

UMWELTASPEKTE DER VERWERTUNG VON BIOGENEN ABFÄLLEN IN VERGÄRUNGSANLAGEN

Dr. Werner Edelmann
arbi GmbH, Lättichstr. 8, CH-6340 Baar
Tel. +41/41/7632121 www.arbi.ch info@arbi.ch

EINLEITUNG

Bei der biotechnischen Verwertung biogener Abfälle entstehen neben erwünschten Produkten (Kompost sowie ev. Energie) auch unerwünschte Nebeneffekte wie gasige Emissionen oder Verbrauch von Ressourcen. Das vorliegende Papier fasst die Resultate von zwei detaillierten Ökobilanzen mit dem Tool „Ecoindicator“ (*Pre consultants, 2003*) zusammen: Einerseits wurde die Behandlung von biogenen Abfällen in eigens dazu erstellten Verwertungsanlagen (Kompostierung, Vergärung, Kombinationstechnologien sowie Verbrennung in der Müllverbrennungsanlage) verglichen (*Edelmann, Schleiss, 2000*). Andererseits wurden die Umweltaspekte der landwirtschaftlichen Co-Vergärung untersucht (*Edelmann et al., 2001*). Zusätzlich wird auf die Qualität des Gärprodukts eingegangen.

DIE METHODIK DER ÖKOBILANZ

In einer Ökobilanz werden sämtliche Emissionen eines Prozesses von der „Wiege bis zur Bahre“ erfasst und ihre Auswirkungen auf verschiedene Wirkungskategorien (wie Treibhauseffekt, Zerstörung der Ozonschicht, Smogbildung, Ressourcenverbrauch oder Erzeugung von Radioaktivität) quantifiziert und pro Wirkungskategorie auf eine Normgrösse bezogen (vgl. Abb. 1). Daraus abgeleitet werden Schäden in drei Schadenskategorien (Mortalität, Schädigung von Ökosystemen und Gesundheitsschäden). Schliesslich ergibt sich – je nach persönlicher Gewichtung der Schadenskategorien – eine Totalpunktzahl.

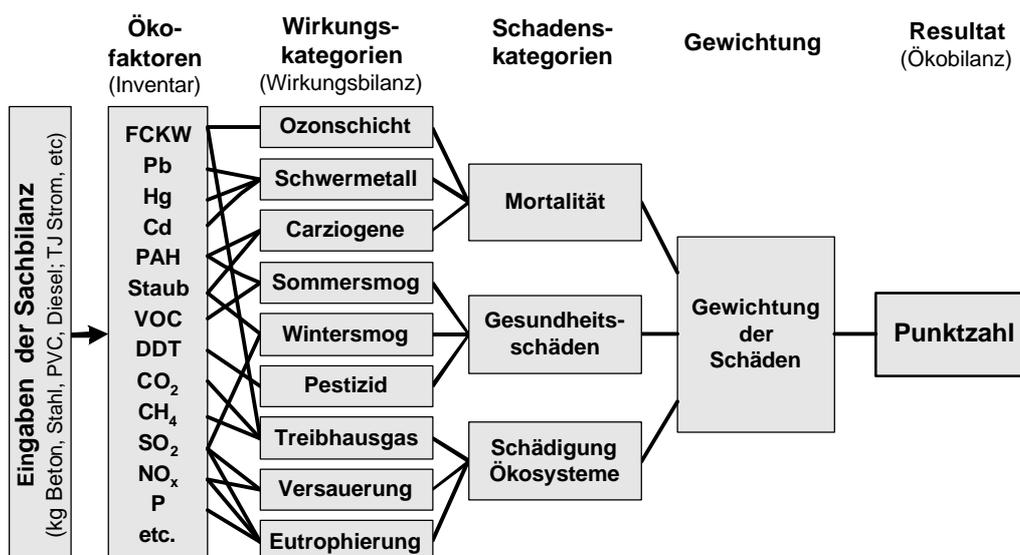


Abb. 1: Ablauf einer Ökobilanz

Es werden sämtliche Aktivitäten innerhalb vorgängig definierter Systemgrenzen betrachtet. Im Fall einer Verwertungsanlage für biogene Abfälle beginnt dies beim Abbau der Rohstoffe (Metalle, Erdöl etc.) und reicht über die Herstellung der Baumaterialien, Transporte und Bauarbeiten bis zu den Betriebsmitteln, welche während der Lebensdauer der Anlage benötigt werden, sowie den Aufwendungen, die zum anschliessenden Abbruch nötig sind. In umfangreichen Datenbanken (z.B. *Frischknecht, 1996; Zimmermann et al., 1996*) können die Emissionen der einzelnen Aktivitäten (z.B. bei der Herstellung von x Tonnen Beton oder beim Bereitstellen der Elektrizität für ein Umsetzgerät) abgefragt werden. Alle Emissionen werden auf die sog. „funktionelle Einheit“ bezogen. Im Fall des Vergleichs von verschiedenen Abfallverwertungsanlagen war dies „die Behandlung von 10'000 Tonnen biogener Abfälle pro Jahr“. Entsprechend der Lebensdauer der einzelnen Komponenten werden die Emissionen, die bei deren Herstellung und Entsorgung entstehen, anteilmässig den jährlichen Betriebsemissionen aufaddiert.

Um die Auswirkung einzelner Einflussgrössen besser einschätzen zu können, wurden u.a. Sensitivitäten gerechnet: Eine Sensitivität betraf z.B. den Einfluss der Nährstoffgutschrift: Es wurde ermittelt, wie viel Umweltbelastung entsteht, wenn man die Makronährstoffe, welche im Kompost vorhanden sind, in Form von Mineraldünger bereitstellen würde (z.B. Umweltbelastung der Haber-Bosch-Synthese für Ammoniumdünger etc.). Ein Vergleich der Punktzahlen mit und ohne Gutschrift für eingesparte Belastungen zeigt deren Grösse im Verhältnis zu Gesamtbelastung. Für detailliertere Angaben zur Methodik wird auf die oben erwähnten Publikationen verwiesen.

VERGLEICH VON VERWERTUNGSANLAGEN FÜR BIOGENE ABFÄLLE

Die Daten wurden - mit Ausnahme der Kehrlichtverbrennungsanlage (KVA), wo aktuelle Planungsdaten verwendet wurden - auf real existierenden, schweizerischen Anlagen erhoben. Damit die Daten vergleichbar wurden, mussten die Daten standardisiert werden. Alle Daten wurden auf die Anlagengrösse von 10'000 t/a umgerechnet. Es wurde angenommen, dass alle Anlagen mit denselben lokalen Voraussetzungen gebaut worden seien. Diese Annahme erlaubte, von demselben Aufwand für die getrennte Einsammlung der biogenen Abfälle auszugehen. Gleichzeitig wurde angenommen, dass an diesem hypothetischen Standort es nicht möglich sei, allfällige Wärmeüberschüsse aus der biotechnologischen Verwertung extern zu verkaufen - im Gegensatz zur KVA, wo von der Annahme eines Wärmeverbundes ausgegangen wurde.

Die verglichenen Anlagen unterscheiden sich daher hauptsächlich in a.) der Verfahrenstechnik, b.) Infrastrukturkosten (in Form von Material, Energie und Umweltbelastung) und c.) Betriebskosten inklusive Emissionen und Energieaufwand. Die folgenden Varianten wurden verglichen:

KG: Voll **geschlossene**, automatisierte **Kompostierung** mit Abluftreinigung über Biofilter (Datenerhebung: *Kanalrotte IPS*)

KO: **Offene Kompostierung** in überdeckten Boxen und offenen, mit Flies abgedeckten, häufig gewendeten Mieten (Datenerhebung: *Compaq-Boxen* und Trapezmieten)

VN: Thermophile, einstufige **Vergärung** in einem horizontalen Pfropfstromreaktor mit **Nachrotte** und Abluftreinigung über Biofilter. 85% Vergärung und 15% Kompostierung (bzw. gärtnerische Verwendung der Holzschnittel). (Datenerhebung: *Kompogas*)

VG: Kombination von einstufiger, thermophiler **Vergärung** mit voll **geschlossener Kompostierung** mit Abluftreinigung und überdeckter Nachrotte. 40% Vergärung vor Kompostierung, 60% reine Kompostierung (Datenerhebung: *BRV-Anlage*)

VO: Kombination von mehrstufiger, thermophiler Batch-**Vergärung** mit **offener Kompostierung**. 60% Vergärung vor Kompostierung, 40% reine Kompostierung (Datenerhebung: *romOpur*)

KVA: **Kehrlichtverbrennungsanlage** mit weitergehender Rauchgasreinigung (WRR SCR)

Die Behandlungskapazität der untersuchten KVA beträgt 100'000 Tonnen Gesamtmüll pro Jahr. Das Einzugsgebiet vergrössert sich damit auf rund 250'000 Einwohner gegenüber rund 100'000 Einwohnern bei den biotechnologischen Anlagen. Im Gegenzug ist bei der KVA keine Separatsammlung notwendig. Für alle Behandlungswege wurde für die biogene Fraktion dieselbe Zusammensetzung angenommen (60% Ausgangsmaterial mit relativ hohem Küchenanteil aus öffentlicher Sammlung und 40% relativ ligninreiches Material aus Direktanlieferung). Für detaillierte Elementaranalysen siehe *Edelmann, Schleiss, 1999*. Es wurde von der Annahme ausgegangen, dass bei allen verglichenen biotechnologischen Verfahren ein biologischer Abbau von 50% der organischen Substanz erreicht werde. Im Fall der Gärverfahren wurde angenommen, dass 76% des Abbaus anaerob und 24% aerob in der Nachrotte erfolge. Man ging davon aus, dass 1% des separat gesammelten Abfalls unerwünscht sei und der KVA zugeführt werden müsse (Fremdstoffe, wie Glas, Metall, Plastik etc.). Es wurde für den Betrieb der Anlagen mit dem europäischen Strommix (UCPTE) gerechnet (*Frischknecht, 1996*), sofern extern Strom bezogen werden musste.

Die gasigen Methanemissionen aus den Kompostierungsschritten wurden mit der „closed chamber“ Methode erfasst. Weil die total abgebauten Kohlenstoffmengen gemäss den Annahmen jeweils bekannt sind, und weil der Kohlenstoff in Gasmolekülen mit praktisch identischem Volumenbedarf entweder als CO₂ oder als CH₄ entweicht, genügt es, das relative Verhältnis von CO₂ und CH₄ zu messen. Die totalen Mengen der beiden Emissionsformen können anschliessend anhand der gemessenen Konzentrationen und der Kohlenstoffbilanz hochgerechnet werden. Für die übrigen gasigen Emissionen wurden – neben eigenen Messungen – Literaturwerte hinzugezogen.

Abbildung 2 zeigt als ein Beispiel von Betriebsemissionen die gemessenen Methan- und CO₂-Emissionen, wobei bei den Gärverfahren natürlich nur die Methanemissionen der Nachrotte berücksichtigt wurden. (Das Biogas wird zu CO₂ und H₂O verbrannt, wobei das biogene CO₂ den Treibhauseffekt nicht erhöht, da es nicht aus fossilen Quellen stammt). Es fällt auf, dass auch die offene Kompostierung bei einer Mietenhöhe von nur 1,2 Metern und äusserst häufigem Umsetzen noch rund 5% des Kohlenstoffs als Methan verliert – was mehr Treibhauseffekt bringt, als 100% C in Form von CO₂! Wenn man berücksichtigt, dass die Kompostierung, wie sie von Menschen betrieben wird, ein total unnatürlicher Prozess ist (*Edelmann, 2002*), sind die grossen Methanemissionen allerdings nicht erstaunlich. Bedenklich stimmen die grossen Methanemissionen der Gärverfahren, wo in der Nachrotte viel Methan entweicht, da das Gärgut anaerob „angeimpft“ ist und daher nur langsam aerob wird.

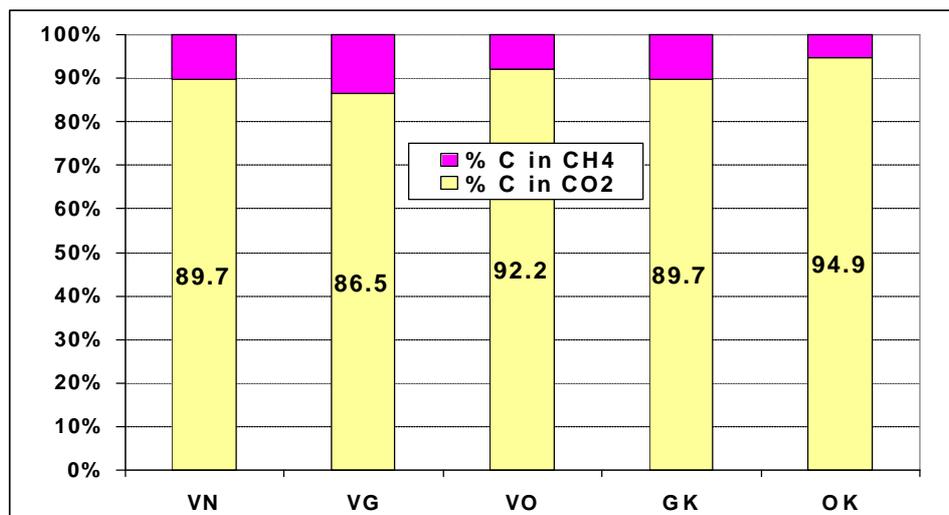


Abb. 2: Jeweils gewichtetes Verhältnis von Methan- und Kohlendioxidemissionen von Mieten unterschiedlichen Alters bei der Kompostierung, bzw. (anteilmässig) bei der Nachrotte bei unterschiedlichen biotechnischen Verfahren.

Abbildung 3 zeigt die totalen Punktzahlen der verschiedenen Verfahren bei verschiedenen Sensitivitäten. Eine hohe Punktzahl bedeutet hohe Umweltbelastung; ein negativer Wert, dass - ganzheitlich betrachtet - der Umwelt mehr genützt als geschadet wird. Die Variante „a“ ist die Standardvariante

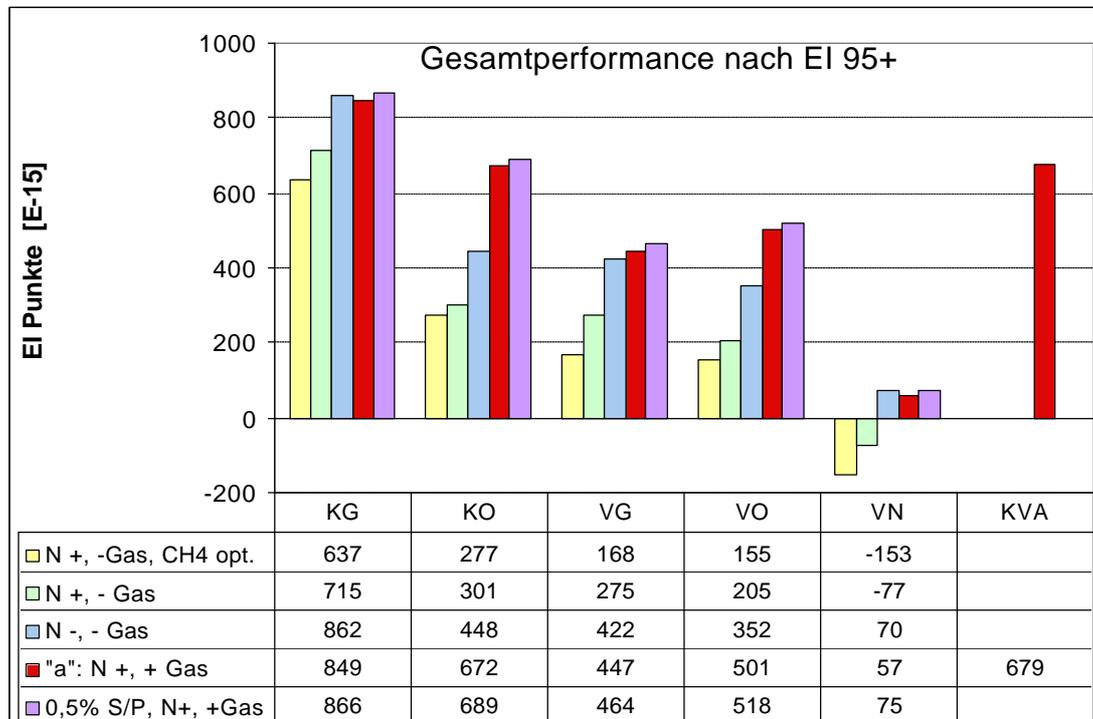


Abb. 3: Totale Punktzahlen der verschiedenen verglichenen Verfahren nach EI'95+. Bei den biotechnischen Verfahren sind Sensitivitäten gerechnet: N+: mit Nährstoffgutschrift für eingesparte Mineraldüngerproduktion von Makonährstoffen, - Gas: ohne Emissionen von Schwefelwasserstoff und stickstoffhaltigen Gasen (Ammoniak, Lachgas), CH₄ opt.: Unter Annahme, dass bei der Vergärung die Methanemissionen durch weitergehende Massnahmen auf 3% des abgebauten Kohlenstoffs reduziert werden, 0,5% S/P: Auswaschung von Schwermetallen und P in Gewässer.

Es ist augenscheinlich, dass die reine Vergärung (mit Nachrotte des Gärguts) mit signifikantem Abstand das umweltfreundlichste Verfahren ist. (Mit dem neuen Tool EI'99 ist der Abstand sogar noch signifikanter!). Abgesehen vom Treibhauseffekt - welcher hauptsächlich auf die Methanemissionen bei der Nachkompostierung des Gärguts zurückzuführen ist – schneidet das Verfahren VN in sämtlichen Wirkungskategorien am besten ab; es ist umweltneutral oder weist sogar negative Punktzahlen auf. Dieser aus Sicht der Umweltbelastung sehr erfreuliche Effekt ist auf die Gewinnung erneuerbarer Energie zurückzuführen: Weil ein Überschuss an erneuerbarem Strom erzeugt und ins Netz eingespeist wird, kann die Erzeugung von (in allen Wirkungskategorien belastendem) UCPT-Strömung eingespart werden, was in Form einer Gutschrift zu einer entsprechenden Reduktion der Punktzahl führt. Da VN den grössten Stromüberschuss produziert, sind die Gutschriften bei diesem Verfahren grösser als bei den übrigen biotechnologischen Prozessen. Am schlechtesten schneidet die voll automatisierte Tunnelkompostierung (KG) ab, die ab Klemme rund 100 KWh externe elektrische Betriebsenergie pro Tonne benötigt. Wenn man alle Energieaufwendungen berücksichtigt – also auch die Energie, die „im Hintergrund“ nötig ist, um die Energie ab Klemme bereitzustellen (Förderung, Raffinierung und Transport fossiler Energieträger und Uran, Wirkungsgrade und Leitungsverluste, Infrastruktur, Abfallentsorgung etc.) – ist der Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie 3 - 4 mal höher. Bei VN wird andererseits Strom ins Netz eingespeist: Es ergibt sich bei ganzheitlicher Betrachtung zwischen KG und VN auf Ebene der Primärenergie eine Energiedifferenz von über 700 KWh pro Tonne verarbeitetes Material!

KO hat zwar den kleinsten Infrastrukturaufwand – aber als offenes Verfahren ohne Biofilter die grössten gasigen Emissionen (exkl. Treibhausgase). Zudem ist KO für leicht abbaubare (Küchen-)Abfälle ungeeignet. Bei den Gärverfahren könnte einiges an Umweltbelastung eingespart werden, wenn dafür gesorgt würde, dass das austretende Material möglichst rasch möglichst wenig Methan emittiert. Die Herstellung von Mineraldünger verursacht nicht nur zusätzliche Umweltbelastungen in verschiedenen Wirkungskategorien der Ökobilanz, sondern erfordert auch knapp 90 KWh für die Bereitstellung der Menge an Makronährstoffen (N, P, K, Mg, Ca), welche in einer Tonne biogenen Abfalls steckt! Neben den Umweltaspekten sprechen daher auch energetische Überlegungen stark für den Einsatz von Kompost als Dünger und Bodenverbesserer. Für detailliertere Angaben wie z.B. Resultate der einzelnen Wirkungskategorien siehe *Edelmann* und *Schleiss* (2000). Dort sind zu den verglichenen Verfahren ebenfalls detaillierte ökonomische Angaben vorhanden, wobei festgehalten werden muss, dass durch technische Vereinfachungen die Kosten von VN unterdessen auf rund 60-70 Euro/t gesunken sind.

COVERGÄRUNG VON BIOGENEN STOFFEN IN LANDWIRTSCHAFTSANLAGEN

In der Studie "Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas" (*Edelmann et al., 2001*) wurde die Umweltfreundlichkeit der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas mit „Ecoindicator'99“, der neuesten Version der Bilanzierungsmethode, untersucht. Bei EI'99 werden neu drei Resultate ermittelt für drei unterschiedliche Persönlichkeitsprofile, welche die Schäden der drei Schadenskategorien individuell unterschiedlich stark gewichten.

Da Ziel der Arbeit war, abzuklären, ob für Strom aus landwirtschaftlichem Biogas prinzipiell die Möglichkeit der Vergabe des Labels "naturemade star" für besonders umweltfreundlichen Ökostrom besteht, wurde als funktionelle Einheit die „Produktion von 1 TJ Strom aus landwirtschaftlichem Biogas im BHKW“ gewählt. Es wurden zwei Bauweisen der Anlage (Stahl und Beton) verglichen unter Variierung von Substraten (Gülle von Schwein, Milchvieh, bzw. Mischgülle mit und ohne Zugabe von Cosubstrat) sowie unter Variierung von Emissionen (Reduktion der Ammoniakemissionen, Nutzung der Nachgärung unter Reduktion der Methan- und Lachgasemissionen, erhöhte Methanemissionen aus der Lagerung unvergorener Gülle sowie unter Einsatz von verschiedenen Aggregaten zur Stromgewinnung). Verschiedene Sensitivitäten wurden gerechnet und anschliessend diskutiert, um die Beeinflussung des Resultats durch einzelne Parameter abzuklären.

Als Referenzwert wurde die konventionelle Bewirtschaftung (d.h. Lagerung) von nicht vergorener Gülle herangezogen, d.h. es wurden nur die durch die Biogasgewinnung hervorgerufenen Mehrbelastungen betrachtet. Die Ökobilanz zeichnet sich durch Unsicherheiten aus bei den gasförmigen Emissionen (Ammoniak, Lachgas, Methan), welche einen sehr starken Einfluss auf das Resultat ausüben. (Ammoniak ist für mehr als die Hälfte der Umweltbelastung des Prozesses verantwortlich). Die gasförmigen Emissionen werden durch eine sehr grosse Anzahl von Parametern beeinflusst, welche von Betrieb zu Betrieb sehr unterschiedlich sein können (Betriebstyp, Fütterung, Aufstallung, Art der Lagerung, Bodenbeschaffenheit, Bewirtschaftung von Gülle und Wasser etc.). Zudem werden die gasförmigen Emissionen durch Bakteriengemeinschaften bewirkt, welche ihrerseits wieder von verschiedensten abiotischen Umweltfaktoren beeinflusst werden. Unter diesen Prämissen, welche gewisse Unsicherheiten nicht ausschliessen lassen, können trotzdem die folgenden Aussagen als gesichert gelten:

?? Die heutige Landwirtschaft, insbesondere die Bewirtschaftung der Hofdünger, ist stark umweltbelastend und massgebend für die Emissionen von Ammoniak, Methan und Lachgas in die Atmosphäre verantwortlich (*BUWAL, 1998; FAL 1997 & 2000*). Dadurch, dass die Hofdünger während des (zusätzlichen) Abbaus im Lager nicht in Kontakt mit Boden und Pflanzen sind, kann der (zusätzlich) entstehende mineralische Stickstoff nicht gebunden werden; er verflüchtigt sich teilweise bereits im Lager und speziell beim und unmittelbar nach dem Ausbringen auf das Feld als Ammoniak und/oder auch als Lachgas.

- ?? Die landwirtschaftliche Biogasgewinnung verstärkt die Emissionen insbesondere beim Ammoniak: Durch den optimierten anaeroben Abbau werden mehr Kohlenstoffverbindungen abgebaut als bei der Lagerung und dadurch auch mehr Stickstoff als Ammonium freigesetzt. Die Ammoniumionen stehen in einem pH-abhängigen chemischen Gleichgewicht mit dem schädlichen und flüchtigen Ammoniak. Der anaerobe Abbau erhöht den pH-Wert um eine halbe bis eine ganze Einheit. Eine pH-Erhöhung um eine Einheit bedeutet eine Verzehnfachung der Ammoniakkonzentration bei einer gegebenen Konzentration an mineralisiertem Stickstoff. Mehr Ammonium bei gleichzeitig höherem pH führt daher zwangsweise zu mehr Emissionen, welche in der Bilanz stark zu Buche schlagen. Ohne flankierende Massnahmen läuft die landwirtschaftliche Biogasgewinnung daher Gefahr, nicht sehr umweltfreundlich zu sein.
- ?? Gesichert ist, dass die Nutzung der Nachgärung (durch Abdeckung zumindest des ersten Lagerbehälters) die Methan- und auch Lachgasemissionen stark reduziert. Diese Verbesserung hat im Vergleich zum Referenzsystem (normale Lagerung und Ausbringen unbehandelter Gülle) zur Folge, dass ein bedeutender Teil der durch die Biogasgewinnung hervorgerufenen Mehrbelastung verhindert, bzw. kompensiert werden kann.
- ?? Gesichert ist ebenfalls, dass die Ammoniakemissionen ganz beträchtlich reduziert werden können, indem für die Gülle schonende Ausbringmethoden zu günstigen Zeiten angewendet werden. Sofern der Bauer seine Güllebewirtschaftung von Versprühen auf Schleppschlauchverfahren umstellt, ist die Reduktion der Umweltbelastung mehrfach grösser als die durch die Biogasgewinnung bewirkte Mehrbelastung.

Während Strom aus Feststoffgäranlagen die beste Energiebilanz von allen neuen erneuerbaren Energieträgern aufweist und problemlos die Anforderungen von „naturemade star“ - der höchsten Ökostromlabel-Stufe - erfüllt, müssen bei der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung flankierende Massnahmen ergriffen werden, um die Bedingungen zu erfüllen: Um die Punkte-Limite zu unterschreiten muss entweder der Lagertank abgedeckt werden zur Nutzung des in der Nachgärung entstehenden Methans und zur gleichzeitigen Verhinderung von Ammoniakemissionen und Lachgasbildung, oder der Bauer muss zur Ausbringung der Gülle das Schleppschlauchverfahren (o.ä.) einsetzen. (Letzteres bringt für die Umwelt sehr viel und bringt dem Boden gleichzeitig viel mehr Stickstoffdünger).

Wenn nun biogene Abfälle zur Covergärung auf den Hof gebracht werden, würde man erwarten, dass die Stromproduktion deutlich umweltfreundlicher wird, da mit praktisch derselben Infrastruktur dank erhöhtem Trockensubstanzgehalt im Gärgut deutlich mehr Gas produziert werden kann. Die Umweltbelastung durch die Bereitstellung der Infrastruktur spielt jedoch nur eine untergeordnete Rolle, da sie sehr viel weniger zur Umweltbelastung beiträgt als die Betriebsemissionen (Ammoniak etc.). Weil durch das Cosubstrat ebenfalls etwas Stickstoff freigesetzt wird, verbessert sich die Situation nur leicht. Abbildung 4 zeigt den Vergleich der Vergärung von Mischgülle (98 Grossvieheinheiten [GVE] Rindvieh und 127 GVE Mastschweine) in einer 300 m³-Anlage mit jener von Mischgülle plus 2 m³ Cosubstrat pro Tag (Annahme: Panseninhalt, Öl und Gemüseabfälle; TS: 12%, OS: 85%, Gasausbeute: 520 Lit/kg OS). Bei der Mischgülle plus Cosubstrat wird zusätzlich in einer optimierten Variante der Einfluss der Abdeckung des Lagertanks und das Ausbringen mit dem Schleppschlauch visualisiert.

Gegenüber reiner Mischgülle (MG) bringt die zusätzliche Vergärung von Cosubstrat zwar in der Gesamtheit Einsparungen, wobei durch die zusätzlich notwendigen Transporte (Heranführen Cosubstrat, weitere Ausbringdistanzen für das Gärgut) in einigen Kategorien auch grössere Belastungen zu beobachten sind. Optimierung der Güllebewirtschaftung („opt. tot.“) bringt spürbare Verbesserung: Die Abdeckung des Lagertanks zur Nutzung der Nachgärung verhindert Methan- und Lachgasemissionen (und erhöht die Gasausbeute), was sich u.a. in einem negativen Wert für den Treibhauseffekt auswirkt (d.h. es wird mehr Treibhauseffekt verhindert als neu geschaffen). Ein verbessertes Gullenhandling reduziert gleichzeitig die Belastung der Atemwege („respiratory“). Die totalen Belastungen sind daher – nach Abzug des Negativwerts – nur noch rund halb so gross wie ohne flankierende Massnahmen beim Handling,

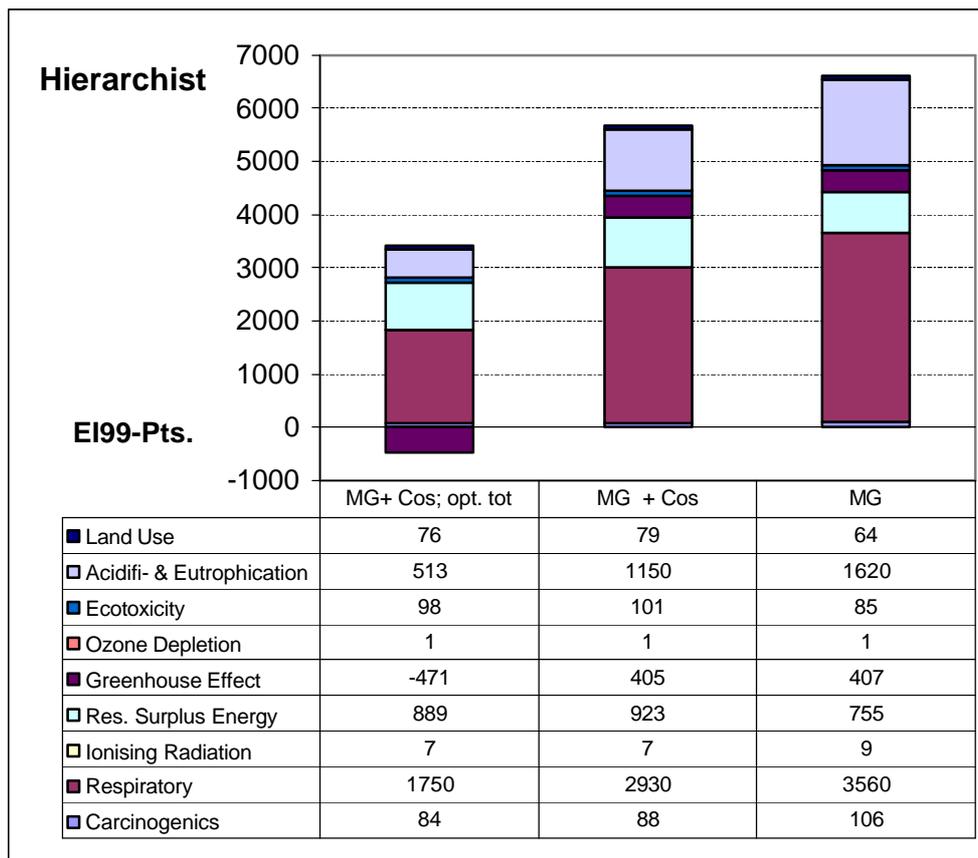


Abb. 4: Vergleich der einzelnen Wirkungskategorien bei der Biogasgewinnung aus Mischgülle (MG), aus Mischgülle plus Cosubstrat (Cos) sowie aus Mischgülle plus Cosubstrat bei Optimierung der Emissionen (Reduktion der Emissionen beim Ausbringen der Gülle und im Lagertank) am Beispiel des Persönlichkeitsprofils "Hierarchist". (funktionelle Einheit: Erzeugung von 1 TJ Strom)

Es spielt keine grosse Rolle ob reine Rindvieh- Schweine- oder aber Mischgülle vergoren wird. Ein Vergleich der Baumaterialien Stahl und Beton zeigte ebenfalls keine signifikanten Unterschiede, wobei in den nicht optimierten Varianten die Belastungen durch die Bereitstellung der Infrastruktur nur zwischen rund 11 und 17% der totalen Belastungen ausmachte. In den optimierten Varianten stieg der Anteil auf bis über 34%. Einsparung von Umweltbelastung wäre beim Bau möglich durch Bau des Gärbehälters in Holzbauweise (Edelmann 1983; Egger 1992). Da Holz mit der Sonne wächst, beträgt die Umweltbelastung für den Bau der Behälterwand in Holzbauweise weniger als 3‰ der Infrastrukturbelastungen und ist damit mehr als 40 mal kleiner als jene des Betons inkl. Armierungseisen plus dessen Entsorgung. Zudem kann der Holzfermenter mit Mineralwolle isoliert werden, was zusätzlich die Belastungen reduziert. Auf die gesamte Anlageninfrastruktur ergeben sich bei Holzbauweise Einsparungen von bis zu einem Fünftel.

Unterschiede zeigten sich bei der BHKW-Wahl: Wie aus Abbildung 5 ersichtlich wird, bringt das Zündstrahl-BHKW (Böhni 1999) sowohl unter Berechnung nach EI'95+, als auch unter den drei verschiedenen Betrachtungsweisen von EI'99 spürbar höhere Umweltbelastungen als das BHKW mit Magermotor, 60kW_{el.}, bzw. jenes mit Katalysator, 160 kW_{el.}. Beim Zündstrahl-BHKW wurde nach neuesten Messungen von einem Zündölanteil von nur 7% ausgegangen.

Detaillierte Angaben zur landwirtschaftlichen Biogasgewinnung mit einer ausführlichen Diskussion der gasigen Emissionen inkl. deren Unsicherheiten sowie umfangreiche Literaturangaben findet sich in Edelmann et al. (2001).

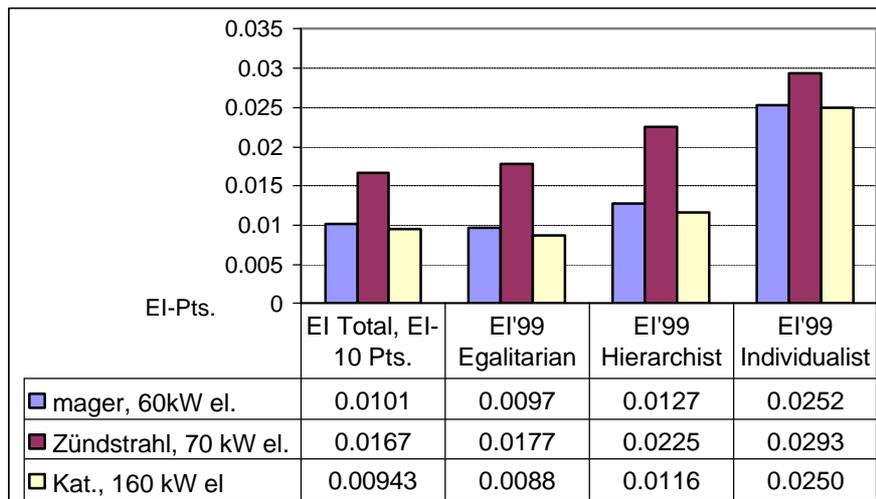


Abb. 5: Vergleich der durch den Betrieb bewirkten Emissionen bei der Verbrennung von 1 kg Biogas (Zündstrahl: inkl. Zündöl) von drei unterschiedlichen BHKW-Typen

QUALITÄT DES GÄRGUTS

Die beiden kurz zusammengefassten Ökobilanzen würden für die Vergärung noch weitere Vorteile aufzeigen, wenn man die Qualität des Gärguts hätte bilanzieren können: Bei der Vergärung entsteht neben den bis anhin betrachteten Produkten Strom und Wärme als drittes Kopplprodukt ein hochwertiger Kompost oder eine Gülle, deren Qualitäten gegenüber unvergorener Gülle nach verschiedensten Quellen durch die Vergärung verbessert wird. Als Vorteile von vergorener Gülle werden unter anderem genannt:

- ?? bessere Stickstoffverfügbarkeit und dadurch Ertragssteigerung (bedingt allerdings die Wahl des richtigen Düngezeitpunkts bzgl. des Wachstumsstadiums der Kultur),
- ?? starke Reduktion der Geruchsemissionen durch Abbau der flüchtigen organischen Komponenten,
- ?? Reduktion der Verätzung bei Pflanzen und Bodenlebewesen, wie Regenwürmern, sowie Aufbau einer Biozönose mit höherer Diversität im Boden durch Abbau der organischen Säuren und anderen, ev. toxischen Substanzen,
- ?? Verbesserung der Futterqualität von Grünland,
- ?? weniger starke Entmischung der Gülle dank deutlich besserer Homogenisierung, was u.a. auch das Ausbringen erleichtert,
- ?? schnelleres Eindringen der - dank einem intensiveren Abbau - homogeneren Gülle in den Boden und dadurch höhere Stickstoffverfügbarkeit für die Pflanzen,
- ?? Verbesserte Abtötung von Unkrautsamen und bessere Hygienisierung (wobei allerdings für eine vollständige Hygienisierung thermophile Temperaturen sinnvoll sind (*Fuchs et al. 2001*)) sowie
- ?? verbesserter Abbau von organischen Schadstoffen (Pestizide, halogenierte Kohlenwasserstoffe, etc. (*Klingler, 2000*))

Dies sind alles Punkte, welche für die Umwelt und für den Landwirt wichtig sind, und letzterem auch finanzielle Vorteile bringen. Leider sind diese Vorteile wegen der dürftigen Datenlage (kaum saubere Vergleichsuntersuchungen mit identischem Ausgangsmaterial) nicht exakt quantifizierbar und konnten daher keinen Einzug in die Bilanz finden.

Die dürftige Datenlage gilt auch für den Kompost: Eine Studie der *IEA (1997)* kommt zum Schluss, dass anaerobe Komposte nach einer geeigneten aeroben Nachbehandlung eine bessere Qualität aufweisen würden, als rein aerob behandelte Produkte. Gewisse Vertreter der traditionellen Kompostierung glauben sich andererseits einer besseren Qualität bei reinen Kompostierverfahren sicher zu sein. Beim Kompost wurde daher - unabhängig von allfälligen Pro und Contras - für alle Verfahren eine identische Qualität angenommen. Diese Annahme ist insofern zulässig, als die umfangreich vorhandenen analytischen Werte dafür sprechen, dass die Zusammensetzung des Ausgangsmaterials bei sorgfältiger Behandlung einen grösseren Einfluss auf die Qualität des erzeugten Komposts ausübt als die Verfahrenstechnik.

Der Kompost bringt jedoch allgemein - neben den oben in einer Sensitivität bereits bilanzierten Makronährstoffen - noch eine ganze Palette von weiteren Vorteilen, welche in der vorliegenden Untersuchung mangels Daten nicht berücksichtigt werden konnten. Erwähnt seien die schwer abbaubaren Kohlenstoffverbindungen, welche eine sehr wichtige Rolle für den Humusaufbau im Boden spielen (die Schweiz hat heute etwa eine Million Tonnen Humusverlust pro Jahr!) sowie Spurenelemente und Mikronährstoffe, Erhöhung der Wasser- und Nährstoffrückhaltekapazität des Bodens oder suppressive Eigenschaften gegenüber phytopathogenen Keimen. Alle diese wichtigen Eigenschaften des Komposts gehen bei der Verbrennung oder bei (unterdessen verbotener) Deponie verloren und führen zu weiteren Umweltbelastungen, wenn sie von aussen substituiert werden müssen. Diese positiven Eigenschaften hätten auch für die Ökobilanz zusätzliche positive Effekte: weniger Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen, Verbesserung der Bodenqualität (Mikrobiologie), Erhöhung der Diversität, Abbau von Pestiziden oder Versorgung mit Spurenelementen müssten mit entsprechenden Gutschriften bedacht werden können.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die – kaum angezweifelte – Verbesserung von verschiedensten Eigenschaften im Gärgut die Ökobilanzen der Biogasgewinnung insgesamt spürbar verbessern würde.

Sehr oft im Zusammenhang mit der Kompostqualität werden die Schwermetallgehalte diskutiert. Aus Sicht einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft sind alle Anstrengungen zu unternehmen, um den Schwermetallinput in den Boden möglichst dem Entzug durch Pflanzen anzugleichen. Der Ansatz dazu müsste aber von einer klassischen Stoffflussanalyse ausgehen. Dann wird ersichtlich, dass der Kompostierungs- oder Gärprozess selbst nur zu einem sehr kleinen Teil für die Immissionen verantwortlich ist. Der Schwermetallanteil des Rohmaterials und damit des Komposts stammt zum weitaus grössten Teil aus Ablagerungen, welche aus Luft und Regen in freiem Feld auf Pflanzen deponiert wurden. Nachdem das biogene Material zu Abfall geworden ist, kommt je nach Verfahrenstechnik bei der Verarbeitung eventuell noch etwas Abrieb von Maschinen dazu. Dies bedeutet, dass mit höchster Priorität die verschiedenen Schwermetallemissionen der zivilisatorischen Tätigkeiten an den Quellen zu bekämpfen sind. Parallel dazu müssen selbstverständlich auch die biotechnologischen Verarbeitungsbetriebe durch geeignete Verfahrens- und Materialwahl, durch weiter verbesserte Störstoffabtrennung und durch Fördern der Trenndisziplin bei der separaten Abfallerfassung ihren Beitrag zur Schwermetallreduktion leisten.

Der Kompost ist i.d.R. nur schwach mit Schwermetallen belastet. Sehr umfangreiche eigene Untersuchungen zeigen, dass die Schwermetallgehalte heute regelmässig bei maximal der Hälfte und sehr oft deutlich unter der Hälfte der (tiefen) schweizerischen Grenzwerte für Kompost liegen (*Bundeskanzlei 1986*). Wenn der Schluss gezogen wird, man würde den Kompost wegen des Schwermetallgehalts besser entsorgen (und ergo besser entsprechend mehr Mineraldünger einsetzen, welche ihrerseits bei der Herstellung Schwermetalle freisetzen und gleichzeitig auch solche selbst enthalten!), wird das Pferd am Schwanz aufgezügelt: Sinn einer langfristig orientierten Umweltpolitik kann nicht sein, natürliche Kreisläufe aufzubrechen und als „end of pipe“ Massnahme die wertvolle Biomasse dem natürlichen Kreislauf zu entziehen, um so „eine Schwermetallsenke einzurichten“...

Ähnliches gilt für das bei der Feststoffvergärung anfallende Presswasser (*Edelmann et al., 1999*): Zur Diskussion stehen zur Zeit in gewissen Staaten die AOX-Gehalte (halogenierte aromatische Verbindungen) von Presswasser. Hier muss der Ansatz wahrscheinlich ähnlich wie bei den Schwermetallen dahin gehen, dass die Emissionen an der Quelle bekämpft werden, d.h. weniger Einsatz von Pestiziden in der Landwirtschaft. Die Rückführung von wertvollen Substanzen in den natürlichen Kreislauf zu verbieten, weil sie während der Produktion mit Schadstoffen belastet worden sind (welche sich dann logischerweise auch in der Nahrung auf unserem Teller befinden), scheint im Sinn einer langfristigen nachhaltigen Kreislaufwirtschaft nicht der richtige Weg zu sein.

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich wird, ist das Presswasser in der Regel reich an Nährstoffen (insbesondere Ammonium/Ammoniak) sowie an gelösten und suspendierten organischen Komponenten. Die Höchstmenge Presswasser, die in der Schweiz jährlich pro Hektare eingesetzt werden kann (als t TS), wird bei fachgerechter Düngung durch die Nährstofffracht begrenzt. Die Schwermetallgehalte liegen zwar generell etwas höher als im Kompost, aber in der Regel unter den Grenzwerten für Kompost. Dank der allgemein guten Qualität ist in der Schweiz Presswasser sogar zum Einsatz als Flüssigdünger auf zertifizierten Biolandbaubetrieben freigegeben worden.

Allgemeine Grössen	TS	OS	pH	C/N	NH4-N	N-Min
13 Proben	% FS	% TS		Verhältnis	g/t TS	g/t TS
Mittelwert	14.2	44.8	8.2	10.2	11.24	11.25
Median	13.9	44.9	8.2	10.1	10.41	10.40
Minimum	8.3	34.9	7.7	8.7	5.12	5.14
Maximum	20.4	53.3	8.6	11.9	22.88	22.88
Standardabweichung	2.9	4.4	0.2	1.1	4.81	4.81

Nährstoffe	N-tot	P₂O₅ (tot.)	K₂O (tot.)	Ca (tot.)	Mg (tot.)
13 Proben	kg/t TS	kg/t TS	kg/t TS	kg/t TS	kg/t TS
Mittelwert	21.0	12.8	31.6	36.4	9.7
Median	21.4	13.2	31.4	36.3	9.8
Minimum	13.8	9.2	23.6	25.3	8.7
Maximum	26.1	14.6	42.8	52.8	11.8
Standardabweichung	3.6	1.6	6.5	7.8	0.8

Schwermetalle	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr	Hg
13 Proben	g/t TS						
Mittelwert	0.62	77.9	28.2	59.5	269.7	36.7	0.18
Median	0.62	75.3	28.8	53.6	263.0	37.0	0.16
Minimum	0.49	70.5	19.9	36.8	229.6	26.2	0.12
Maximum	0.90	90.3	41.4	111.0	336.0	53.0	0.31
Standardabweichung	0.10	6.3	6.7	21.9	29.0	8.2	0.06

Tabelle 1: Beispiel der durchschnittlichen Zusammensetzung des Presswassers von 13 Proben aus thermophilen Feststoffgäranlagen (*Schleiss, 1999*)

FAZIT

Ganzheitliche Betrachtungen zeigen, dass die Vergärung klar der ökologisch sinnvollste Weg zur Verwertung von biogenen Abfallstoffen ist, wobei auch die landwirtschaftlichen Covergärung mit entsprechenden Massnahmen in ländlichen Regionen Vorteile bringt. Die Ökobilanzen zeigen, dass das Verhältnis von erneuerbarer zu nicht erneuerbarer Energie eine Schlüs-

selrolle bei der Umweltbelastung spielt. Es stimmt mehr als nachdenklich, wenn heute immer noch nicht erneuerbare Energie eingesetzt wird, um bei aeroben Prozessen die Sonnenenergie, die in den chemischen Verbindungen der Pflanzen steckt, nutzlos als Abwärme in die Umwelt zu „verpuffen“. Dies werden wir uns in einem - erdgeschichtlich gesehen – sehr kurzen Augenblick nicht mehr leisten können.

LITERATUR

- Bundeskanzlei(1986) *Verordnung über umweltgefährdende Stoffe, StoV*, EDMZ, CH-3003 Bern
- Buwal (1998): *Methanemissionen der schweizerischen Landwirtschaft*, Schriftenreihe Umwelt, # 298, CH-3003 Buwal , Bern.
- Böhni T. (1999b): *Messprojekt Biogas-BHKW: Messkampagne an 2 neuen BHKW-Typen*, BFE, Forschungsprogramm Biomasse, CH-3003 Bern
- Edelmann W. (1983): *Das Biogas-Projekt am Strickhof*. ETH-Bulletin, #179, Mai 1983, ETH-Zürich, pp. 14-15.
- Edelmann W., Joss A., Engeli H. (1999): *Behandlung von Abwässern aus der Abfallvergärung mit der Membrantechnik*, Abwassertechnisches Seminar TU München, in: Wilderer P. (Hrsg.): *Prozessabwasser aus der Bioabfallvergärung*, Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft, #154, TU München
- Edelmann W., Schleiss K (2000): *Ökologischer, energetischer und ökonomischer Vergleich von Vergärung, Kompostierung und Verbrennung biogener Abfallstoffe*, Studie i.A. BFE und Buwal, Schriftenreihe BFE (2. Auflage 2001), Bern (120 Seiten; bestellbar auf www.arbi.ch/info.htm)
- Edelmann W., Schleiss K., Engeli H., Baier U. (2001): *Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichen Biogas*, Schriftenreihe BFE, Bern (95 Seiten, www.arbi.ch/info.htm)
- Edelmann W. (2002): *Vergleich des aeroben und des anaeroben Abbaus*, Internet: www.arbi.ch/problem.htm
- Egger K. (1992): *Biogasanlage aus Holz*, Die Grüne, 22/92, pp.26-29
- FAL (1997): *Ammoniak-Emissionen in der Schweiz – Ausmass und technische Beurteilung des Reduktionspotentials*, Schriftenreihe der FAL (26), Zürich-Reckenholz (Schweiz)
- FAL (2000): *Lachgasemissionen aus der schweizerischen Landwirtschaft*, Schriftenreihe der FAL (33), Zürich-Reckenholz (Schweiz)
- Frischknecht R. (1996): *Ökoinventare von Energiesystemen*, ISBN 3-9520661-1-7, ENET, Postfach, Bern (dritte, überarbeitete Auflage) (sehr große Datenbank auf CD-ROM vorhanden!)
- Fuchs J., Galli U., Schleiss K., Wellinger A. (2001): *VKS-Richtlinie 2001: Qualitätseigenschaften von Komposten und Gärgut aus der Grüngutbewirtschaftung*, Verband Kompostwerke Schweiz (VKS) & Biogas Forum, CH-3322 Schönbühl (11 S.) pdf-download auf: http://www.vks-asic.ch/acrobatreader/gkompostd05_04_01.pdf
- IEA (1997): *Development of a protocol for assessing and comparing the quality of aerobic composts and anaerobic digestats*, Final Report, IEA Energy from Solid Waste Task, march 97
- Klingler B. (2000): *Environmental aspects of biogas technology*, in: AD-Nett (ed): *AD: Making energy and solving modern waste problems*, Ortenblad H., Herning municipal utilities, Denmark, pp. 22-33
- Ortenblad H. (2000): *The use of digested slurry within agriculture*, in: AD-Nett (ed): *AD: Making energy and solving modern waste problems*, Ortenblad H., Herning municipal utilities, Denmark, pp.53-65
- Pre consultants (2003): *An introduction into the new methodology*, <http://www.pre.nl /eco-indicator99/default.htm>
- SCHLEISS K. (1999): *Kompostier- und Vergärungsanlagen im Kanton Zürich - Jahresbericht 1998*. Zürcher Daten Service 8090 Zürich.
- Zimmermann P., Doka G., Huber F., Labhardt A., Menard M. (1996): *Ökoinventare von Entsorgungsprozessen*, ESU-Reihe Nr. 1/96, ETH-Z/UNL, Zürich