

# Energieproduktion aus Küchenabfällen

## Ein Vergleich der Vergärung mit der Verbrennung in KVA

### Autoren:

Dr. Arthur Wellinger, Agentur für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE)

Dr. Werner Edelman, Biogas Forum Schweiz

Martin Schmid, Oekozentrum Langenbruck

Jörg Wochele, Paul Scherrer Institut

Hans-Christian Angele, Biomasse Schweiz

Positiv begutachtet durch:

- Prof. Dr. Werner Bidlingmaier, Universität Weimar
- Prof. Dr. Klaus Fricke, Technische Universität Braunschweig

20. Oktober 2006



---

## Zusammenfassung

Wie lässt sich am effizientesten Energie aus Küchenabfällen gewinnen, durch Erzeugen von Biogas in einer Vergärungsanlage oder durch Mitverbrennen in einer Kehrlicht-Verbrennungsanlage (KVA)? Experten namhafter Institutionen sind dieser Frage nachgegangen, darunter solche des Oekoentrums Langenbruck, des Biogas Forum, des Dachverbands Biomasse Schweiz, der Agentur für erneuerbare Energien (AEE) und des Paul Scherrer Instituts.

Bei der Vergärungstechnologie bauen Methanbakterien die organische Substanz im wässrigen Substrat der Küchenabfälle ab und es entsteht Biogas, welches energetisch genutzt werden kann. Anders als bei der Vergärung muss in der KVA der Wassergehalt erst verdampft werden, bevor die Küchenabfälle brennen und Energie abgeben. Wenn die feuchten Küchenabfälle einen Wassergehalt von 88% aufweisen, lässt sich auch theoretisch durch Verbrennen keine Energie mehr gewinnen.

Hauptergebnis der Expertenuntersuchung ist die Aussage, dass bei heutigen und zukünftigen Anlagen **die Vergärung in einer Biogasanlage deutlich mehr Energie pro Tonne (kWh/t) Küchenabfall erzeugt, als die Mitverbrennung in der KVA**. Mit einer optimierten Kombi-KVA Typ Hagenholz 2011 (Strom- und Wärmeproduktion) ergibt sich eine netto Energieproduktion von total 298 kWh pro Tonne Küchenabfall (60 kWh elektrisch und 238 kWh thermisch). Eine Biogasanlage mit moderner Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) kann netto insgesamt 658 kWh (314 kWh elektrisch und 344 kWh thermisch) pro Tonne Küchenabfall liefern, mehr als doppelt so viel wie die vergleichbare KVA. Bei der Aufbereitung von Biogas zu Treibstoff ist der Wirkungsgrad noch höher, als bei der Stromproduktion.

Neben der Energieeffizienz sprechen weitere Aspekte für die Vergärung: Das Gärgut kann als Dünger eingesetzt werden. Regionale Stoffkreisläufe werden geschlossen und die erdölintensive Herstellung von Mineraldünger (Stickstoff, Phosphat) sowie nicht erneuerbarer Torf können ersetzt werden. Mit der Verbrennung geht kostengünstiger, nachhaltig produzierter Dünger verloren. Zwar werden dem Kreislauf in der KVA Schwermetalle entzogen und konzentriert abgelagert, gleichzeitig werden mit dem mineralischen Dünger aber wieder Schwermetalle in den Kreislauf eingebracht. Die Asche und Schlacke müssen aufwendig entsorgt werden. Die Verbrennung (inkl. Sammlung und Transport) in der KVA ist mit durchschnittlichen Fr. 350.- pro Tonne teurer als die Vergärung mit maximal Fr. 250.- pro Tonne.



## Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage .....	1
2	Aufgabenstellung.....	1
3	Einleitung .....	1
4	Verbrennungstechnologie .....	2
5	Vergärung .....	3
6	Grundlagen zur Berechnung der Energieproduktion .....	5
7	Energieproduktion aus der Mitverbrennung in KVA.....	6
	7.1 KVA ohne Wärmerückgewinnung aus Abgaskondensation.....	6
	7.2 KVA mit Wärmerückgewinnung aus Abgaskondensation .....	7
8	Strom- und Wärmeproduktion aus Küchenabfällen in KVA.....	9
9	Strom und Wärme aus einer Kompogas-Anlage .....	9
10	Biogas als Treibstoff .....	10
11	Ökologische und ökonomische Betrachtung.....	11
12	Schlussfolgerungen .....	12

## Anhänge

- A1 Referenzen
- A2 Stellungnahme Bundesamt für Energie
- A3 Stellungnahme Prof. Bidlingmaier, Bauhaus-Universität Weimar
- A4 Stellungnahme Prof. Fricke, TU Braunschweig
- A5 Vergärungsanlagen und Energieproduktion in der Schweiz: Entwicklung 1900 bis 2005



## **1 Ausgangslage**

Entsorgung und Recycling Zürich (ERZ) hat am 6. April 2006 einen Bericht veröffentlicht [1], welcher der Frage nachging, ob sich eine separate Sammlung von Küchenabfällen aus den Haushalten der Stadt Zürich und eine anschliessende Vergärung aus ökologischer, energetischer und ökonomischer Sicht lohne. Zentral ist die Folgerung der Autoren, dass aus Küchenabfällen bei der Verbrennung in der KVA mehr Energie gewonnen werden kann als mit der Vergärung. Dieser Schluss wurde seither in den Medien wiederholt kommuniziert.

Bereits an der Pressekonferenz vom 6. April 2006 wurden von der Informationsstelle Biomasse-Energie von EnergieSchweiz Zweifel an einzelnen Annahmen und Schlussfolgerungen dieser Studie angemeldet. In der Folge hat der Verband Biomasse Schweiz eine breit abgestützte Expertengruppe zusammengestellt, um die entsprechenden Berechnungen zu überprüfen und zu kommentieren.

## **2 Aufgabenstellung**

Die Expertengruppe stellte sich die Aufgabe, Strom und Wärmeproduktion aus Küchenabfällen beim Mitverbrennen in Kehricht-Verbrennungsanlagen (KVA) und die Aufbereitung in Vergärungs-Anlagen aus energetischer Sicht zu vergleichen.

## **3 Einleitung**

Die Technische Verordnung über Abfälle (TVA) schreibt den Kantonen die Einführung einer getrennten Sammlung organischer Abfälle vor, soweit sie nicht im eigenen Garten verwertet werden können [4]. Die Deponierung von organischen Abfällen (Kohlenstoff > 50g/kg) ist seit dem Jahr 2000 nicht mehr gestattet [4; Anhang 1].

Das Abfallgesetz im Kanton Zürich (§ 2) verlangt, dass verwertbare Abfälle in der Regel getrennt gesammelt, dafür geeignete Abfälle vergärt oder dezentral kompostiert werden. Das Energiegesetz des Kanton Zürich (§12a) spezifiziert noch weiter und verlangt für alle biogenen Abfälle, die nicht dezentral kompostiert werden können, eine Ausschöpfung des Energiepotenzials, sofern technisch möglich und wirtschaftlich tragbar.

2004 wurden in der Schweiz 770'000 to getrennt gesammeltes Grüngut kompostiert und vergärt [5]. Trotzdem findet man noch rund 28% organischen Abfall in den Abfallsäcken, die in einer KVA verbrannt werden [6], d.h. prozentual in etwa gleich viel wie bei früheren Erhebungen. Grund ist die gleichzeitig um 48% gesunkene Menge an Restmüll im Sack pro Kopf und Jahr bei gleichbleibender Menge Küchenabfälle [7]. Die Garten- und anderen Grünabfälle werden zunehmend besser getrennt gesammelt (Abb.1), in Regionen mit Vergärungsanlagen werden mit dem Grüngut auch Küchenabfälle eingesammelt.

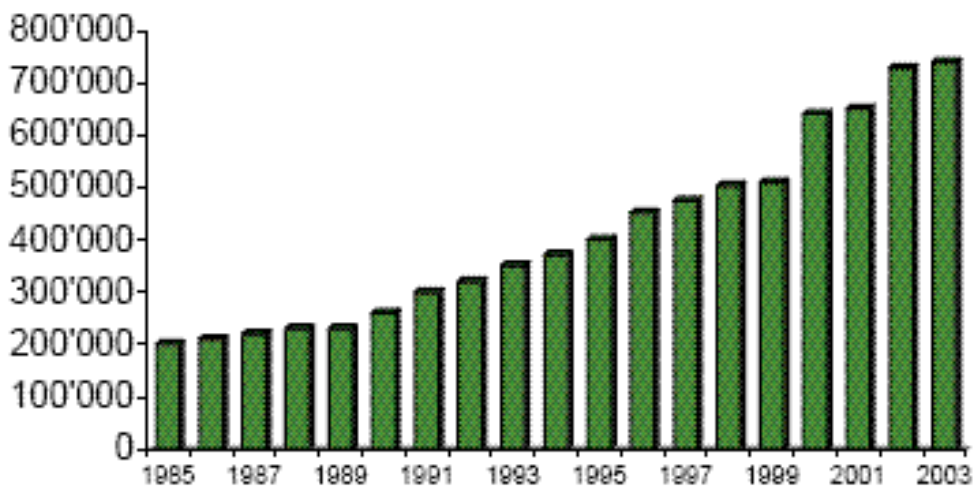


Abbildung 1: Getrennte Sammlung von biogenen Abfällen in der Schweiz in Tonnen pro Jahr [5]

Der vorliegende Bericht geht der Frage nach, ob die anaerobe Vergärung getrennt gesammelter Küchenabfälle energetisch sinnvoll sei oder ob sie besser zusammen mit dem Restmüll aus dem Abfallsack verbrannt werden sollen.

## 4 Verbrennungstechnologie

KVA haben einen Entsorgungsauftrag. Sie verbrennen Siedlungsabfälle, ein Gemisch aus Haushaltkehrich, Gartenabfällen, Gewerbe- und Industrieabfällen (Büros, Warenhäuser, Läden, Hotels, Restaurants, etc.), Sperrgut, Strassen- und Marktabfällen. Praktisch alle KVA der Schweiz nutzen heute die anfallende Energie zur Stromproduktion und sind mit Wärmerückgewinnung ausgerüstet [8].

Wie viele Kilowattstunden Strom oder Wärme eine KVA produziert, hängt vom Heizwert des Abfalls und der Ausgestaltung des Energie erzeugenden Anlageteils der KVA ab. Normalerweise

wird die Wärme der Verbrennung über einen Dampfturbinenkreislauf zur Stromerzeugung genutzt und zur Wärmenutzung als Prozess-, Heizdampf, Heisswasser oder Fernwärme verwendet. Wärme kann mit einem besseren Wirkungsgrad als Strom produziert werden, üblicherweise wird der Stromproduktion jedoch eine 2.5 bis dreifach so hohe Wertigkeit zugemessen als der Wärmeproduktion.

Nicht immer stehen günstige Wärmeabnehmer zur Verfügung. Die Anlagen sind daher sehr unterschiedlich zur Co-Produktion von Wärme und Strom ausgelegt (Tabelle 1). Sie können daher nicht plötzlich optimal als reine Strom- oder Wärmeproduktions-Anlagen betrieben werden.

Eine Kesselauslegung wird durch drei Faktoren beeinflusst: der thermischen Leistung, dem Heizwert des Substrats und dem Durchsatz. Diese drei Grössen sind voneinander abhängig, was in einem Feuerungsleistungsdiagramm dargestellt werden kann [15].

<b>Anlage</b>	<b>Grösse</b> [t/a 2004]	<b>Netto Strom- Wirkungsgrad [%]</b>	<b>Netto Wärme- Wirkungsgrad [%]</b>	<b>Referenz</b>
KVA Basel	184'395	2.6	76.9	[3]
KVA Buchs AG	112'849	11.8	16.7	[3]
KVA Turgi	115'235	17.5	10.0	[3]
KVA Thun	98'888	19.6	17.4	[3]
KVA Weinfelden	121'941	7.2	44.8	[3]
KVA Zuchwil	183'838	6.6	41.2	[3]
<b>Mittelwert aller KVA</b>		<b>10.8</b>	<b>24.0</b>	[12]
<b>Neubau KVA stromoptimiert</b>		29.2	0	[13]
Kombi-Anlage Wärme/Strom (Projekt Hagenholz 2011)		13.8	55.5	[1]

*Tabelle 1: Wirkungsgrade von KVA in der Schweiz*

## 5 Vergärung

In der Schweiz erfolgt die Vergärung von Küchenabfällen fast ausschliesslich in Kompogasanlagen. Einige wenige landwirtschaftliche Co-Vergärungsanlagen verwerten ebenfalls Anteile an

getrennt gesammelten Küchenabfällen. Restaurants- und Küchenabfälle werden in einem biologischen Prozess anaerob (unter Ausschluss von Luftsauerstoff) abgebaut. Als Produkt entsteht energiereiches Biogas, Kompost (Gärgut) und Flüssigdünger. Biogas setzt sich aus rund 60% Methan ( $\text{CH}_4$ ) und 40% Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) zusammen. Das dem früheren Stadtgas verwandte Biogas kann in einer Wärme-Kraft-Kopplungsanlage (WKK) zu Strom und Wärme umgesetzt, oder zu Erdgasqualität aufbereitet und als Treibstoff genutzt werden.

Die Schweiz hat weltweit die höchste Dichte an Vergärungsanlagen zur Biogasproduktion aus Garten- und Küchenabfällen. Heute sind 14 Anlagen mit Leistungen von 4'500 bis 13'000 Jahrestonnen in Betrieb (Abb. 2), rund die Hälfte davon im Kanton Zürich. Dazu kommt eine steigende Zahl landwirtschaftlicher Anlagen, welche neben Gülle auch Abfälle überwiegend aus der Lebensmittelverarbeitung mitvergären.

Im Durchschnitt wird heute rund ein Siebtel der getrennt gesammelten organischen Abfälle vergärt, im Kanton Zürich gar 42 %, der Rest wird kompostiert [9]. Damit ist der Kanton Zürich mit der Grüngutverwertung ein Netto-Energieproduzent: Dank der Vergärung wird in Zürich mehr Energie aus dem Grüngut erzeugt, als zur Einsammlung, Vergärung und Kompostierung aufgewendet wird. Der Kanton Zürich würde im schweizerischen Vergleich noch viel besser abschneiden, wenn in der Stadt Zürich mit der bereits bestehenden Sammellogistik für Grüngut auch Küchenabfälle eingesammelt würden.

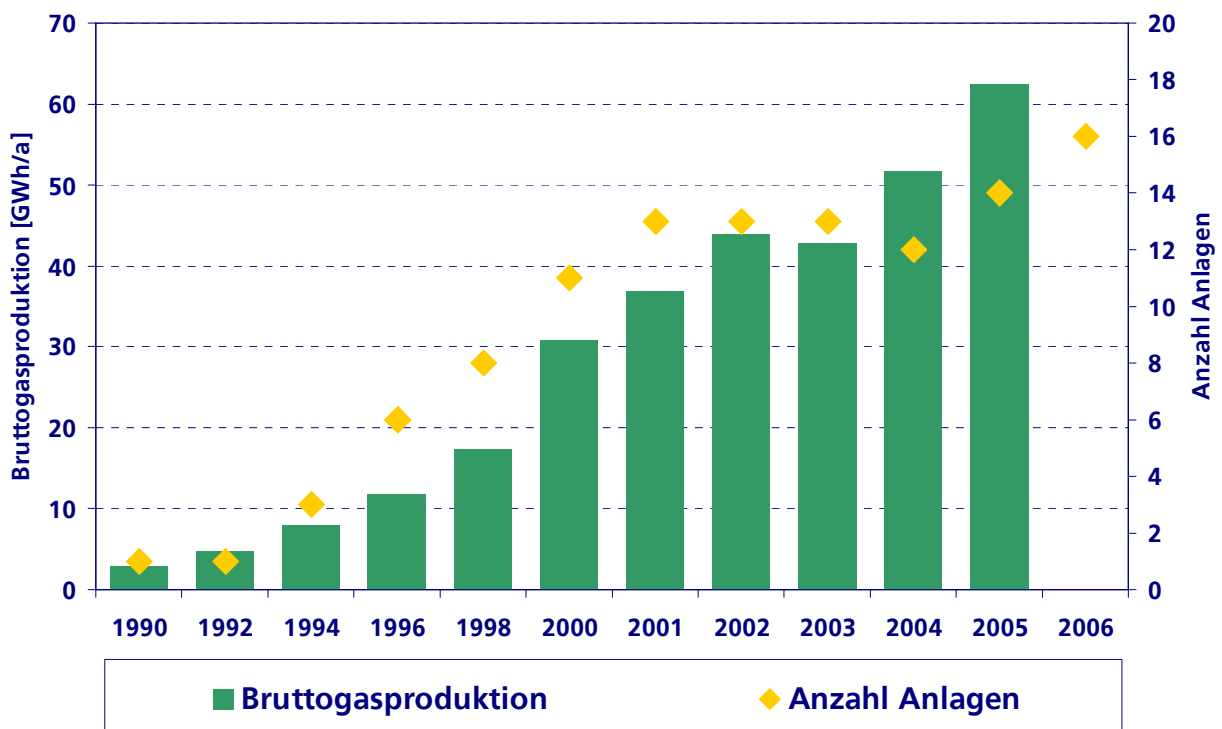


Abbildung 2: Entwicklung von Anlagen zur energetischen Verwertung von getrennt gesammeltem Grüngut [16]

Der Wirkungsgrad bei Vergärungsanlagen ist nicht eine rein technische Grösse, sondern hängt von der bakteriellen Tätigkeit ab, d.h. sie wird weitgehend von der Substratzusammensetzung mitbestimmt. Die wichtigste Grösse bei der Vergärung ist daher der biologische Abbaugrad, d.h. der Anteil der zugegebenen organischen Substanz, der bakteriell abgebaut werden kann.

Küchenabfälle mit einem Energiegehalt von 3'560 MJ/to bei einem TS-Gehalt von 20% produzieren im Schnitt 140m<sup>3</sup>/t Biogas mit einem Energiegehalt von 2'923 MJ (58%Methan) [22].

## 6 Grundlagen zur Berechnung der Energieproduktion

Küchenabfälle können eine ganze Bandbreite von chemischen Zusammensetzungen aufweisen je nach Anteil der stofflichen Komponenten (Fett, Stärke, etc.). Im weiteren enthalten Küchenabfälle viel Wasser.

Die folgenden Berechnungen nehmen Bezug auf den von ERZ kommunizierten Wert mit 20 % Trockensubstanzgehalt. Der entsprechende Energiegehalt basiert auf einer Studie von Meraz [18]. Die Berechnung des Heizwertes der Küchenabfälle  $H_u$  aufgrund der chemischen Zusammensetzung nach einer empirischen Formel von Boie [15] entspricht der obengenannten Angabe:

<b><math>H_o</math> trocken</b>	<b>19.0 MJ/kg</b>	<b><math>H_o</math> feucht</b>	<b>3.80 MJ/kg</b>
<b><math>H_u</math> trocken</b>	<b>17.8 MJ/kg</b>	<b><math>H_u</math> feucht</b>	<b>1.56 MJ/kg</b>

Als  $H_o$  bezeichnet man den oberen Heizwert und mit  $H_u$  den unteren. Beim oberen Heizwert wird die Kondensationsenergie, d.h. die Energierückgewinnung aus dem Verbrennungswasser mit berücksichtigt. Die Vergärung erfolgt in der wässrigen Lösung. Die Verdampfungsenthalpie ist daher nicht von Belang. Maximal stehen den Bakterien 19.0 MJ/kg Trockensubstanz (vgl. oben) zur Verfügung. Unter Berücksichtigung des TS-Gehaltes von 20 % (d.h. 80% Wasser) ergibt sich:

$$\text{Energie Vergärung} = 19.0 \times 0.2 = \mathbf{3.80 \text{ MJ/kg}}$$

## 7 Energieproduktion aus der Mitverbrennung in KVA

### 7.1 KVA ohne Wärmerückgewinnung aus Abgaskondensation

Für eine KVA berechnet sich die Strom- und die Wärmeproduktion aus dem Heizwert und dem Strom- resp. Wärmeproduktionswirkungsgrad.

Für die Berechnung der Strom- und Wärmeproduktion wird davon ausgegangen, dass Küchenabfälle in der KVA mit dem gleichen Wirkungsgrad umgewandelt werden können, wie der Gesamtabfall einer Anlage.

Bei Küchenabfällen muss der grosse Wassergehalt zuerst verdampft werden, bevor das Gut selbst brennen und Energie abgeben kann. Daher ist die verfügbare Energie ( $H_u$  feucht) wesentlich kleiner als bei der Vergärung. Die benötigte Verdampfungs-Energie stammt von den energiereichen Fraktionen des Abfalls. Eine Vortrocknung wird im Allgemeinen nicht vorgenommen.

Mit Hilfe der Verbrennungsgleichung [15] haben wir den Heizwert von Küchenabfällen in Funktion des Wassergehaltes bestimmt (Abb.3).

Gemäss der Modellberechnung ist bei 88% Wasser der Energieaufwand für die Wasserverdampfung gleich hoch wie der untere Brennwert. **Das bedeutet, mit Verbrennung lässt sich auch theoretisch keine Energie mehr erzeugen!**

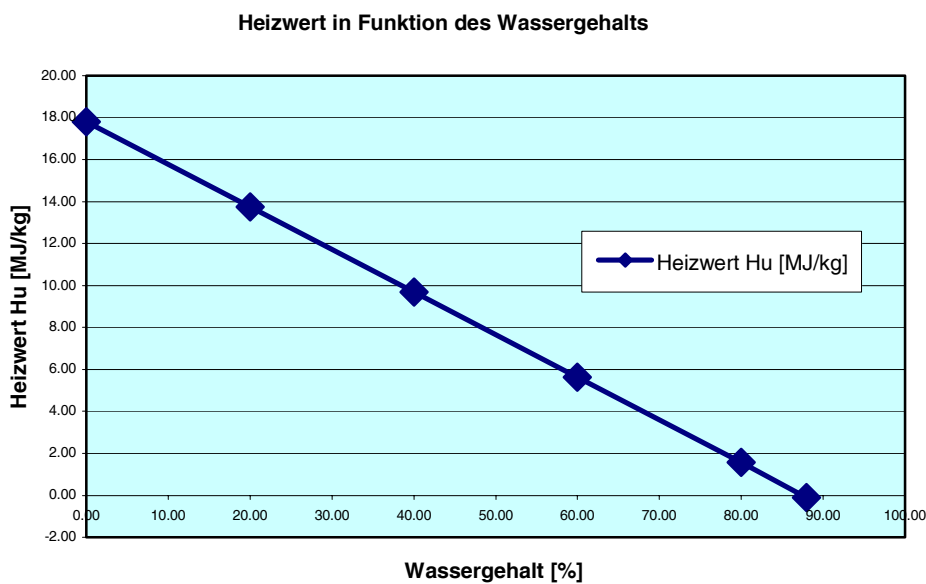


Abbildung 3: Heizwert von Küchenabfall in Funktion des Wassergehalts

## 7.2 KVA mit Wärmerückgewinnung aus Abgaskondensation

Rechnerisch lässt sich ein Teil der Verdampfungswärme mittels Abgaskondensation zurückgewinnen. Nach unserem Kenntnisstand ist jedoch weltweit noch keine KVA mit einer Abgaskondensation ausgerüstet worden. Die technischen Probleme (Korrosion) stehen wohl in keinem Verhältnis zum möglichen Ertrag. Ein Beispiel mit Bedingungen, die für die Rückgewinnung extrem vorteilhaft sind, zeigt den rein theoretischen Energiegewinn auf.

Biogene Reststoffe mit 20%TS brennen nicht. Die maximale adiabatische Temperaturerhöhung von 380°C ist dazu zu klein. Für die Rechnung wurde deshalb ein Brennstoffgemisch eingesetzt (typisches Grüngut aus dem Garten mit 45% TS, d.h. 55% Wassergehalt), das die erforderliche Temperatur ohne Luftvorwärmung gerade noch erreicht. Die theoretische adiabate Temperaturerhöhung bei einer Luftzahl von  $\lambda = 2.0$  beträgt dabei 882°C. Mit den getroffenen Annahmen wird die Wasserdampfmenge pro Abgasvolumen maximiert, und damit auch die rückgewinnbare Verdampfungs-Enthalpie. Entscheidend ist die Wasserdampfsättigung (Abb. 4). Es kann nur die Menge Wasser aus dem Abgas kondensiert werden, welche über der Dampfsättigung bei der erreichten Abgastemperatur liegt (Abb. 5). Es wurde eine Abgastemperatur von 50°C angenommen, gegenüber 140°C ohne Abgaskondensation. Damit die Sättigung nicht schon alleine mit der Umgebungsluft erreicht wird, wurde ein kühler Herbsttag (10°C) mit relativ trockener Luft (50% relative Feuchte) angenommen.

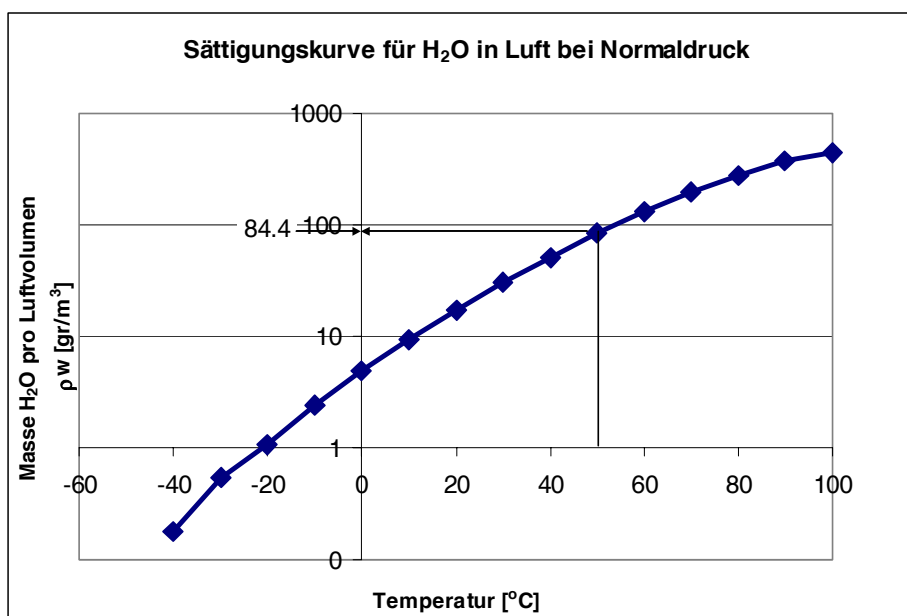


Abbildung 4: Wasserdampfsättigung der Luft in Abhängigkeit der Temperatur in Gramm pro Kubikmeter

Das Rechenbeispiel berücksichtigt keine technische Effizienz (von Wärmetauschern und Isolationen). Es wird also nur die Physik der Kondensation (mit 100% Wirkungsgrad) berücksichtigt.

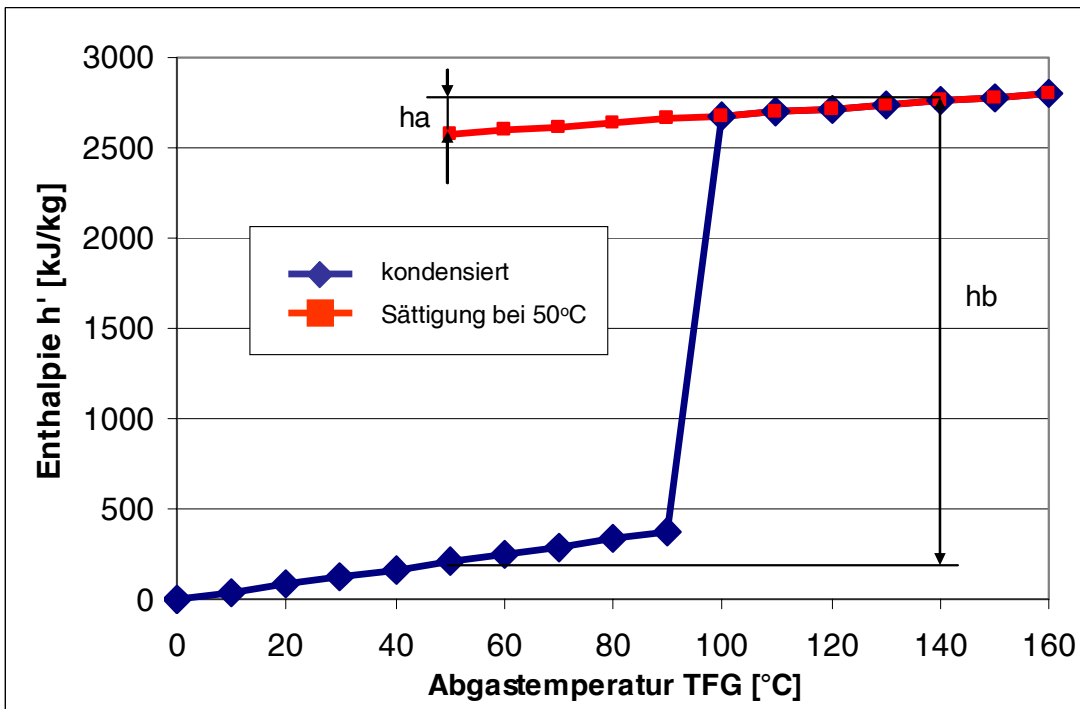


Abbildung 5: Gewinnbare Energiemengen  $h_a$  und  $h_b$  aus dem übersättigten und gesättigten Anteil des 50°C kalten Abgases

Unter obigen Annahmen beträgt die Differenz zwischen  $H_U$  (6.51 MJ/kg nass) und  $H_O$  (8.51 MJ/kg nass) entsprechend 2.005 MJ/kg nasser Brennstoff. Die Abgase enthalten pro Kubikmeter 108 Gramm Wasser aus der Brennstofffeuchte, von dem im Brennstoff enthaltenen Wasserstoff, sowie aus der Feuchte der Verbrennungsluft. 84.4 Gramm Wasser bleiben im 50°C warmen Abgas. Die Differenz ( $h_b$ ) inklusive der Abkühlung des verbleibenden Wasserdampfes ( $h_a$ ) ergeben zusammen 0.43 MJ/kg nasser Brennstoff. Technisch Umsetzbar dürften davon ca. 90% sein, was eine Effizienz von 19.5% bedeutet.

## Fazit

Falls künftig KVA mit Abgaskondensation gebaut werden, könnten bei 50°C Abgastemperatur in der Praxis höchstens 19% Kondensationswärme rück gewonnen werden.

Das heisst, aus der Mitverbrennung von Grüngut mit 20% TS sind bei 100% Wirkungsgrad von Feuerung und Abgaskondensation maximal 430 kWh aus der Verbrennung und 137 kWh aus der Abgaskondensation zu gewinnen. In der Summe 567 kWh/t nasser Brennstoff. Davon werden höchstens 90% technisch nutzbar sein, d.h. total 510 kWh/t nasser Brennstoff oder 48% des Inputs.

## 8 Strom- und Wärmeproduktion aus Küchenabfällen in KVA

Der schweizerische Mittelwert der Netto-Stromwirkungsgrade aller KVA liegt für 2004 bei 10.8% [12]. Für eine neue, auf Strom Produktion optimierte KVA kann mit einem Netto-Stromwirkungsgrad von über 29% gerechnet werden [13]. Für eine zukünftige Kombianlage (Hagenholz) wird ein Netto-Stromwirkungsgrad von 13.8% und ein Netto-Wärmewirkungsgrad von 55% Wärme eingesetzt [1].

Daraus errechnen sich folgende Energieproduktionen aus Küchenabfällen mit einem unteren Heizwert  $H_u$  feucht von 1.56 MJ/kg (Tabelle 2).

	<b>KVA aktuell</b>	<b>KVA stromoptimiert</b>	<b>Kombi-Anlage mit Abgaskondensation</b>
Wirkungsgrad Strom	10.8 %	29.2 %	13.8 %
Wirkungsgrad Wärme	24.0 %	0 %	55.0 %
Stromproduktion netto	47 KWh / t	127 KWh / t	60 KWh / t
Wärmeproduktion netto	104 KWh / t	0	238 KWh / t
<b>Energieproduktion</b>	<b>151 KWh / t</b>	<b>127 KWh / t</b>	<b>298 KWh / t</b>

Tabelle 2: Strom- und Wärmeproduktion in verschiedenen KVA (netto)

## 9 Strom und Wärme aus einer Kompogas-Anlage

Bereits 2004 produzierten die Kompogas-Anlagen im Kanton Zürich mit biogenen Abfällen aus Garten, Industrie und Grossküchen im Schnitt 110m<sup>3</sup> Biogas/t., aus Küchenabfällen können 140 m<sup>3</sup>/t gewonnen werden [9].

Die Netto-Stromproduktion in neuen Anlagen wie z.B. in Passau (Deutschland) liefern deutlich mehr Netto-Strom und –Wärme als ältere Vergärungsanlagen [20]. Dies liegt an der stetigen Entwicklung der Gäranlagen und der biogasbetriebenen WKK.

Auch diese neuen Anlagen lassen sich in Zukunft noch optimieren. Die biogasbetriebenen WKK der neusten Generation haben Wirkungsgrade bis 42% [24] und der Stromeigenverbrauch der Kompogasanlagen wird deutlich von 14% auf 8% gesenkt (Tabelle 3). Durch ergänzende Pro-

zessinstallationen (ORC) kann gemäss Berechnung des Ökozentrum Langenbruck [23] der brutto Stromwirkungsgrad auf 51% gesteigert werden (Abb. 6).

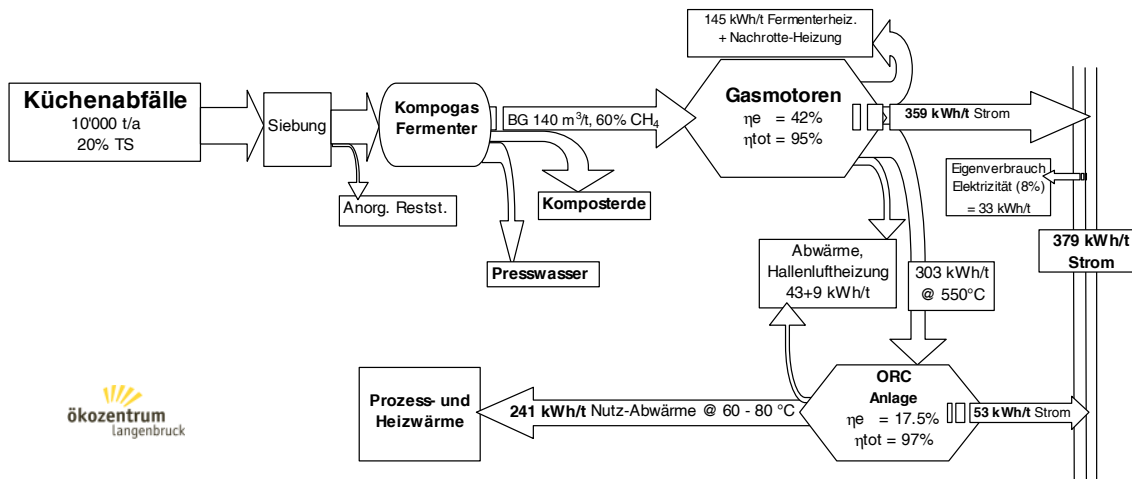


Abbildung 6: Stromoptimierte Vergärung mit optimierter WKK und ORC [23]

Abfallart	Gasproduktion [m³/t]		Wirkungsgrad elektrisch	Strom Netto [kWh/t]	Wärme Netto [kWh/t]
	Bereich	Mittel			
Küchenabfälle konventionelle WKK	120-160	140	35%	262	258
Küchenabfälle neue WKK	120-160	140	40-42%	314	344
Küchenabfälle neue WKK mit ORC	120- 160	140	51%	379	207

Tabelle 3: Strom- und Wärmeproduktion in Kompogas-Anlagen

## 10 Biogas als Treibstoff

Anders als bei der Dampfproduktion in einer KVA kann Biogas aufbereitet und als Treibstoff genutzt werden. Der Wirkungsgrad ist dabei sehr hoch, für die Aufbereitung und Kompression auf Niederdruck muss nur mit rund 8% Prozessenergie gerechnet werden [21].

Vergärungsanlagen mit Treibstoffproduktion zeigen folgende Energieproduktion aus Küchenabfällen (Tab. 4).

Abfallart	Gasproduktion [m <sup>3</sup> /t]		Energieinhalt Brutto [kWh/t]	Treibstoff Brutto [kWh/t]	Treibstoff Netto[kWh/t]
	Bereich	Mittel			
Küchenabfälle	120-160	140	812	812	747

*Tabelle 4: Energieproduktion aus Küchenabfällen mittels Vergärung*

Die Einspeisung von aufbereitetem Biogas ins Erdgasnetz erlaubt weiter eine zeitlich von der Wärmeproduktion unabhängige Verwertung. Eine fehlende Abnahme der produzierten Energie wie es bei einer KVA, oder auch bei einer Stromproduktion aus Biogas vorkommen kann, wird damit vermieden.

## 11 Ökologische und ökonomische Betrachtung

Bei der Verbrennung entsteht Energie i.d.R. in Form von Dampf, welcher zu Heizzwecken genutzt oder in Strom gewandelt wird. Als stoffliche Komponenten verbleiben Asche und Schlacke, welche aufwändig entsorgt werden müssen. Es resultiert also ein stoffliches Defizit sowohl bezüglich organischen als auch anorganischen Komponenten, die für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Bodens sehr wichtig sind. Der positive Aspekt der Verbrennung ist der Entzug von Schwermetallen aus der Umwelt und deren konzentrierte und kontrollierte Deponierung. Allerdings wird dieser Vorteil wieder relativiert, weil – ohne eine Rückführung von Kompost als Bodenverbesserer und Dünger – ein erneuter Schwermetalleintrag über die Düngung mit Mineraldünger und die Versorgung des Bodens mit importiertem Kohlenstoff (Torf, Stroh etc.) erfolgt.

Das Gärgut kann als wertvoller Dünger rezykliert und der natürliche Kreislauf nachhaltig geschlossen werden. Die heutige konventionelle Landwirtschaft ist nicht nachhaltig: Es werden Mineraldünger eingesetzt, mit denen neue Schwermetalle in den Boden eingetragen werden, die bei Herstellung und Transport ausserordentlich umweltbelastend sind. Beispielsweise werden im Fall von Stickstoffdünger, u.a. aus Erdgas, riesige Mengen Treibhausgas erzeugt (Haber-Bosch-Synthese).

Die Herstellung von 1kg Stickstoffdünger braucht in etwa 1.6 Liter an Erdöläquivalenten. Für Phosphat müssen beispielsweise im südlichen Marokko grosse Gesteinsmengen abgebaut, mechanisch und chemisch verarbeitet sowie über grosse Distanz transportiert werden, etc. Gleichzeitig hat die Schweiz jedes Jahr rund eine Million Tonnen Humusverlust infolge von brachliegenden Feldern, Bodenverdichtung und Drainagen [10]. Dieser wird zum Teil kompensiert mit Torf, der über Hunderte von Kilometern herangefahren wird. Torf ist nicht erneuerbar und ist im

Vergleich zu Gärgut und Kompost arm an Nährstoffen und Spurenelementen. Er verfügt zudem über keine suppressive Wirkung gegenüber pflanzenpathogenen Keimen.

Die heutige Landwirtschaft ist – mit steigendem Ölpreis - auf kostengünstige, nachhaltig produzierte Dünger angewiesen. Bei der Vergärung entsteht wertvoller Kompost mit Nährstoffen, Spurenelementen und organisch langsam abbaubaren Verbindungen, welche Humusaufbau bewirken. Allein für die Herstellung der Makronährstoffe (Stickstoff, Phosphor, Kalium und Kalzium), die in einer Tonne Kompost vorhanden sind, würde es rund 90 kWh Fremdenergie bei erheblicher sonstiger Umweltbelastung brauchen [11]. Das feste Gärgut (ev. nachkompostiert) und das nährstoffreiche Presswasser, das bei der Abpressung des Gärguts entsteht, ist für zertifizierte Bio-Landwirtschaftsbetriebe zugelassen.

In der KVA gehen Kompost wie auch Presswasser mit ihren wertvollen Bestandteilen verloren. Dies ist heute im Hinblick auf eine langfristig nachhaltige Versorgung mit Nahrungsmitteln nicht mehr verantwortbar – umso mehr, als jetzt infolge von zivilisatorischer Schadstoffbelastung auch der Klärschlamm nicht mehr in den ökologischen Kreislauf zurückgeführt werden darf. Die Entsorgung der in der KVA anfallenden Filterasche erfordert grosse Aufwendungen bei der Nachsorge in Sondermüll-Deponien. Auch die Schlacke muss sorgfältig aufbereitet und deponiert werden.

Die Verwertungspreise von Küchenabfällen in einer Vergärungsanlage betragen im Schnitt Fr. 250.-- pro Tonne. Dieser Preis teilt sich auf in rund Fr. 100.-- pro Tonne für Sammlung und Transport und Fr. 150.-- für die anaerobe Aufbereitung. Die Entsorgungspreise in einer KVA betragen im Mittel Fr. 350.-- pro Tonne, unter Annahme einer mittleren Sackgebühr von Fr. 1.75 pro 35 Liter (mittleres Sackgewicht 5 kg [14]). Die Verwertungspreise in Vergärungsanlagen werden in Zukunft weiter abnehmen. Die Entwicklung ist aufgrund der laufend steigenden Anlagenzahlen, der zunehmenden Konkurrenz um die Substrate und die zu erwartende Einführung einer Einspeisevergütung für den Strom erklärbar.

## **12 Schlussfolgerungen**

Der vorliegende Bericht geht der Frage nach, ob die anaerobe Verwertung getrennt gesammelter Küchenabfälle energetisch sinnvoll sei oder ob sie besser zusammen mit dem Restmüll aus dem Abfallsack verbrannt werden sollen.

Mit Biogas kann sowohl Strom und Wärme als auch Treibstoff erzeugt werden. Bei KVA stehen nur Strom und Wärme zur Wahl. Die vergleichende Untersuchung konzentriert sich daher auf Strom und Wärme.

Von einem Vergleich der gesamten Energiemenge (Strom und Wärme) haben wir Abstand genommen, da die Exergie (d.h. die Fähigkeit Arbeit zu leisten) sehr unterschiedlich ist. Üblicherweise wird der Stromproduktion eine 2.5 bis dreifach so hohe Wertigkeit zugemessen als der Wärmeproduktion.

Die Berechnungen nahmen Bezug auf den vom ERZ kommunizierten Wert des Küchenabfalls von 20% Trockensubstanzgehalt. Der entsprechende Energiegehalt basiert auf einer Studie von Meraz. Deren Energiewerte vergleichen sich sehr gut mit den Berechnungen gemäss Boie aufgrund der chemischen Zusammensetzung wie sie von Lemann [15] verwendet werden.

Für beide Aufbereitungsverfahren, der Verbrennung und der Vergärung, wurden drei Technikvarianten geprüft, welche in den nächsten fünf Jahren für den Praxiseinsatz zur Verfügung stehen werden. Die erste Variante (Grundvariante) basiert auf den heutigen Durchschnittswerten der Aufbereitung von Küchenabfällen.

Bei den KVA wurden zwei künftige Varianten mitberücksichtigt: Eine strom-optimierte Anlage, wie sie im Moment für Amsterdam geplant wird und eine Kombi-Anlage, wie sie für Hagenholz geplant ist. Bei der Vergärung wurde einmal eine neuere Anlage mit modernster WKK-Technologie eingesetzt. Im dritten Fall wurde von einer kombinierten WKK/ORC (organic ranking cycle) Anlage ausgegangen, wie sie in der Westschweiz zur Zeit in Diskussion steht.

Bei allen Varianten war das Resultat dasselbe: **Bei der Verwertung von Küchenabfällen ist aus energetischer Sicht die Vergärung der Mit-Verbrennung in KVA überlegen.** Bei den aktuellen Anlagen produzieren KVA im Schnitt netto pro Tonne 47 kWh Strom und 104 kWh Wärme, die Gäranlagen dagegen 262 kWh Strom und 258 kWh Wärme.

Für die zukünftigen KVA lassen sich bei der stromoptimierten Anlage pro Tonne 127 kWh Strom, aber keine Wärme produzieren und bei der Kombi-Anlage sind 60 kWh Strom und 238 kWh (312 kWh mit Abgaskondensation) Wärme zu erwarten. Die Vergleichszahlen bei der Vergärung betragen pro Tonne behandeltes Material 314 kWh und 344 kWh Wärme für eine optimierte WKK und 379 kWh Strom und 207 kWh Wärme für die Kombi- WKK/ORC-Anlage.

Neben der Energieeffizienz sprechen im Hinblick auf eine nachhaltige Bewirtschaftung weitere Aspekte für die Vergärung: Das Gärgut kann als Dünger und Bodenverbesserer eingesetzt werden. Regionale Stoffkreisläufe werden geschlossen und erdölintensive Herstellung von Mineraldünger und Abbau von nicht erneuerbarem Torf können ersetzt werden. Mit der Verbrennung geht kostengünstiger, nachhaltig produzierter Dünger verloren.



## A1 Referenzen

- [1] Stadt Zürich, Entsorgung + Recycling Zürich, Verwertung der biogenen Abfälle in der Stadt Zürich, ERZ, 6. April 2006, 60 Seiten.
- [2] BiomassEnergie, Ernst Basler + Partner AG, Zollikon, Kommentar zur Studie von Entsorgung und Recycling Zürich (ERZ), Argumentarium für Vergärung, 13. Februar 2006
- [3] Jörg Wochele, PSI, Labor für Energie und Stoffkreisläufe, Strom- und Wärmeproduktion aus Grüngut: Vergleich Mitverbrennen in KVA mit Vergärung, persönliche Mitteilung, Studie in Arbeit
- [4] Technische Verordnung über Abfälle (TVA), Stand 23. August 2005.
- [5] BAFU, Abfallmengen und Recycling im Überblick, Oktober 2005
- [6] BUWAL, Erhebung der Kehrlichzusammensetzung 2001/02, BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 356, Bern, 2003.
- [7] BUWAL, Sackgebühr, Schriftenreihe Umwelt 357, 2003
- [8] BUWAL, Stammdaten der Kehrlichverbrennungsanlagen im Jahre 2003. BUWAL, Bern, 2004.
- [9] ARGE Inspektorat, Kompost- und Vergärungsanlagen – Jahresbericht 2005.
- [10] Edelmann, W. Optimale Verwertung biogener Abfälle, gwa 2/2006, S. 125 – 130.
- [11] Edelmann, W.; Schleiss, K.; Joss, A.; Ilg, M.; Steiger, H. Ökologischer, energetischer und ökonomischer Vergleich von Vergärung, Kompostierung und Verbrennung biogener Abfallstoffe, BFE und Buwal, Schriftenreihe BFE, 120 S. (1999)
- [12] EDMZ, Schweizerische Gesamtenergie Statistik, 2004
- [13] AWEL, Studie zum Energiepotential von KVA in der Schweiz, AWEL, Zürich, Juni 2005.
- [14] Jahresberichte 2004 der einzelnen KVA.
- [15] Martin F. Lemann, Abfalltechnik, Peter Lang Verlag, Bern, 2005, 415 Seiten
- [16] BFE, Schweiz. Statistik der erneuerbaren Energien, Ausgabe 2005
- [17] KOMPOGAS, <http://www.kompogas.ch/Kompogas-Verfahren/Merkmale/merkmale.html>, Sept. 2005.
- [18] L. Meraz et al., A thermochemical concept-based equation to estimate waste combustion enthalpy from elemental composition, Fuel, 82 (2003), p.1499-1507.
- [19] ARGE Inspektorat, Kompost- und Vergärungsanlagen – Jahresbericht 2005.
- [20] BBG Donau-Wald, Betriebsmessungen über 6 Monate (Oktober 2005), persönliche Kommunikation
- [21] Tentscher, Wolfgang. Ökobilanz der Biogasaufbereitung zur Netzeinspeisung (2003) Interner Bericht.
- [22] Erhebungen Inspektorat der Kompostier- und Vergärbranche
- [23] Berechnungen Ökozentrum Langenbruck
- [24] K. Boulouchos, ETHZ, «Null Emission»-Verbrennungstechnologie – Vortrag an der ETHZ vom 10.11.2003



## **A2    Stellungnahme Bundesamt für Energie**



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**  
Abteilung Energieeffizienz und erneuerbare Energien

CH-3003 Bern, kam. BFE

Biomasse Schweiz  
c/o Nova Energie GmbH  
Dr. Arthur Wellinger  
Châtelstrasse 21  
8355 Aadorf

Ihr Zeichen:  
Unser Zeichen: gub  
Sachbearbeiter/in: Bruno Guggisberg  
Bern, 12. Oktober 2006

**Studie „Energieproduktion aus Küchenabfällen – Ein Vergleich der Vergärung mit der Verbrennung in KVA“**

Sehr geehrter Herr Dr. Wellinger

Wir haben von der oben erwähnten Studie Kenntnis genommen und nehmen dazu gerne wie folgt Stellung:

Die Aufgabenstellung ist klar definiert und die Überlegungen sowie die daraus gezogenen Schlüsse sind für uns nachvollziehbar. Die Ergebnisse bestätigen weitgehend die vom BFE bzw. von EnergieSchweiz vertretene Haltung, sehr feuchte vergärbare Substrate, wie beispielsweise Küchenabfälle, von Vorteil über die Vergärung zu verwerten. Für solche Substrate ist demnach die anaerobe Vergärung im Vergleich zur Verbrennung in KVA nicht nur aus energetischer, sondern auch aus stofflicher Sicht die bessere Lösung.

Die Vergärung hat zudem auch ökonomisch deutliche Vorteile, sofern für den Vergleich der beiden Verfahren eine Vollkostenrechnung durchgeführt wird.

Die Studie zeigt im Übrigen, dass die vom Bund verfolgte Philosophie der Getrennsammlung von Abfällen nicht nur aus Umwelt erzieherischen Gründen, sondern eben auch aus energetischer und ökologischer Sicht sinnvoll ist.

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen  
Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00  
contact@bfe.admin.ch  
www.bfe.admin.ch



Wir hoffen, Ihnen mit diesen Einschätzungen zu dienen und stehen Ihnen für allfällige Fragen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüssen

Bundesamt für Energie BFE

  
Michael Kaufmann  
Vizedirektor

  
Hans Ulrich Schärer  
Leiter Sektion Erneuerbare Energien

Kopie an:

Bundesamt für Umwelt BAFU, Frau Kaarina Schenk, 3003 Bern

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, Herr Rolf Wagner, Weinbergstrasse 34, 8006 Zürich



**A3    Stellungnahme Prof. Bidlingmaier,  
Bauhaus-Universität Weimar**

Weimar, 16. Oktober 2006

1/1

Biomasse Schweiz  
Châtelstraße 21  
CH-8355 Aadorf

**Abfallwirtschaft**

**Prof. Dr.-Ing. habil.  
Werner Bidlingmaier**

**Prof. Dr.-Ing.  
Eckhard Kraft**

Fakultät Bauingenieurwesen

bid-ri

**Energieproduktion aus Küchenabfällen**

Sehr geehrte Damen und Herren,

mit großem Interesse habe ich Ihre Ausarbeitung zum Thema „Energieproduktion aus Küchenabfällen“ gelesen und möchte Ihnen dazu gratulieren.

Sie ist präzise, gut verständlich und behandelt alle wichtigen Punkte.

Erlauben Sie mir, eine kleine Anregung, um die Studie unabhängig von der Schweizer Situation zu machen.

In Kapitel 5 am Ende könnten Sie evt. darauf hinweisen, dass die Gasausbeute abhängig ist von der Zusammensetzung der Abfallstoffe (Anteil Fett/Protein/Kohlehydrate) und der Effizienz der Anlage. Damit würden Fälle angedacht, in denen andere Gasausbeuten zum tragen kommen.

Ich erlaube mir, diese Studie meinen Studenten zur Verfügung zu stellen.

Mit freundlichen Grüßen



Prof. Dr.-Ing. habil. W. Bidlingmaier

Bauhaus-Universität Weimar

Coudraystraße 7  
D-99423 Weimar

Postanschrift:  
D-99421 Weimar

Telefon:  
+49 (0) 36 43/58-46 14

Telefax:  
+49 (0) 36 43/58-46 39

E-Mail:  
waste@bauing.uni-weimar.de

Kontoverbindung:  
Landeszentralbank  
(BLZ 820 000 00)  
Konto-Nr. 820 015 00

**A4    Stellungnahme Prof. Fricke, TU Braunschweig**



TU Braunschweig  
Abfallwirtschaft

Leichtweiß-Institut · Beethovenstraße 51a · 38106 Braunschweig

Biomasse Schweiz  
Chatelstraße 21  
CH 8355 Aadorf

Sehr geehrte Damen und Herren,

nach Durchsicht der Studie „Energieproduktion aus Küchenabfällen – Ein Vergleich der Vergärung mit der Verbrennung in KVA“ komme ich zu folgender Beurteilung:

- Die Arbeit ist strukturiert aufgebaut und gut lesbar.
- Bei den verwendeten Daten wurden die einschlägige Literatur und aktuelle, nachvollziehbare Informationen zu Leistungen regional relevanter KVA verwendet. Angaben zu spezifischen Gasmengen aus Küchenabfällen stammen aus Kompogas-Vergärungsanlagen.
- Bei den Bilanzierungsansätzen zur Energieproduktion stehen regionale Aspekte im Vordergrund. Dies sollte in der Studie deutlicher hervorgehoben werden.
- Falls diese Studie auch überregional größere Beachtung finden soll, wird empfohlen, die Berechnungen auch für unterschiedliche Bio- und Küchenabfälle durchzuführen.
- Einseitige, tendenziöse Äußerungen fehlen, hierdurch erlangt die Studie ein hohes Maß an Sachlichkeit und Objektivität.

Die Studie kann aus fachlicher Sicht als hoch qualifiziert beurteilt werden.

Prof. Dr. Klaus Fricke



Technische Universität  
Braunschweig  
Leichtweiß-Institut  
Abt. Abfallwirtschaft  
Prof. Dr.-Ing. K. Fricke

Beethovenstraße 51a  
38106 Braunschweig  
Tel. 05 31/3 91-39 69  
Fax 05 31/3 91-45 84

wastermanagement@tu-bs.de  
www.tu-bs.de/wastermanagement

## A5 Vergärungsanlagen und Energieproduktion in der Schweiz: Entwicklung 1900 bis 2005

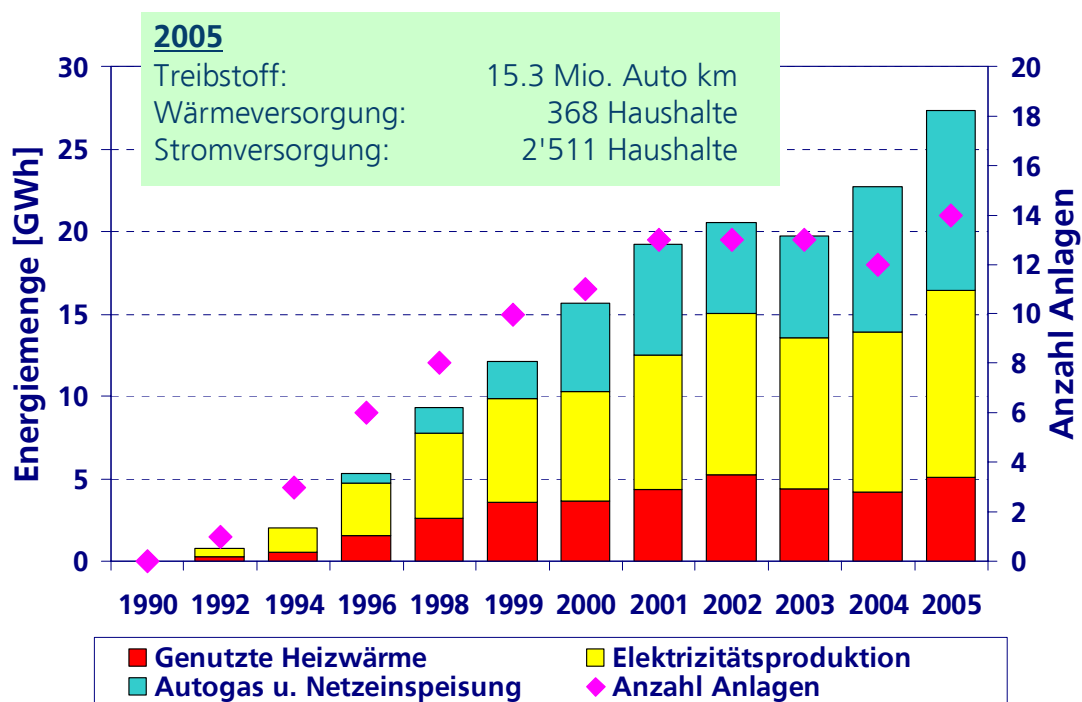


Abbildung 7: Gewerblich-industrielle Vergärungsanlagen

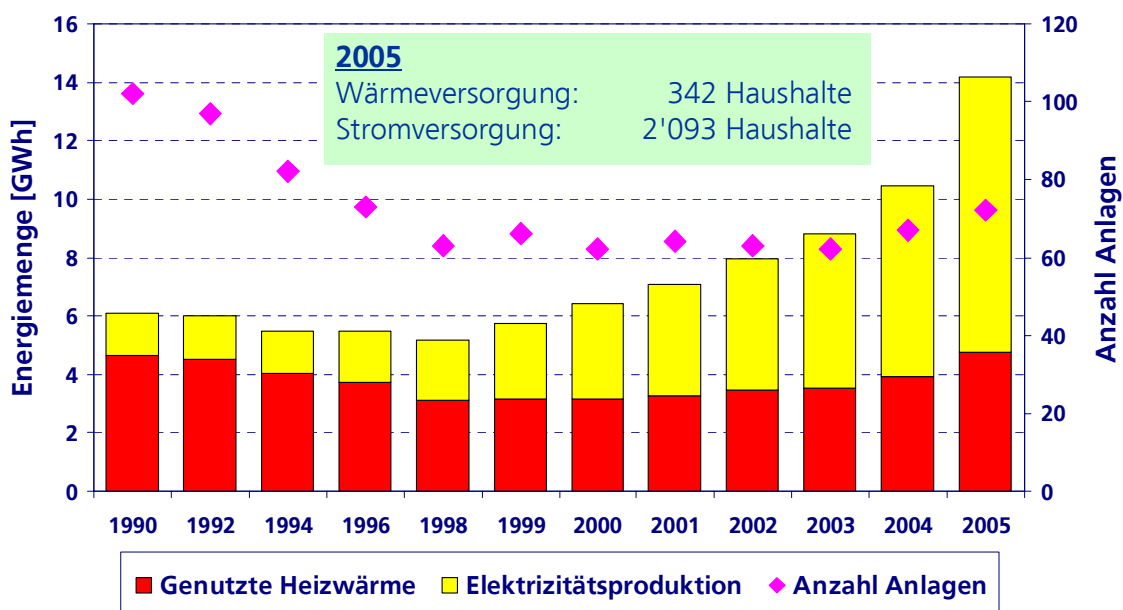


Abbildung 8: Landwirtschaftliche Vergärungsanlagen