

Wie werden biogene Abfälle optimal verwertet?

Dr. Werner Edelmann, arbi GmbH, Baar
www.arbi.ch

Leben ist Werden und Vergehen, ein steter Wechsel von Aufbau und Abbau. Der Mensch als Teil der Natur setzt riesige Mengen Biomasse um, die früher oder später zu Abfall werden. Der vorliegende Artikel geht mit vertieften Überlegungen der Frage nach der optimalen Verwertung dieser Abfälle nach.

Aufbau braucht Energie. Diese Energie kommt von der Sonne: Bei der Photosynthese bilden die grünen Pflanzen mit der Energie des Sonnenlichts aus einfachen Bausteinen - CO₂, Wasser und Nährstoffen - energiereiche Kohlenstoffverbindungen, wie Zucker, Eiweisse, Fette und anderes Zellmaterial. Mensch und Tier ernähren sich direkt oder beim Fleischkonsum indirekt von den Pflanzen und „tanken“ so Energie und Baumaterial für den eigenen Körper. Doch alles biogene, d.h. durch Lebewesen aufgebaute Material, wird schliesslich wieder zu den einfachen, mineralischen Bausteinen abgebaut; dabei wird die in den chemischen Bindungen gespeicherte Sonnenenergie wieder frei. Die Mikroorganismen sind in der Natur für den Endabbau der biogenen Stoffe zuständig.

Möglichkeiten zum Abbau von Biomasse

In der Biomasse werden in jedem Jahr riesige Stoff- und Energiemengen fixiert. Davon nutzt der Schweizer einen beachtlichen Teil, um sein Dasein zu fristen: Hierzulande werden jährlich rund 60 Millionen Tonnen Biomasse mit einem Energieinhalt von über 60'000 GWh verschoben und verarbeitet (Scheurer und Baier; 2001). Der Löwenanteil fällt auf den Anbau und Import von Tierfutter und Nahrungsmitteln; der Anteil von Holz liegt unter 20%. Bei der Biomassennutzung entsteht immer auch Abfall. In der Landwirtschaft verbleiben allfällige Abfälle entweder auf dem Feld, oder sie werden in Form von Gülle zurück aufs Feld gebracht. Rund 3 Millionen Tonnen biogene Abfälle fallen jedoch bereits heute pro Jahr als separat gesammelte Abfälle an, die gezielt verwertet werden können (inkl. Altpapier). Abbildung 1 zeigt die prinzipiellen Abbaumöglichkeiten für die biogenen Abfälle.

Die Biomasse kann technisch entweder physikalisch-chemisch oder biologisch zu CO₂ und Wasser abgebaut werden. In beiden Fällen kann der Abbau in einem oder in zwei Schritten erfolgen: Beim *einstufigen Abbau* (Verbrennung bzw. Kompostierung) steht das Material von Anfang an mit Sauerstoff in Kontakt. Beim *zweistufigen Abbau* (Pyrolyse, bzw. Biogas oder Alkoholgewinnung) läuft der erste Schritt hingegen ohne Sauerstoff, d.h. anaerob ab. Weil dann das Material nicht oxidiert werden kann, entstehen sehr energiereiche Zwischenprodukte, die erst in einem zweiten Schritt zur Energiegewinnung mit Sauerstoff kontrolliert verbrannt werden.

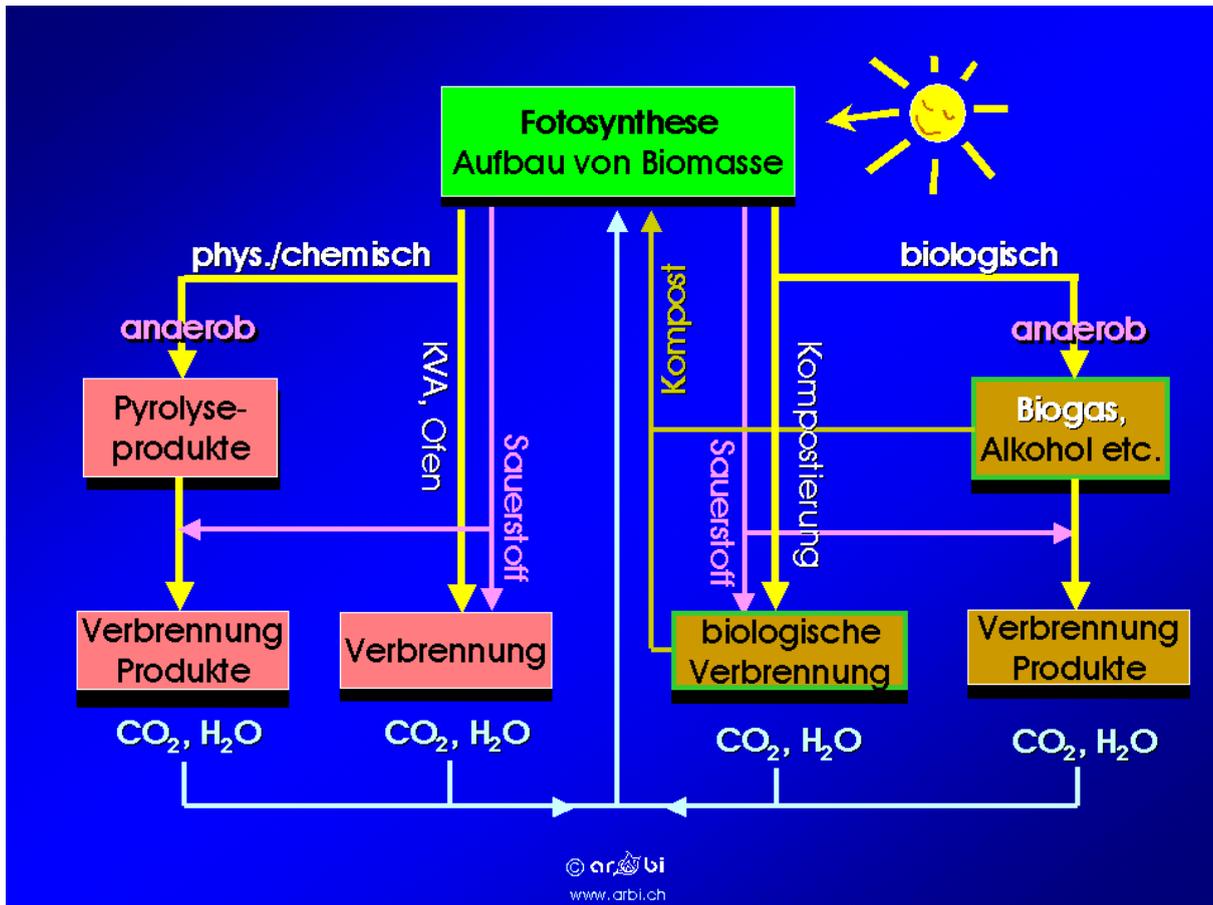


Abb. 1: Die prinzipiellen Möglichkeiten des Abbaus von Biomasse (Erläuterung im Text)

Bei den *physikalisch-chemischen Methoden* wird das biogene Material in der Regel vollständig abgebaut. Das heisst, anorganische Nährstoffe und die organischen Anteile gehen praktisch vollständig verloren. Sie eignen sich vor allem für trockene Biomasse (z.B. trockenes Holz etc.). Als Produkt entsteht Asche oder Schlacke, welche deponiert und so dem Stoffkreislauf entzogen wird. Bei nassen Abfällen, wie Speiseresten, muss andererseits zuerst der Wassergehalt verdampft werden, bevor die Kohlenstoffverbindungen verbrannt oder pyrolysiert werden können; nasse und feuchte Biomasse wird daher besser *biologisch* abgebaut: Beim biologischen Weg werden durch Mikroorganismen nicht alle, sondern nur die biologisch einfacher „verdaulichen“ Stoffe abgebaut. Zurück bleibt Kompost. Dieser enthält noch schwer abbaubare Verbindungen, die für den Aufbau von Humus wichtig sind, sowie die anorganische Nährstoffe und Spurenelemente als Dünger für neues Wachstum. Beim biologischen Abbau kann der natürliche Stoffkreislauf geschlossen werden!

Bei der Pyrolyse entstehen feste, flüssige und gasige Produkte, die anschliessend kontrolliert optimal verbrannt werden können. Obwohl die Pyrolyse aus Sicht der Umwelt gegenüber der direkten Verbrennung Vorteile bringen würde, ist Pyrolyse heute noch nicht weit verbreitet; das Projekt im Kanton Tessin kam leider nicht zur Realisierung. Für die Verwertung der biogenen Abfälle stehen deshalb die Kompostierung, die Vergärung und die direkte Verbrennung in Konkurrenz.

Vergleich von Kompostierung und Vergärung

Der mikrobiologische Abbau erfolgt durch zwei prinzipiell verschiedene Gruppen von Mikroorganismen, welche beim Abbau biochemisch ganz unterschiedliche Wege beschreiten: die aeroben und die anaeroben. Aerobe Mikroorganismen (Bakterien, Einzeller, primitive Mehrzeller wie Springschwänze oder Würmer) verbrennen bei der Kompostierung die energiereichen Verbindungen mit Sauerstoff aus der Luft zu den sehr energiearmen Produkten Kohlendioxid (CO₂) und Wasser sowie Mineralsalzen. Dies sind die Ausgangsstoffe für die Photosynthese und somit für einen neuen Aufbau.

Die aeroben Organismen leben aus energetischer Sicht in Saus und Braus; sie haben die ganze Energiedifferenz zwischen dem energiereichen Ausgangsmaterial und den energiearmen Endprodukten zu ihrer Verfügung. Sie verdoppeln sich daher sehr rasch (innerhalb von Stunden) und sie geben überschüssige Wärme ab, die bei der biologischen „Verbrennung“ frei wird. Ein gut durchlüfteter Komposthaufen wird daher sehr heiss. Der aerobe Abbau läuft in der freien Natur allerdings nur dort ab, wo Biomasse in kleinen Schichtdicken stets mit Luft und Wasser in Kontakt ist.

Anaerobe Bakterien sind die urtümlichsten Lebewesen der Erde: Es gibt sie schon seit mehreren Milliarden Jahren; sie stammen aus einer Zeit, als es noch keine Pflanzen und daher in der Erdatmosphäre noch keinen Sauerstoff gab. Sie können deshalb organisches Material ohne Hilfe von Sauerstoff abbauen. Weil sie nur ein wenig Sauerstoff aus den Verbindungen selbst zur Verfügung haben, müssen sie einen grossen Teil des Kohlenstoffs mit Wasserstoff zu Methan (CH₄) verbinden. Methan ist energiereich: im Methan steckt noch über 90% der Energie des abgebauten Materials! Für die Bakterien hat dies die unerfreuliche Konsequenz, dass sie äusserst wenig Energie zum Leben haben; sie haben im Vergleich zu den aeroben Organismen weniger als einen Zehntel der Energie für ihr eigenes Wachstum zur Verfügung. Ihr Abbau ist an der absoluten Grenze des biologisch überhaupt noch Machbaren. Sie wachsen daher sehr langsam (Verdopplungszeit von mehreren Tagen) und setzen auch keine Abwärme frei.

Anaerobe Bakterien kommen nur vor, wo kein Sauerstoff vorhanden ist: Am Grund von Seen und Teichen, im Innern von Biomasseansammlungen aller Art oder im Pansen der Wiederkäuer (eine Kuh ist eine mobile Biogasanlage; sie stösst pro Tag über After und Maul rund 400 Liter Methan aus). Auch im Innern eines Komposthaufens läuft je nach Intensität der Belüftung immer ein mehr oder weniger grosser Anteil des Abbaus anaerob ab. Sobald jedoch beim Umschichten wieder Sauerstoff Zutritt, kapseln sich die anaeroben Bakterien ab und warten auf bessere, d.h. anaerobe Zeiten, wo sie gegenüber den Aeroben wieder einen Konkurrenzvorteil haben. Dann beginnen sie wieder Biogas zu produzieren.

Der anaerobe Abbau kommt in der Natur immer dort vor, wo Biomasse in grösseren Mengen anfällt und daher der Sauerstoffzutritt ins Innere des Haufens nicht mehr genügend gut funktioniert. Die Kompostierung, wie sie vom Menschen betrieben wird, ist aus dieser Sicht ein *unnatürlicher* Prozess, der – ohne technische Hilfe und Einsatz von Fremdenergie – nicht optimal funktionieren *kann*: Wenn die Kompostierung rein aerob ablaufen würde, wäre aus rein biochemischer Sicht ein Komposthaufen in ein bis zwei Tagen weiter abgebaut als ein Gärprodukt nach drei bis vier Wochen. Dies ist aber nicht der Fall; im Gegenteil: die Kompostierung dauert sogar deutlich länger als ein vergleichbarer anaerober Abbau. Dies hat damit zu tun, dass die durch den Menschen betriebene Kompostierung ein Prozess ist, welcher in der Natur

nie aerob ablaufen würde. Biomasseansammlungen – wie sie in einem (Garten-) Komposthaufen vorliegen - werden in der Natur immer vorwiegend anaerob abgebaut, weil der aerobe Abbau ein Dreiphasenprozess und der anaerobe Abbau nur ein Zweiphasenprozess ist: Der aerobe Abbau braucht neben dem Abfall (fest) einen Wasserfilm (flüssig), wo die Mikroorganismen leben, sowie Sauerstoff aus der Luft (gasig), wogegen der anaerobe Abbau nur fest und flüssig braucht, da das Biogas Ausscheidungsprodukt ist und daher *nicht* zugeführt werden muss. (vgl. Abb. 2).



Abb.2: Der aerobe Abbau (links) braucht drei Phasen (fest, flüssig und gasig), während beim anaeroben Abbau (rechts) das Gas Ausscheidungsprodukt und daher für den Abbau nicht nötig ist. Ein Zweiphasenprozess ist deutlich einfacher zu steuern.

Die Tatsache, dass der aerobe Abbau drei Phasen benötigt, hat zur Folge, dass der Abbau in einem Komposthaufen *nicht optimiert werden kann*: Es liegen zu viele Größen vor, die sich gegenseitig behindern, bzw. ausschliessen: Wird nicht belüftet, entsteht natürlicherweise das Treibhausgas Methan, da zu wenig Sauerstoff ins Innere des Haufens gelangt. Der (nicht optimierte) aerob/anaerobe Abbau verläuft sehr langsam und belastet die Umwelt. Wird mit Einsatz von Fremdenergie künstlich belüftet, wird der Haufen sehr schnell brandheiss und der aerobe Abbau kommt im Innern wegen zu hohen Temperaturen zum Erliegen. Wird noch mehr zwangsbelüftet, wird zwar gekühlt; der Prozess kommt aber zum Erliegen, weil der Kompost austrocknet und die Mikroorganismen kein Wasser mehr erhalten (arbi, 2002).

Zudem wird die Geschwindigkeit des biologischen Abbaus durch die Teilchengrösse beeinflusst: je feiner das Material, desto grösser dessen Oberfläche, wo die Mikroorganismen angreifen können, und damit desto grösser die Abbaugeschwindigkeit. Werden biogene Abfälle jedoch fein gemahlen, steigt der Sauerstoffbedarf in einem Komposthaufen und die Luft kommt gleichzeitig kaum mehr ins Innere, da keine Hohlräume mehr bestehen. Es kann daher kein intensiver aerober Abbau mehr stattfinden. Lässt man andererseits die Biomasse grob und unzerkleinert (Äste, Strukturmaterial), läuft der Abbau nicht rasch, weil die Oberfläche nun sehr klein ist.

Wenn daher – entgegen dem Ablauf in der Natur – ein grosser Haufen aerob kompostiert werden soll, muss ein grosser technischer Aufwand zum Belüften, Umsetzen und Bewässern betrieben werden. Die in der Biomasse gespeicherte Sonnenenergie geht als niederwertige Abwärme verloren. Statt die Sonnenenergie zu nutzen, muss sogar Fremdenergie eingesetzt werden (Elektrizität, Treibstoff für Maschinen etc.), welche die Umwelt belastet und Treibhauseffekt erzeugt. Während Kompostierung Energie benötigt, setzt Vergärung netto Energie frei. Auf Ebene der Primärenergie,

d.h. unter Berücksichtigung der gesamten „grauen“ Energie, die benötigt wird, um Energie vor Ort bereitzustellen, beträgt die Differenz zwischen den beiden Verfahren bis zu über 700 kWh/Tonne Kompost (Edelmann et al.; 1999).

Wie bei der Kompostierung entsteht auch bei der Vergärung zusätzlich zum erneuerbaren Energieträger Biogas nach einer Nachrotte ein wertvoller Kompost mit all den Nährstoffen, Spurenelementen und organischen Verbindungen, die dem Landwirtschaftsland zurückgegeben werden können. Die Vergärung von festen Abfällen wurde leider erst später entwickelt als die Kompostierung, so dass in den 80-er Jahren verschiedene grosse Kompostierwerke gebaut wurden. Bei heutigem Stand des Wissens und der Technik werden aus ökonomischen und ökologischen Überlegungen jedoch kaum mehr grosse Kompostierwerke neu erstellt.

Vergleich von Vergärung und Verbrennung

Rund 60% des schweizerischen Haushaltsabfalls ist organischer Natur. Rund ein Drittel ist nass oder zumindest feucht, der Rest verholzt oder Papier und Karton. Die holzhaltige Fraktion kann anaerob nicht abgebaut werden, da der sehr stabile Holzbaustoff Lignin erdgeschichtlich sehr viel später entwickelt worden ist als die anaeroben Bakterien; diese konnten daher keinen Weg mehr finden, Holz abzubauen. Da bei der Kompostierung einerseits der Energieinhalt als nutzlose Abwärme verloren geht und andererseits Holz relativ wenig Nährstoffe aufweist, die in den Kreislauf zurückgeführt werden könnten, scheint die Verbrennung von Holz unter Nutzung der erneuerbaren Energie aus ökologischer Sicht am vorteilhaftesten zu sein. Strauchsnitte und Äste sind daher am besten zu Energieschnitzeln zu verarbeiten.

Bei nassen und feuchten Abfällen, wie Speiseresten und Küchenabfällen ist die Situation anders: Eine faule Banane oder Tomate brennt bekannterweise nicht; das Material muss zuerst getrocknet werden, bis es brennt. Zur Verdampfung des Wassers braucht es Energie. Ohne Energiezufuhr kann Biomasse erst ab einem Heizwert von etwa 3.8 MJ/kg Frischsubstanz verbrennen. Ist der Wasserdampf höher, wird die Flamme durch Wasserdampf zu stark gekühlt und erlischt. Biomasse mit Trockensubstanzgehalten von weniger als 20% brennt daher *nicht* und braucht Energie „von aussen“ (Papier, Plastik, Karton), um seine Energie freisetzen zu können. Je trockener hingegen das Material ist, desto mehr Energie steht bei der Verbrennung netto zur Verfügung.

Küchenabfälle und andere biogene Haushaltsabfälle haben einen Energieinhalt von 17-20 MJ/kg Trockensubstanz (Edelmann et al., 1993). Bei der Vergärung werden zwischen 50 und 60% der organischen Verbindungen zu Biogas abgebaut. Bei der Verbrennung werden hingegen 100% der Verbindungen oxidiert – wenn sie erst einmal getrocknet sind! Es gibt daher je nach Wassergehalt und Zusammensetzung des Abfalls einen Wert, bei welchem die Verbrennung mehr Energie freisetzt als die Vergärung.

Berechnungen zeigen, dass in einer KVA erst bei Trockensubstanzgehalten von 25-30% - je nach Zusammensetzung des Abfalls und Abbaugrad bei der Vergärung - gleich viel Energie aus biogenen Abfällen gewonnen werden kann, wie bei der Vergärung. Die gärbare organische Fraktion des Haushaltabfalls hat aber normalerweise einen Trockensubstanzgehalt von weniger als 25%.

Aus den biogenen Haushaltsabfällen kann daher nur in wenigen Ausnahmefällen in der KVA dieselbe Energiemenge nutzbar gemacht werden, wie bei der Vergärung. Zudem stellt sich die Frage der Energieverwertung: KVA's verarbeiten viel grössere Abfallmengen als die dezentral angeordneten GÄranlagen. Daher entstehen sehr grosse Energiemengen, die dann in einem Fernwärmenetz verteilt werden muss, das teuer und in Herstellung und Unterhalt energieaufwändig ist. Die Abwärme kann zudem nicht vom Sommer bis zum Winter gespeichert werden. Hier haben GÄranlagen den Vorteil, dass das Gas jederzeit ins öffentliche Gasnetz eingespeist werden kann, und so direkt treibhausaktives Erdgas substituiert wird. Aus energetischer Sicht bestehen daher gewisse Vorteile für die Vergärung.

Der sehr grosse Vorteil der Vergärung liegt aber in der Nachhaltigkeit: Die heutige moderne Landwirtschaft ist absolut nicht nachhaltig: Es wird Mineräldünger eingesetzt, der bei Herstellung und Transport sehr umweltbelastend ist und beispielsweise im Fall von Stickstoffdünger aus Erdgas riesige Mengen Treibhausgas erzeugt. Gleichzeitig hat die Schweiz Jahr für Jahr rund eine Million Tonnen Humusverlust infolge von brachliegenden Feldern, Bodenverdichtung und Drainagen. Dieser wird zum Teil kompensiert mit (nicht erneuerbarem) Torf, der über Hunderte von Kilometern herangekarrt wird. Die heutige Landwirtschaft ist nur bei tiefen Preisen für fossile Energieträger – deren baldiges Ende abzusehen ist – möglich.

Bei der Vergärung entsteht wertvoller Kompost mit Nährstoffen, Spurenelementen und mit organisch schwer abbaubaren Verbindungen, welche Humusaufbau bewirken. Allein für die Herstellung der Makronährstoffe (N, P, K und Ca), die in einer Tonne Kompost vorhanden sind, würde es bei erheblicher sonstiger Umweltbelastung rund 90 kWh brauchen (Edelmann, Schleiss, 1999). Das nährstoffreiche Presswasser, das bei der Abpressung des Gärguts entsteht, ist für zertifizierte Bio-Landwirtschaftsbetriebe zugelassen worden. In der KVA gehen Kompost wie auch Presswasser mit ihren wertvollen Bestandteilen verloren. Dies ist heute im Hinblick auf eine langfristig gesicherte Versorgung mit Nahrungsmitteln schlicht nicht mehr verantwortbar – umso mehr, als jetzt infolge von zivilisatorischer Schadstoffbelastung auch der Klärschlamm nicht mehr in den ökologischen Kreislauf zurückgeführt werden darf.

Die TVA (BUWAL, 1990) schreibt eigentlich die getrennte Sammlung und Verwertung unterschiedlicher Abfallströme klar vor. Trotzdem nehmen KVA's auch heute noch sehr gerne biogene Abfälle an. Dies mag – neben Überkapazitäten - mit der veränderten Abfallzusammensetzung zu tun haben: Heute enthält der Abfall grosse Anteile von Kunststoffen, die einen hohen Brennwert aufweisen, auf welchen die Anlagen seinerzeit nicht ausgelegt worden waren. Wenn der biogene Abfall nicht mehr im Kehrriem ist, steigt der Brennwert zusätzlich. Der nasse biogene Abfall dient somit als „Löschmittel“ gegen Überhitzung. Man kann sich jedoch mit Fug und Recht fragen, ob nicht besser der Klärschlamm zu diesem Zweck in KVA's verbrannt würde, wenn er schon nicht mehr in die Landwirtschaft zurückgeführt werden darf.

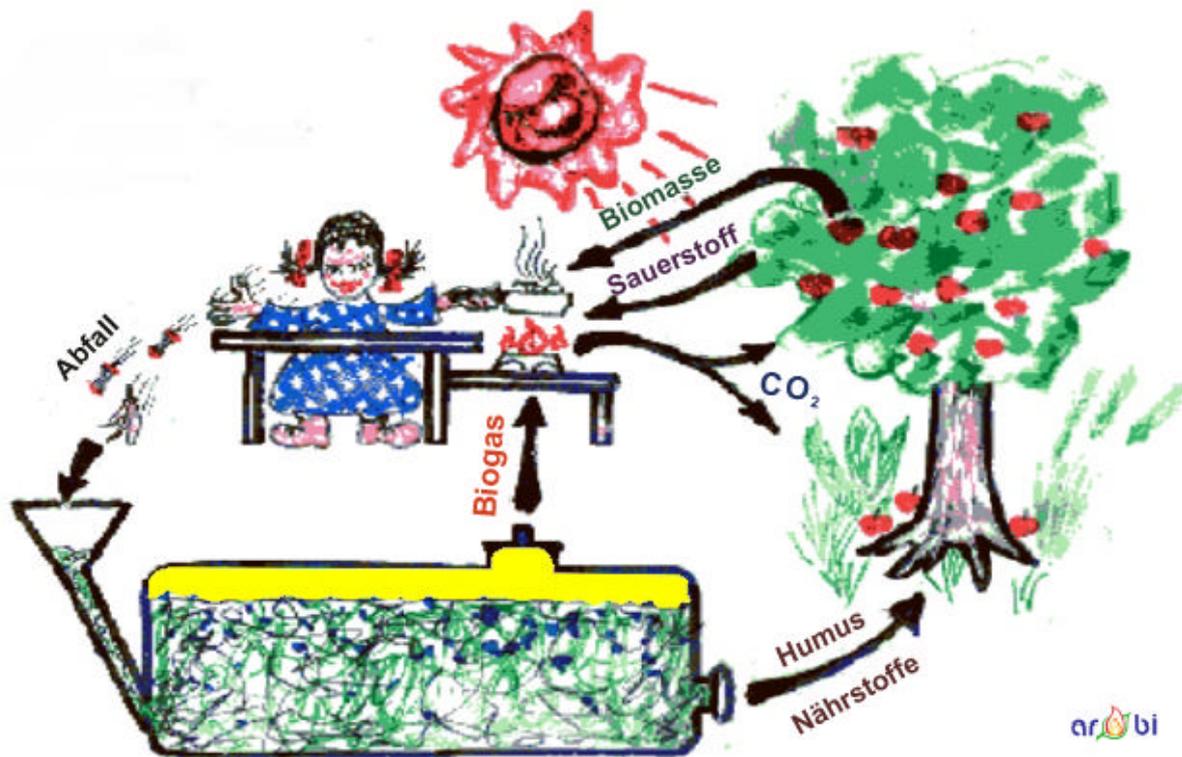


Abb. 3: Die geschlossenen Stoffkreisläufe bei der Vergärung: Die Pflanze wächst mit CO₂, Wasser und Nährstoffen und baut energiereiche Verbindungen auf, welche früher oder später zu Exkrementen und Abfall werden. Bei der Photosynthese wird Sauerstoff frei. In der luftdichten Biogasanlage erzeugen die anaeroben Bakterien Biogas. Das Methan wird mit dem Sauerstoff im Herd (oder in einem Motor) wieder zu CO₂ verbrannt, wobei die Energie des Methans frei wird. Schwer abbaubare Kohlenstoffverbindungen – welche für die Humusbildung wichtig sind – und Nährsalze verbleiben im Gärgut, welches wieder auf das Feld zurückgeführt wird. Ein neuer Aufbau kann beginnen! Der Motor, der den Kreislauf in Betrieb hält, ist die Sonne.

Umweltaspekte von Vergärung, Kompostierung und Verbrennung

In einer sehr umfassenden Studie (Edelmann et al., 1999) wurde die Umweltverträglichkeit von offener (OK) und vollständig abgeschlossener Kompostierung (GK), Vergärung mit Nachrotte (VN), Kombinationen von Vergärung mit offener (VO) bzw. geschlossener Kompostierung (VG) bzw. sowie Verbrennung in einer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) verglichen. Die Ökobilanz umfasst sämtliche Emissionen für die Bereitstellung der Infrastruktur beim Anlagenbau und beim Abbruch, wie auch sämtliche Emissionen, welche beim Betrieb der Anlagen entstehen. Für den Vergleich wurden Daten auf bestehenden schweizerischen biotechnologischen Anlagen erhoben und auf eine Verarbeitungskapazität von 10'000 Tonnen pro Jahr umgerechnet, was in der Schweiz einer typischen Grösse von professionellen Anlagen entspricht. Bei der Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) wurde die Auswirkung der Verbrennung von 10'000 Tonnen biogenem Abfall zusammen mit einer praxiskonformen Menge Restmüll in einer Anlage zur Verbrennung von 100'000 Tonnen Kehricht betrachtet. Abbildung 4 zeigt das Resultat: Die Vergärung mit Nachrotte (VN; Daten von Kompogas, Otelfingen) zeigt mit grossem Abstand die kleinsten negativen Umwelteinwirkungen. Es folgen kombinierte Verfahren zur Vergärung und Kompostierung und die KVA liegt im Bereich von reinen Kompostierverfahren.

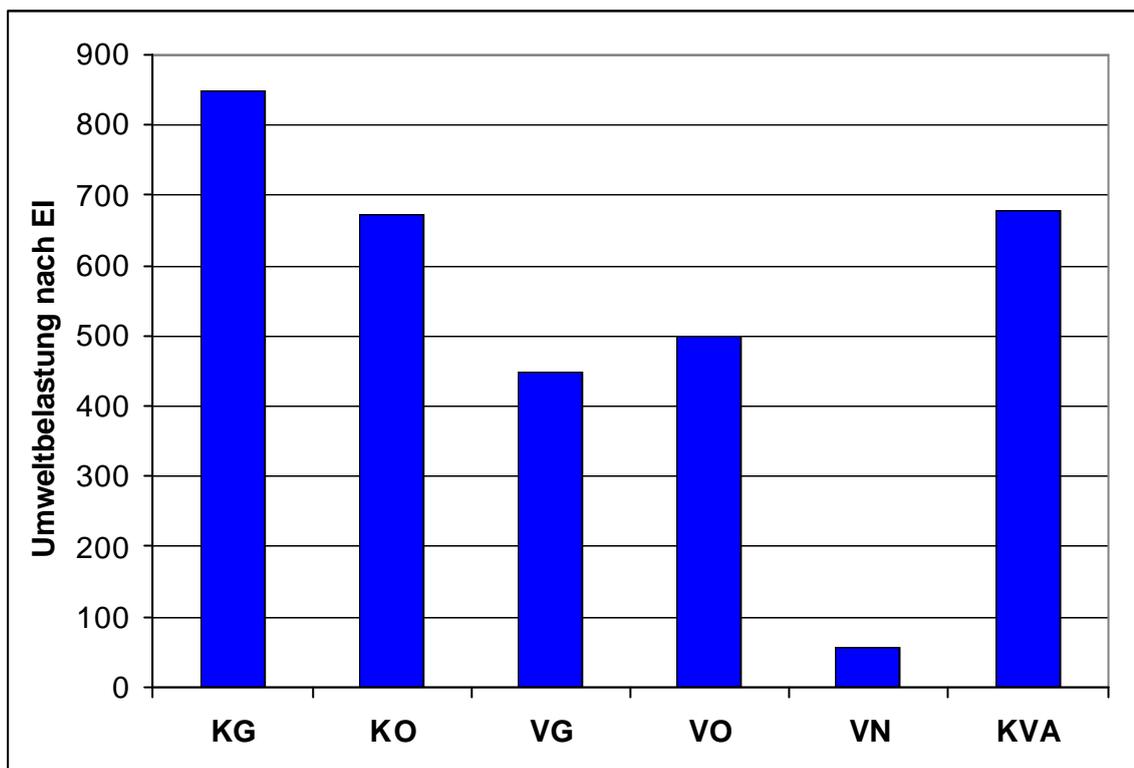


Abb. 4: Ökologischer Vergleich von verschiedenen Verfahren zur Verwertung von biogenen Abfällen nach Ecoindicator 95+ (Erläuterungen und Abkürzungen vgl. Text)

Für detaillierte Angaben (Sensitivitäten, Methodik etc.) wird auf die oben erwähnte Originalliteratur verwiesen.

In einer von „Energie- und Recycling Zürich, ERZ“ in Auftrag gegebenen, unveröffentlichten Studie schneidet die Verbrennung besser ab als in Abbildung 4. Allerdings wurden in diesem Fall vom Auftraggeber z.T. völlig realitätsfremde Annahmen vorgegeben und verschiedene wichtige Aspekte – wie Infrastruktur für Erstellung und Betrieb des Fernwärmenetzes oder Kompostqualität – bewusst nicht berücksichtigt.

In der Schweiz verarbeiten heute 15 professionelle Gäranlagen rund 100'000 Tonnen biogene Abfälle pro Jahr und setzen deutlich über 50'000 MWh erneuerbare Energie frei (Edelmann und Engeli, 2005). Gärverfahren bringen – neben ökonomischen – ökologische Vorteile, weil einerseits erneuerbare Energie frei wird und andererseits die Stoffkreisläufe geschlossen bleiben. Die Ökobilanz der Vergärung von festen Haushaltsabfällen weist das beste Resultat sämtlicher Energieträger auf (Frischknecht und Jungbluth, 2000). Der energetische Erntefaktor einer heutigen Kompostanlage – d.h. das Verhältnis zwischen produzierter Energie und gesamtem Energieaufwand - liegt heute bei rund 7. Das bedeutet, dass eine Anlage bereits nach 3 – 4 Jahren sämtliche Energieaufwendungen erzeugt hat, die für Infrastruktur und Betrieb während der ganzen Lebensdauer von 25 Jahren erforderlich sind (arbi, 2005).

Da die Reserven der nicht erneuerbaren Energieträger beschränkt sind, ist Biogas eine Technik der Zukunft: Man wird sich – wahrscheinlich viel rascher als uns lieb ist – nicht mehr leisten können, die wertvolle Energie der Biomasse ungenutzt als Kompostabwärme entweichen zu lassen oder die wertvollen Pflanzennährstoffe mit der Schlacke aus der KVA in einer Deponie zu verlocken.

Quellenverzeichnis:

arbi (2002): *Vergleich des aeroben und des anaeroben Abbaus*, Internet:

www.arbi.ch/problem.htm

arbi (2005): *Der energetische Erntefaktor einer Kompogasanlage*, Internet:

www.arbi.ch/seite11.htm

BUWAL (1990): *Technische Verordnung über Abfall, TVA*, 10.12.1990, EDMZ, 3003 Bern

Edelmann W., Engeli H., Gradenecker M., Kull T., Ulrich P. (1993): *Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung bei der Kompostierung*, Schriftenreihe Forschungsprogramm Biomasse, BEW, CH-3003 Bern (41 Seiten)

Edelmann W., Schleiss K, Joss A., Ilg. M, Steiger H. (1999): *Ökologischer, energetischer und ökonomischer Vergleich von Vergärung, Kompostierung und Verbrennung biogener Abfallstoffe*, Studie i.A. BFE und Buwal, Schriftenreihe BFE, Bern (120 Seiten) (Zusammenfassung: www.arbi.ch/oekobila.htm)

Edelmann W., Engeli H. (2005); *More than 12 years of experience with commercial anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid wastes in Switzerland*, Eröffnungreferat des Symposiums "Anaerobic digestion of Solid Wastes", Copenhagen, August 2005 (in press; download pdf auf: www.arbi.ch/seite11.htm)

Frischknecht R., Jungbluth N. (2000): *Globale Kriterien für Ökostrom*, Studie i.A. Verein für umweltgerechte Elektrizität, Zürich; ESU-Services. Uster (28 S.)

Scheurer K., Baier U. (2001): *Biogene Stoffflüsse Schweiz*, BFE Bericht 39573, Bern.