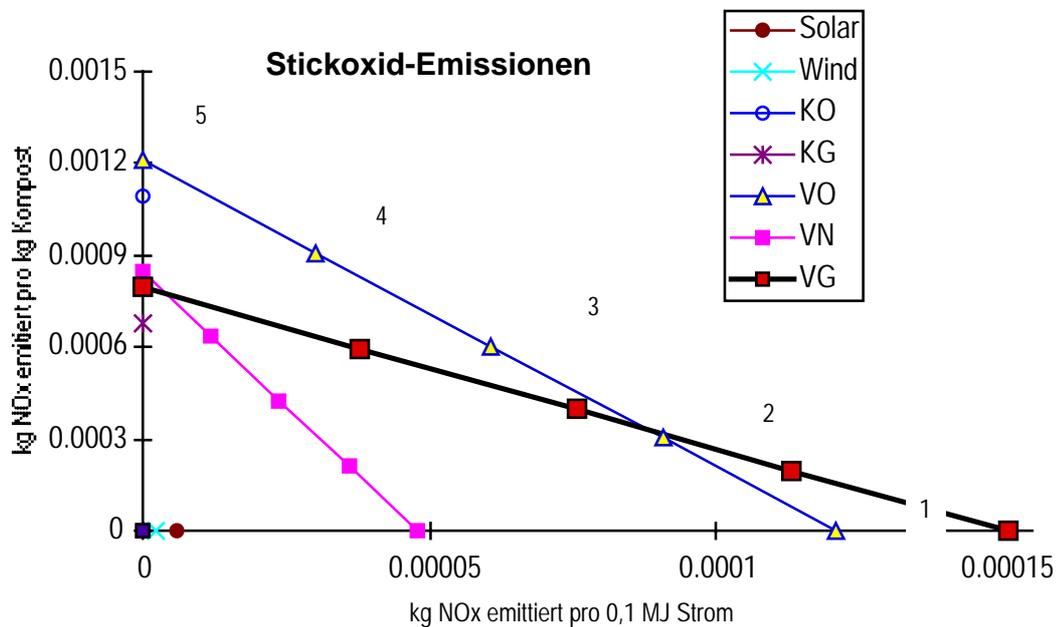
Methan, das im Kompostierprozess gebildet wird und an die Umwelt gelangt, wird von VG und VO am meisten und von KO am wenigsten emittiert, wenn als Bezug das kg Kompost gewählt wird (Abb.8). Allozieren wir jedoch zu 50% dem Kompost und zu 50% dem produzierten Strom (Allokationsvariante 3), wird KG zum grössten und VN zum kleinsten Emittenten. Unter den Vergärungsverfahren bleibt VG der grösste Emittent vor VO.

Die Stickoxidemissionen sind in Abbildung 9 dargestellt. Am meisten Stickoxid wird bei VO vor KO, am wenigsten bei KG emittiert. Die Stickoxidemission stammt vor allem von den mobilen Dieselmotoren, ein kleinerer Teil wird auch durch die Methanverbrennung in den BHKW verursacht, zwischen 8% und 15% sind auf die Infrastruktur zurückzuführen. Auch hier ist die Allokation von grosser Bedeutung: Bei Variante 3, je 50% zu Kompost und Strom, sind KO vor KG die grössten Emittenten. Wird 100% dem Strom alloziert, erreicht VO mit VG einen Gleichstand, weil VO rund

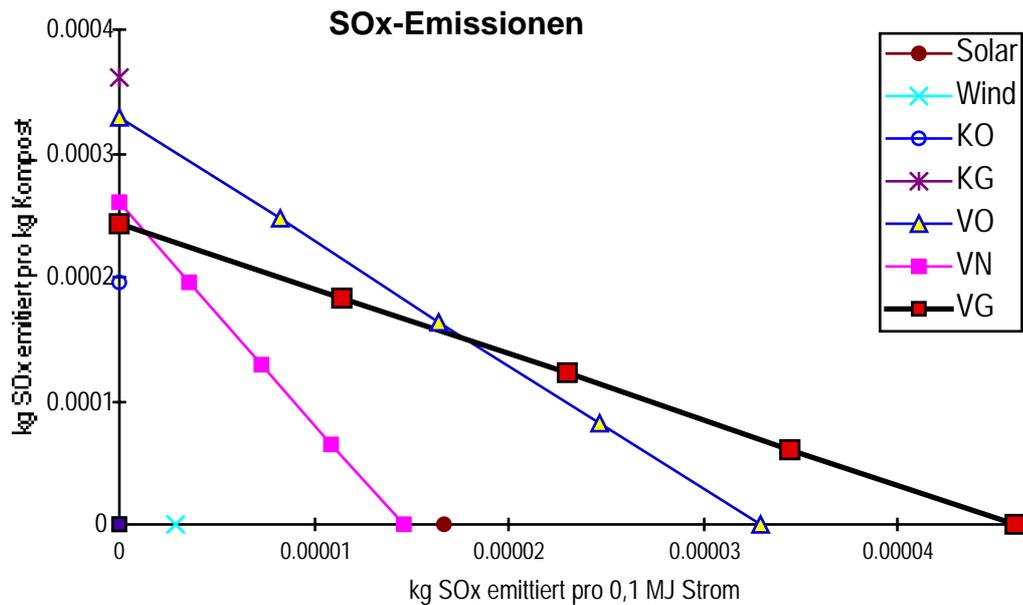
die Hälfte mehr Strom produziert. Auch hier bleibt VN, die maximale Vergärungsvariante, mit Abstand der Favorit.



**Abb. 8:** Kumulierte kg Methanemission der Verfahren KG, KO, VG, VO und VN pro kg Kompost oder pro 0,1 MJ Stromproduktion mit Allokationen 1 bis 5 (Tab. 14.)



**Abb. 9:** Kumulierte kg Stickoxidemission der Verfahren KG, KO, VG, VO und VN pro kg Kompost oder pro 0,1 MJ Stromproduktion mit Allokationen 1 bis 5 (Tab. 14.)

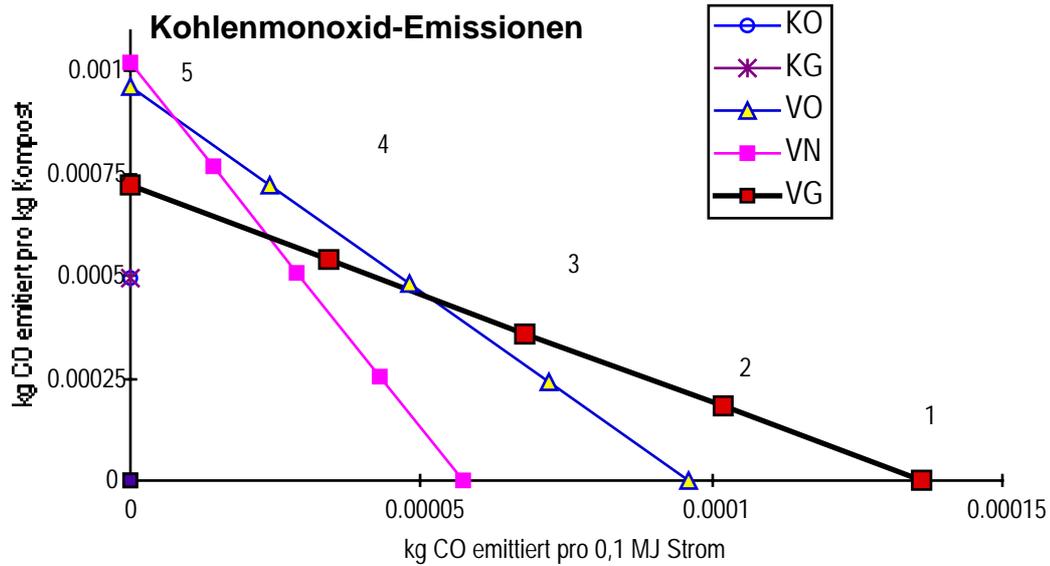


**Abb. 10:** Kumulierte kg Schwefeloxidemission der Verfahren KG, KO, VG, VO und VN pro kg Kompost oder pro 0,1 MJ Stromproduktion mit Allokationen 1 bis 5 (Tab. 14.)

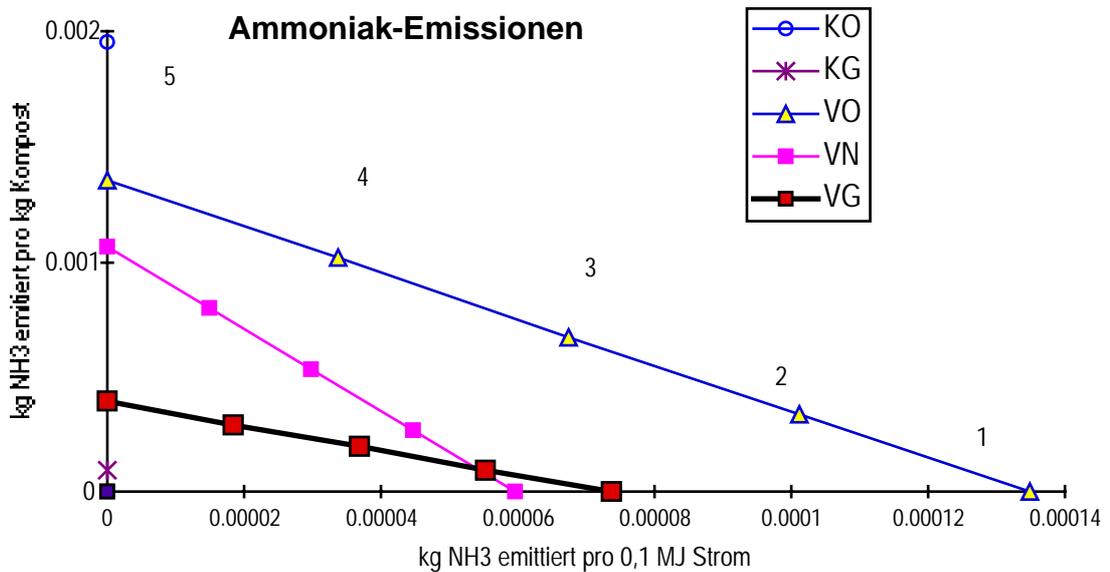
Die Schwefeloxidemissionen (Abb. 10) sind bei KG vor VO am höchsten und bei VN am tiefsten. Sie stammen bei KG zu knapp 50% aus der Infrastruktur und sind bei der Stromproduktion negativ. Bei der Infrastruktur weist VO die höchsten Emissionen aus, beim Betrieb die zweithöchsten. Bei 50% Allokation zur Stromproduktion sind KG vor KO die grössten Emittenten. Hier zeigt sich eine grosse Differenz aus der Wahl des Strommixes CH zum Strommix UCPT. In UCPT resultiert eine viel höhere Schwefeloxidemission pro Stromeinheit, was bei der Vergärung zu grösseren Gutschriften führt (Edelmann und Schleiss 1999).

Die Kohlenmonoxidemissionen sind insgesamt klein und in der Gesamtbewertung nicht sehr wichtig. Dennoch zeigt sich hier einmal ein vollständig anderes Bild, in dem die Gärverfahren mit VN vor VO und VG die höchsten Emissionen aufweisen. Sie stammen zum grossen Teil aus den grossen Biogasmengen, die im BHKW verbrannt werden und zu einem kleineren Teil aus den mobilen Dieselmotoren. Erst bei der Allokation von 50% und mehr zur Stromproduktion wird ein Gleichstand mit KG und KO erreicht.

Die Ammoniakemissionen in die Luft der fünf Verfahren liegen bei KO am höchsten gefolgt von VO und VN. Die geschlossenen Verfahren VG und KG liegen am tiefsten. Je stärker allerdings dem Strom alloziert wird, umso näher kommt VN dem Verfahren VG. Die Ammoniakemissionen sind relativ stark an der Versauerungswirkung beteiligt.

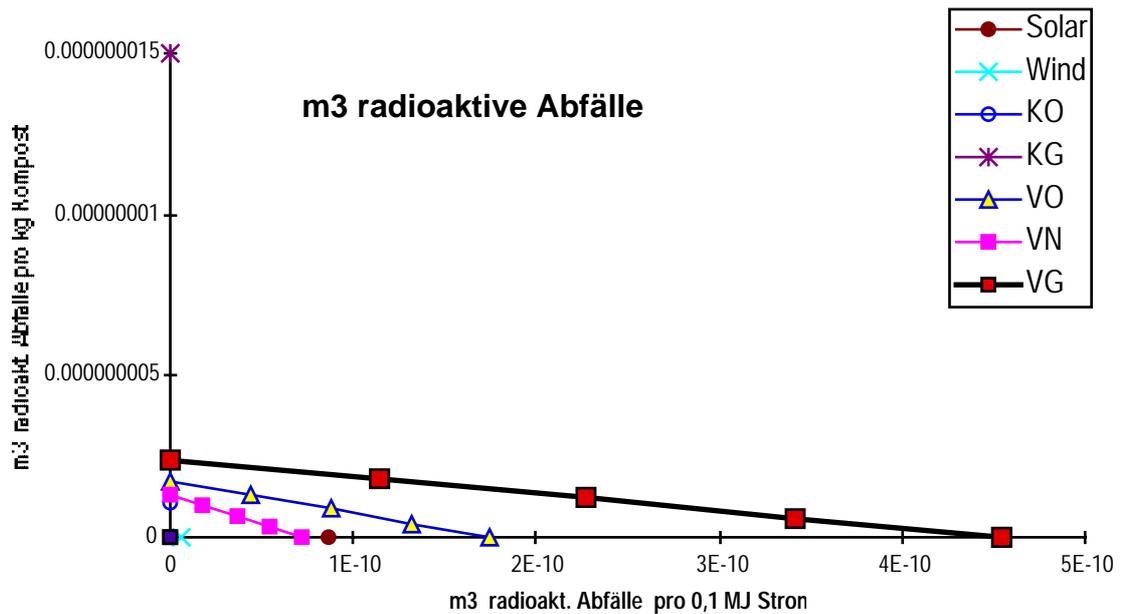


**Abb. 11:** Kumulierte kg Kohlenmonoxidemission der Verfahren KG, KO, VG, VO und VN pro kg Kompost oder pro 0,1 MJ Stromproduktion mit Allokationen 1 bis 5 (Tab. 13.)



**Abb. 12:** Kumulierte kg Ammoniakemission der Verfahren KG, KO, VG, VO und VN pro kg Kompost oder pro 0,1 MJ Stromproduktion mit Allokationen 1 bis 5 (Tab. 13.)

Die Menge schwach und mittel radioaktiver Abfälle ist ein Mass dafür, wieviel Schweizer Strom bezogen oder ins Netz gespeist wird, weil im Schweizer Strommix der Nuklearstrom rund 40% ausmacht. Aus Abbildung 13 ist ersichtlich, dass die Gärverfahren in der Bilanz Stromlieferanten sind. Hingegen brauchen die Kompostieranlagen Strom und verursachen deshalb radioaktive Abfälle mit. Nur VN liegt bei 100% Stromallokation tiefer als die Windanlage. Die Solaranlage ist nur besser als VG, falls zu über 50% dem Strom alloziert wird.



**Abb. 13:** Kumulierte  $m^3$  radioaktive Abfälle der Verfahren KG, KO, VG, VO und VN pro kg Kompost oder pro 0,1 MJ Stromproduktion mit Allokationen 1 bis 5 (Tab. 13.)

Die letzten zehn Abbildungen haben gezeigt, dass eine Allokation von je 50% zu Kompost und Strom den Gärverfahren durchwegs einen Vorteil gegenüber den Kompostierverfahren erbringt. Bei einigen Aspekten liegt die Vergärung bereits bei 100% Allokation zu Kompost günstiger. Die zehn beschriebenen Aspekte sind jedoch eine beschränkte Auswahl, die nur einen groben Überblick vermitteln können. Weiter ist zu erwähnen, dass der kumulierte Strombezug und die Transportemissionen nur Zwischengrößen darstellen, deren Emissionen in den kumulierten Emissionen (Methan,  $NH_3$ , CO,  $NO_x$  etc.) enthalten sind.

### 3.3 Bewertungen mit Ecoindicator und Umweltbelastungspunkten (UBP)

In der Bewertung Kompost ab Verfahren (Abb. 14) mit Ecoindicator 95+ fällt auf, dass neben dem Wintersmog, dem Photosmog, dem Treibhauseffekt und der Versauerung die Schwermetalle erst den fünftwichtigsten Emissionsaspekt darstellen. Im Vergleich zum Ecoindicator 95 ist hier die Radioaktivität zusätzlich bewertet, die bei den Vergärungsverfahren negativ ist (Frischknecht 1998). In dieser Bewertung fehlen Gutschriften für die Nährstoffe, aber für den Vergleich zwischen den Kompostherstellungsverfahren ist das nicht ein wichtiger Faktor. In der zweiten Betrachtung ist die Stromerzeugung aus den Gärverfahren dargestellt (Abb. 15). Dabei zeigt sich der Vorzug der maximalen Vergärung gegenüber den andern Gärverfahren, wobei hier für die Nährstoffe Gutschriften eingesetzt sind.

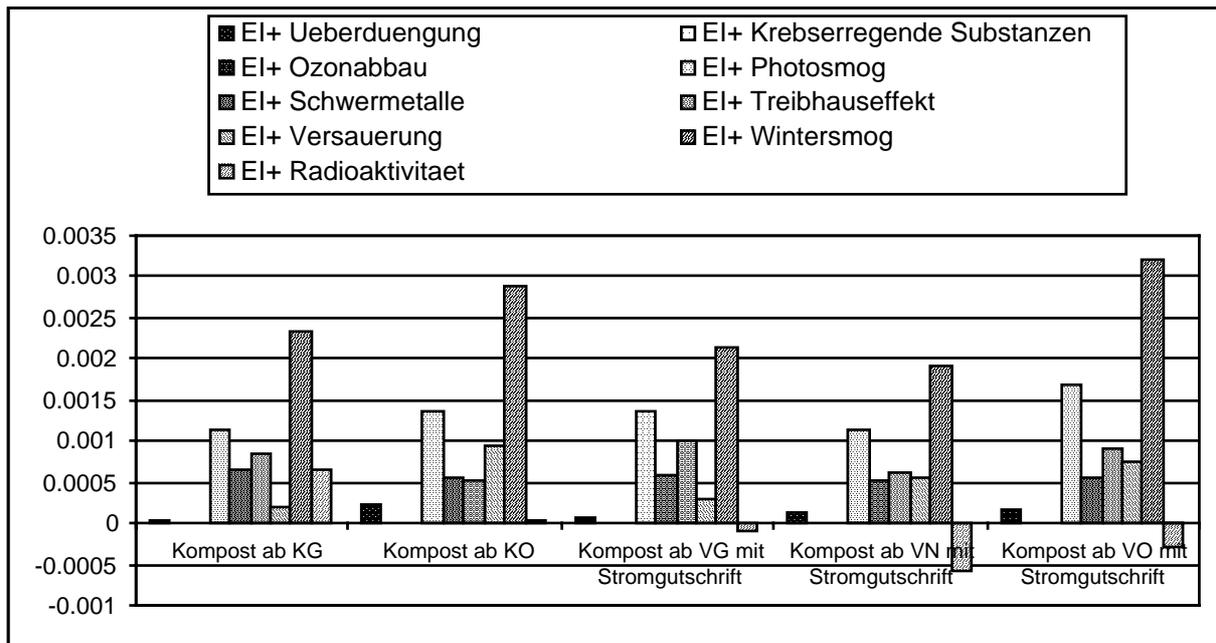


Abb. 14: Ecoindicatorpunkte pro kg Kompost ab KG, KO, VG, VN, VO mit Stromgutschriften

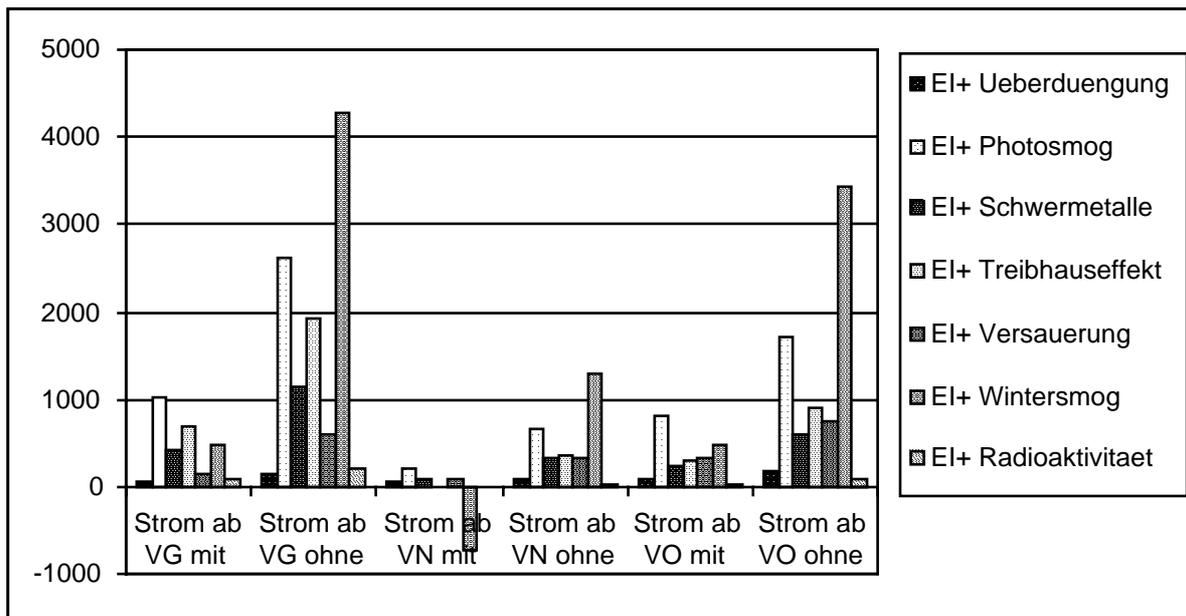


Abb. 15: Ecoindicatorpunkte pro TJ Strom ab VO, VN, VG mit oder ohne Nährstoffgutschriften

Werden die Nährstoffe gutgeschrieben, reduziert sich der Wintersmog sehr stark und der Photosmog wird zum hauptsächlichen Emissionsaspekt. Das zeigt auf, dass für die Herstellung von Mineraldüngern grosse Energiemengen und Transporte notwendig sind. Weil Ecoindicator die Schwermetalle in Boden nicht wertet, wiegt dieser Aspekt im Vergleich zu den UBP der folgenden Abbildungen verhältnismässig viel schwächer.

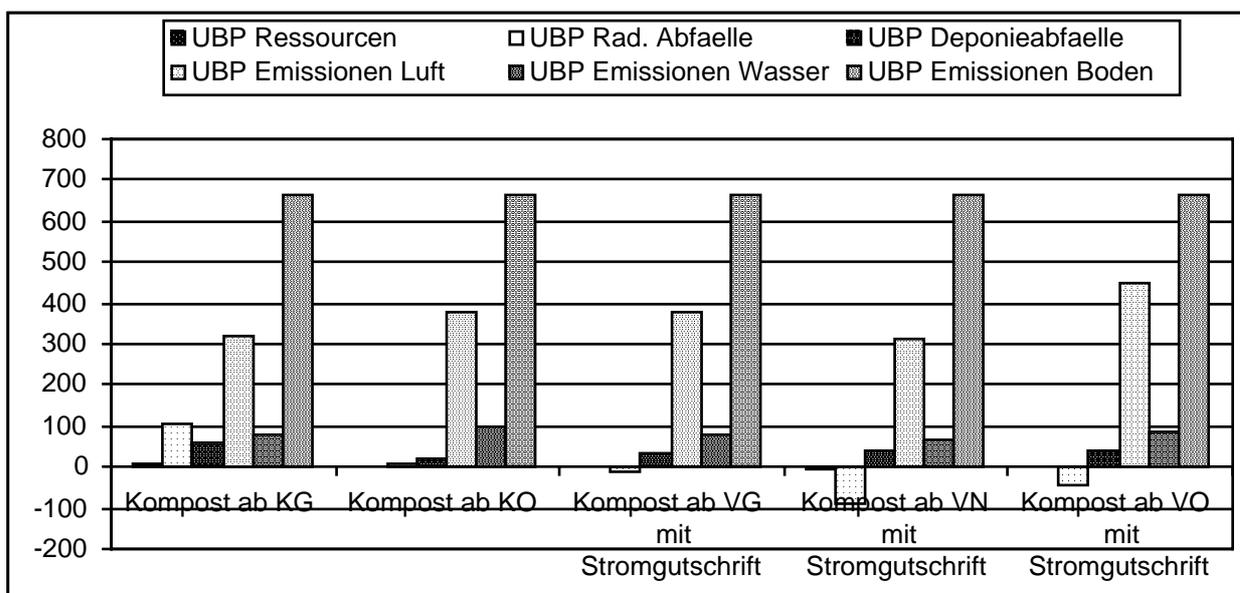


Abb. 16: Umweltbelastungspunkte pro kg Kompost ab KG, KO, VG, VN, VO mit Stromgutschriften

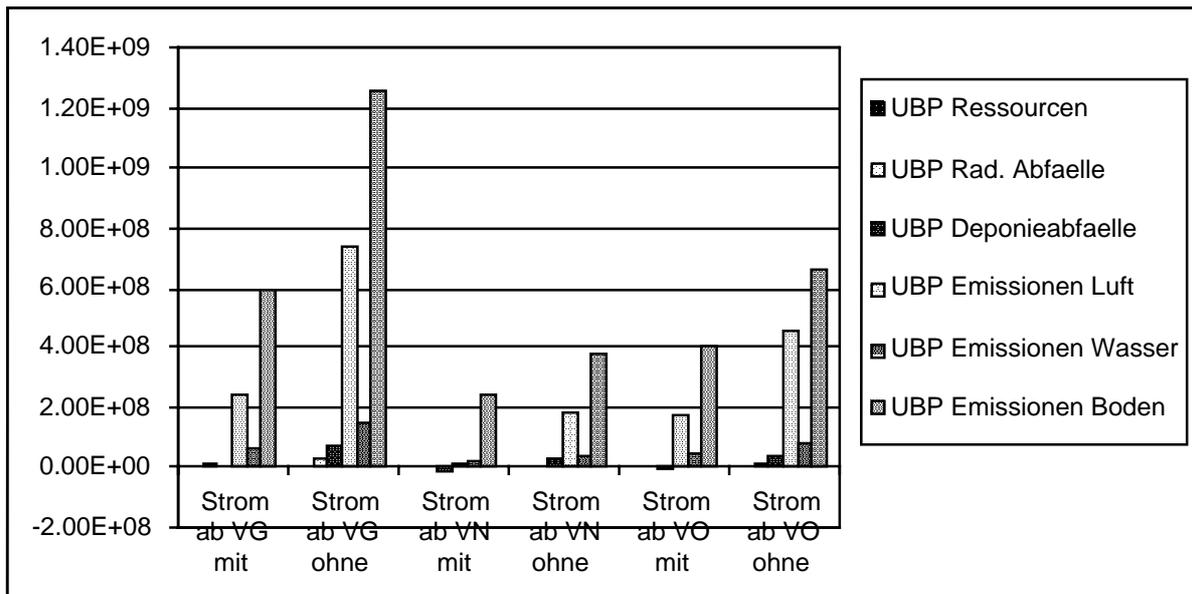


Abb. 17: Umweltbelastungspunkte pro TJ Strom ab VO, VN, VG mit oder ohne Nährstoffgutschriften

In Abb. 16 fällt bei den Umweltbelastungspunkten der überwiegende Einfluss der Schwermetalle auf, mit denen die Emissionen Boden zu rund 60% der Gesamtbelastung führt. Die negative Radioaktivität ist eine Folge der Stromgutschriften. In Abbildung 17 wird wiederum VN mit der grössten Stromproduktion und den kleinsten Belastungen pro TJ favorisiert. Ob VG auch als Ökostrom akzeptiert wird, dürfte zu einer Schlüsselfrage werden.

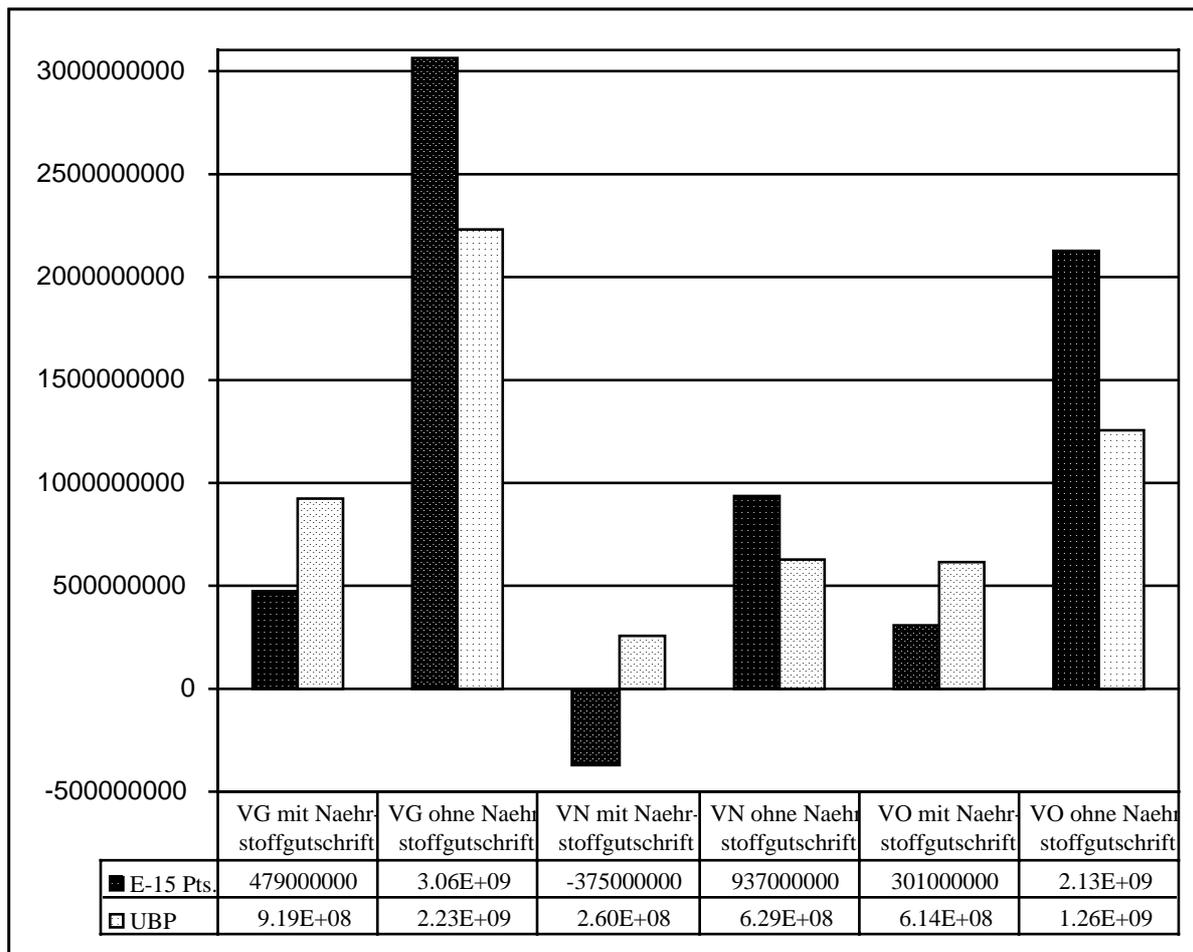


Abb. 18: EI 95 und UBP pro TJ Strom ab VG, VN und VO mit oder ohne Nährstoffgutschriften

Die Abbildung 18 zeigt, dass sich die Bewertungen von Ecoindicator und UBP nicht widersprechen. Mit Ecoindicator ist die Differenz zwischen der grössten und der kleinsten Belastung etwas ausgeprägter, die kleinste Belastung wird mit den Nährstoffgutschriften gar leicht negativ. Wenn diese Gutschriften gegeben werden, wird die Differenz zwischen den Verfahren bedeutend kleiner. Aus den obigen Ausführungen (S. 18 und Tab. 11) ist die Gutschrift berechtigt, weil der Kompost nur zum kleinsten Teil an den Nährstoffüberschüssen in der Schweizer Landwirtschaft beteiligt ist. Die Fragen um die Nährstoffsituation in der Schweiz müssen in einem grösseren Zusammenhang betrachtet werden, aus der Kreislaufbetrachtung ist die Nährstoffverwertung aus Kompost ökologisch sinnvoll.

## 4. Qualität der Daten und Unsicherheiten

Bei der Vergärung und Kompostierung handelt es sich neben der technischen Einrichtung (Gebäude, Asphaltflächen, Maschinen etc.) um biologische Prozesse. Die Reproduzierbarkeit von biologischen Prozessen ist bedeutend weniger gross als rein technische Daten wie die Härte eines Stahls oder der k-Wert eines Fensters. Entsprechend soll die Datenqualität getrennt für den technischen und den biologischen Teil beurteilt werden.

Beim technischen Teil sind die Infrastruktur und die Betriebsmittel die wichtigsten Aspekte. Die Infrastruktur wurde mit den Anlagenbetreibern vor Ort anhand von Bauabrechnungen etc. diskutiert. Häufig musste von den vorhandenen Bedingungen auf eine grüne Wiese ohne Pfählungsbedarf etc. umgerechnet werden, um den Verfahren nicht standortbedingte Nachteile erwachsen zu lassen. Aus diesem Grund sind die Asphaltflächen gleich aufgebaut, immer der gleiche Beton verwendet und ähnlich viel armiert worden. Von verschiedenen Partnern in der Praxis wurde erwähnt, sie würden einfacher bauen, als hier angenommen wurde. Eine Genauigkeit von  $\pm 20\%$  ist bei der Infrastruktur plausibel, wobei die Beton- und Schottermengen sicher weniger variieren als die Stahlmengen und -qualitäten. Auch beim elektromechanischen Teil und den Belüftungen wurde nur beschränkt Unterstützung durch Fachpersonal gesucht. Die Betriebsmittel wie Stromverbrauch und Dieserverbrauch sind soweit möglich abgelesene und statistisch über Jahre gesicherte Werte. Dass bei VO und VG der Anteil Stromverbrauch, der aus dem Netz bezogen wird, mit 20% bzw. 30% geschätzt werden musste, war leider aufgrund der fehlenden Praxiszahlen nicht zu vermeiden. Allerdings spielt es nicht eine grosse Rolle, falls die Gesamtstromproduktion und der -bedarf stimmt. Die Differenz zwischen dem Strom, der aus dem Netz bezogen und dem ins Netz eingelieferten dürfte nicht mehr so gross sein. Diese Grösse ist jedoch auch nur im Bereich von  $\pm 10 - 20\%$  gesichert. Der Dieserverbrauch mit den Emissionen aus den Motoren stellt mit rund  $\pm 10\%$  einen gut gesicherten Wert dar. Auch die Einsammlung des Grüngutes und die Abwasserseite scheinen zur Zeit nicht grössere Unsicherheiten zu verursachen. Die Kompostanalysen dürften recht genau und gut abgesichert sein. Weil bei den BHKW keine externe Wärmenutzung eingerechnet ist (weil bisher kaum Wärme verkauft werden konnte), würden die Resultate stark beeinflusst, sofern in den nächsten Jahren effizient Wärme verkauft würde.

Beim biologischen Prozess sind die standardisierten Annahmen mit 55% C-Abbau und gleicher Kompostqualität in der Praxis die grössten Unsicherheitsfaktoren. Alle Verfahren können zwar 55% des C abbauen, aber bei der aktuellen Behandlungszeit zwischen 4 und 12 Wochen bestehen berechtigte Zweifel, ob diese Annahmen in allen Praxisfällen richtig sind. Für die Annahmen spricht, dass die Vorgabe zumindest durch alle Verfahren erreicht werden könnte.

Die Methanemissionen bei der Kompostierung könnten durch eine effiziente Bearbeitung, vor allem nach der Vergärung, enorm gesenkt werden. Bei den biologischen Parametern (Methanemissionen,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  und Ammoniak) wird die Unsicherheit bei  $\pm 30\%$  veranschlagt und dürfte in den nächsten Jahren zu einer Nachmessung und Überprüfung Anlass geben.

Als wohl grösste Unsicherheit gilt jedoch das Vorgehen bei der Allokation. Würde noch die Wärme verkauft, ergäbe sich noch ein drittes gekoppeltes Produkt und

würde die Allokation noch weiter erschweren. Mit dem Vorschlag der Allokation von je 50% zu Kompost und Strom, kommt man eher den Interessen der Kompostierung entgegen. Aber neben der Forderung der separaten Verwertung von organischen Abfällen steht im Abfallgesetz des Kantons Zürich § 2, dass gesammeltes Grüngut vergärt werden soll. Im Energiegesetz des Kantons Zürich wird in § 12a ergänzt, dass die kompostierbaren Abfälle unter Ausschöpfung des Energiepotenzials zu marktfähigen Produkten zu verwerten sind, sofern dies technisch möglich und wirtschaftlich tragbar ist. Das sind vorbildliche Vorgaben, welche eine 50% zu 50%-Allokation unterstützen würden.

Die Allokationsfrage wird sich jedoch erst im Zusammenhang mit dem Entscheid stellen, ob ein Verfahren überhaupt Ökostrom-tauglich ist. Dabei haben die Verfahren VN und VO gute Chancen, während sich VG aufgrund der kleinen Stromnettoproduktion wahrscheinlich in einer kritischen Position befindet. Hier ist für die Akzeptanz der Resultate eine nachvollziehbare Begründung für eine bestimmte Allokationswahl von Bedeutung.

## 5. Literatur und Quellen

Abfallgesetz (1994), Gesetz über die Abfallwirtschaft (GS 712.1) Staatskanzlei, 8090 Zürich

Aebersold A. et al. (1993): Vergären oder Kompostieren. Entscheidungshilfen für die Systemwahl. Abschlussarbeit zum Nachdiplomstudiengang in Umweltlehre der Universität Zürich.

AGW (Amt für Gewässerschutz und Wasserbau), Jahresberichte 91-97, zu den Kompostier- und Vergärungsanlagen im Kanton Zürich, AWEL, Zürich.

AGW (1997): Kompostier- und Vergärungsanlagen im Kanton Zürich, Jahresbericht 1996, S.10, AWEL, Zürich.

Baehr H.D. (1989): Thermodynamik, 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin.

Braun M., Hurni P. und Spiess E. (1994) Phosphor- und Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft und Para-Landwirtschaft. Schriftenreihe der FAC Nr. 18, 70 S.

BRV (1998): BRV-Kombi-Anlagen für Vergärung und Kompostierung (zum Verfahren VG), BRV Project Management AG, Bôle.

Buxmann K. (1998): Behandlung von Allokationsproblemen nach ISO/FDIS 14041; in Ökobilanz-Allokationsmethoden: Modelle aus der Kosten- und Produktionstheorie sowie praktische Probleme in der Abfallwirtschaft - Vorbereitende Unterlagen zum 7. Diskussionsforum vom 24.6.98, ETH-Z./UNK, IWSBN 3-906734-00-5, S. 3 – 10.

Edelmann, W. und Engeli, H. (1996): Biogas aus festen Abfällen und Industrieabwässern; Eckdaten für PlanerInnen. Bern: Bundesamt für Konjunkturfragen.

Edelmann W., Brotschi H., Joss A. (1998): Kompostier- und Gäranlage „Allmig“ - Betriebsergebnisse und Energiebilanz, Schlussbericht, BFE, CH-3003 Bern.

Edelmann W. und Schleiss K. (1999): Ökologischer, energetischer und ökonomischer Vergleich zwischen Vergärung, Kompostierung und Kehrlichtverbrennung von Grüngut, Studie im Auftrag von Bundesamt für Energiewirtschaft und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

EGO (1998): Quartalsrechnungen 1998 an die Kompogas Region Furttal-Limmattal AG in Otelfingen der Elektrizitätsgenossenschaft Otelfingen.

Energiegesetz (1997), GS 730.1 ( 1983, nachgeführt 1997), Staatskanzlei, 8090 Zürich

Engeli H. (1999): Schwefelgehalt in Biogas, persönliche Mitteilung, engeli engeneering, Neerach.

ESU (Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt) (1996): Ökoinventare von Energiesystemen, ISBN 3-9520661-1-7, ENET, Postfach, Bern dritte, überarbeitete Auflage) (Data on CD-ROM).

FAL, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (1999) Referenzmethoden der eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten, Band 1 bis 4, Reckenholz, Zürich.

- Fankhauser J. und Moser A. (1983): Studie über die Eignung von Biogas als Treibstoff für Landwirtschaftstraktoren, Schriftenreihe der Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik FAT, CH-8355 Tänikon TG.
- FBB (1998): HMT 22N, Mischgutsollwerte für Heissmischteer und seine Zusammensetzung, Faxmitteilung vom Labor der FBB, Hinwil.
- Frei U., Candinas T., Besson J.-M. und M. Chardonens (1993): Stellung des Kompostes in der Düngung. Schriftenreihe Nr. 13 der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC). Liebefeld Bern.
- Frischknecht R., (1998): Allokation in der Sachbilanz bei starrer Kuppelproduktion; in Ökobilanz-Allokationsmethoden: Modelle aus der Kosten- und Produktionstheorie sowie praktische Probleme in der Abfallwirtschaft - Vorbereitende Unterlagen zum 7. Diskussionsforum vom 24.6.98, ETH-Z./UNK, IWSBN 3-906734-00-5, pp.38-49.
- Frischknecht R. (1998): Life cycle inventory analysis for decision making: Scope dependent inventory system models and context specific joint product allocation, Dissertation ETH-Z, #12599, Zürich
- Grasser C. (1999): Produktezeichen für Ökostrom und erneuerbare Elektrizität. Kiefer & Partners AG, Zürich.
- Gronauer A., Helm M., Schön H. (1997): Verfahren und Konzepte der Bioabfallkompostierung - Vergleich - Bewertung - Empfehlungen, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik der TU München-Weihenstephan, BayLfu 139.
- Jungbluth N. (1998): Ökologische Beurteilung des Bedürfnisfeldes Ernährung; Arbeitsgruppen, Methoden, Stand der Forschung, Folgerungen. Working paper Nr 18 am UNS, ETH Zürich.
- Jungbluth N. (1999): Ökobilanzen zur Ernährung und zum Nahrungsmiteleinkauf, Vorabversion zur Dissertation am UNS, ETH Zürich, noch unveröffentlicht.
- Kehres, B. (1991): Zur Qualität von Kompost aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen. (Dissertation): Universität Gesamthochschule Kassel.
- Krogmann, U. (1994): Kompostierung; Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung. Bonn: Economia Verlag.
- LBL (1996): Gesamtbetrieblicher Nährstoffhaushalt, Landwirtschaftliche Beratungszentrale LBL, 8315 Lindau.
- Marb C., Dietrich G., Köberni M., Neuchl C. (1997): Vergleichende Untersuchungen zur Kompostierung von Bioabfällen in Reaktoren und auf Mieten: Emissionen, Qualität und Schadstoffe, Müll und Abfall, 10/97
- Membrez Y., Glauser M. (1997): Evaluation environnementale du Degré de Centralisation d'installations de Méthanisation des Déchets organiques au Moyen d'Ecobilans, BFE, CH-3003 Bern.
- Menard M., Dones R., Ganther U. (1998): Strommix in Ökobilanzen - Auswirkungen der Strommodellwahl für Produkt- und Betriebsökobilanzen, PSI-Bericht # 98-17, Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen (125 Seiten)

- Menzi H. (1998): Ammonia, Excel-Programm zur Berechnung der Ammoniakemission bei der Ausbringung von Gülle, IUL, Bern-Liebefeld.
- R.O.M. und Sulzer Chemtech (1997): ROMOPUR, das neue Verfahren zur Entsorgung von nassen Grünabfällen, ROM AG, Frauenfeld
- ROM (1999): Biogas-Analyse, Rohgas, ROMOPUR Frauenfeld 1.Etappe, Faxmitteilung von ROM, Frauenfeld.
- SBV (1996): Gesamtverbrauch von zugekauftem Dünger in der Schweiz, Brugg.
- Schleiss K. (1998): Kompostier- und Vergärungsanlagen im Kanton Zürich - Jahresbericht 1997. Zürcher Daten Service 8090 Zürich.
- Schleiss K. (1999): Kompostier- und Vergärungsanlagen im Kanton Zürich - Jahresbericht 1998. Zürcher Daten Service 8090 Zürich.
- Staudenmann, J., Junge-Berberovic, R. (1999): Wastewater-fed Aquaculture in Temperate Climates – the Pilot Plant Otelfingen (Switzerland) after one Year, Hochschule Wädenswil.
- W. Schmid AG (1992): KOMPOGAS; Ein neuartiges Verfahren zur Gewinnung von Energie und hochwertiger Komposterde aus organischen Haushalts- und Gewerbeabfällen. W. Schmid AG, Glattbrugg.
- Wellinger, A., Baserga, U., Edelman, W., Egger, K. & Seiler, B. (1991): Biogashandbuch; Grundlagen - Planung - Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen. 2. Auflage. Aarau: Verlag Wirz.
- Zimmermann, P., Doka G., Huber F., Labhardt A. und Mènard M. (1996): Ökoinventare von Entsorgungsprozessen; Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen. Version 1998; ISBN 3-9520661-0-9, ENET, Postfach, Bern.

## Anhang

Die mittlere Abfallzusammensetzung (Berechnung siehe Kapitel 2)

Wassergehalt	65%	Arsen	0.0002%	Zinn	0.0007%
Sauerstoff (excl. O im Wasser)	11.15%	Cadmium	0.0000%	Vanadium	0.0003%
Wasserstoff (excl. H im Wasser)	1.75%	Kobalt	0.0004%	Zink	0.005%
Kohlenstoff (org. plus anorg.)	14.21%	Chrom	0.0007%	Silizium	3.9%
Schwefel	0.13%	Kupfer	0.0016%	Eisen	0.05%
Stickstoff	0.35%	Quecksilber	0.0000%	Calcium	1.5%
Phosphor	0.099%	Mangan	0.0004%	Aluminium	0.87%
Bor	0.0009%	Molybdän	0.0000%	Kalium	0.31%
Chlor	0.26%	Nickel	0.0005%	Magnesium	0.25%
Fluor	0.017%	Blei	0.0016%	Natrium	0.13%