



Schlussbericht Dezember 2009

Vorteile und Grenzen der Vergärung von leicht abbaubaren Industrie- und Lebensmit- telabfällen in Abwasserreinigungsanlagen

Vergleich zu landwirtschaftlichen Anlagen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Forschung&Entwicklung
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

ARA Bern, CH-3003 Bern

Auftragnehmer:

Nova Energie GmbH
Châtelstrasse 21
CH-8355 Aadorf
www.novaenergie.ch

Autoren:

Bachmann, Nathalie, Nova Energie & EREP, nathalie.bachmann@erep.ch
Wellinger, Arthur, Nova Energie, arthur.wellinger@novaenergie.ch

BFE-Bereichsleiter: Sandra Hermle

BFE-Programmleiter: Sandra Hermle

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153810 / 102963

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
2. Zielsetzung	5
Co-Vergärung in der ARA Bern.....	5
3. Einleitung.....	5
4. Stoffflüsse.....	7
5. Energiebilanz.....	7
6. CO ₂ - Emissionen	9
7. Nährstoffbilanz	9
8. Wirtschaftlichkeit	10
Landwirtschaftliche Co-Vergärung	11
9. Einleitung.....	11
10. Auswahl der Betriebe	11
11. Stoffflüsse.....	12
12. Energiebilanz.....	13
13. CO ₂ -Emissionen	15
14. Wirtschaftlichkeit	15
Literaturverzeichnis	11

Abstract

Die dem Projekt zugrunde liegende Masterarbeit bietet eine umfassende Betrachtung der Co-Vergärung in ARA und in landwirtschaftlichen Betrieben im Hinblick auf Ökologie und Ökonomie.

Für die **ökologische Betrachtung** wurde eine Stoffflussanalyse durchgeführt, welche eine Quantifizierung des Nährstoffverlustes durch die Co-Vergärung in ARA erlaubt. Die **Energie- und CO₂-Bilanz** der Anlagen ist zentraler Bestandteil der Arbeit. Für die **ökonomische Betrachtung** wurden der Jahresgewinn, die Arbeitsverwertung und die Energiegestehungskosten berechnet, was eine Beurteilung der Rentabilität und Effizienz der Anlagen erlaubt.

Die folgenden Resultate wurden ermittelt:

- **Stoffflüsse:** Bei der Vergärung von Co-Substraten in der ARA Bern mit Verbrennung des Gär-schlamms gehen pro Jahr 39 t pflanzenverfügbarem Stickstoff und 14 t Phosphor verloren. Dies entspricht 4.6 % (Stickstoff) resp. 4.8 % (Phosphor) der gesamten Nährstoffe, welche in der ARA dem Stoffkreislauf entzogen werden. Durch eine Auslastung der landwirtschaftlichen Anlagen mit Co-Substrat könnte pro Beispielbetrieb 3.9 t Stickstoff und 1.3 t Phosphor pro Jahr zusätzlich eingebracht werden.
- **Energiebilanz:** In der ARA Bern wird ein Vielfaches der Nettoenergie produziert, die in einem landwirtschaftlichen Betrieb produziert werden kann, was die Wichtigkeit der ARA für die regionale Energieproduktion aufzeigt. Auf die organische Substanz normalisiert (die dem Fermenter zugeführt wird), zeigt die ARA ebenfalls die besseren Resultate.
- **CO₂-Bilanz:** Die Resultate der CO₂-Bilanz sind analog zu jenen der Energiebilanz. Die Verwertung des Granulats als Brennstoff beeinflusst die Bilanz einer ARA positiv.
- **Wirtschaftlichkeitsanalyse:** Die Co-Vergärung der ARA Bern zeigt eine ausgezeichnete Rentabilität. In den landwirtschaftlichen Anlagen besteht eine grosse Variabilität der Wirtschaftlichkeit. Bei einer besseren Auslastung könnten aber alle Betriebe gute finanzielle Resultate ausweisen.

Die Studie zeigt, dass die Nachhaltigkeit der Co-Vergärung nicht branchen-, sondern Anlagespezifisch beurteilt werden soll. Parameter, welche die Nachhaltigkeit beeinflussen, sind Anlagen-grösse und -auslastung, der Nutzungsgrad der erzeugten Energie, die Transportdistanz der Co-Substrate und – in der landwirtschaftlichen Co-Vergärung – die Lagerung- und Ausbringtechnik.

Schlussbericht

1. Einleitung

Um die Biogasproduktion zu steigern, werden in Kläranlagen und in landwirtschaftlichen Biogasanlagen oft externe organische Abfälle mitvergoren. Man spricht dabei von Co-Vergärung. Leicht abbaubare Co-Substrate sind wegen ihrem positiven Einfluss auf die Gasproduktion sehr gefragt, namentlich Abfälle aus der Lebensmittel- und der Pharmaindustrie. Die Landwirtschaft sowie Kläranlagen bemühen sich insbesondere um flüssige, leicht abbaubare Abfälle ohne wesentliche Verschmutzung, da diese ohne zusätzliche Aufbereitung zu einem hohen Gasertrag führen. Wirtschaftlich sind die ARA im Vorteil, da sie nur mit den Grenzkosten rechnen müssen. Zudem bieten sie logistische Vorteile und können mehr Substrat annehmen; daher sind sie für Grosskunden interessanter. Negativ schlägt zu Buche, dass wegen der Verbrennung der Restorganik und der enthaltenen Nährstoffe der Stoffkreislauf unterbrochen wird. Zurzeit wird die Co-Vergärung in ARA bei den landwirtschaftlichen Vergärern durchwegs negativ dargestellt, ohne dass die nötigen Grundlagen dazu vorhanden sind.

In der vorliegenden Arbeit wird die Co-Vergärung in ARA und landwirtschaftlichen Betrieben auf ökologischer, ökonomischer und sozialer Ebene vergleichend untersucht. Die Problematik der Nährstoffe wird analysiert und die Frage evaluiert, wann es Sinn macht, Co-Substrate in ARA zu vergären. Weitere Parameter der Nachhaltigkeit werden bestimmt und bewertet.

Die Rahmenbedingungen für ARA und landwirtschaftliche Betriebe sind verschieden. Wichtigster Punkt ist das Ausbringverbot von Klärschlamm als Dünger. Das Gärgut aus den Co-Substraten der ARA ist mit dem Klärschlamm vermischt und muss somit auch verbrannt werden. Viel wertvoller Stickstoff und Phosphor können deswegen nicht in den Boden zurückgeführt werden. Ein einschränkender Punkt für die Landwirtschaft ist die Limitierung der Co-Substrate. Gemäss RPG und DüV dürfen nicht mehr als 50 % Co-Substrate, also Substrate nicht landwirtschaftlicher Herkunft, vergoren werden. Innerhalb der Richtlinien der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) sind es sogar höchstens 20 % Co-Substrat. Es besteht keine Verpflichtung, die KEV-Richtlinien einzuhalten, wer sie aber befolgt, profitiert von wesentlich höheren Einspeisevergütungen.

2. Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist eine umfassende Betrachtung der Vergärung von leicht abbaubaren Industrie- und Lebensmittelabfällen in Abwasserreinigungsanlagen und in landwirtschaftlichen Betrieben. Die wichtigsten Parameter zur Beurteilung der Nachhaltigkeit der Co-Vergärung werden daraus abgeleitet und so eine Entscheidungsgrundlage geschaffen, wann es Sinn macht, organische Abfälle in ARA oder in der Landwirtschaft zu verwerten. Alle Komponenten der nachhaltigen Entwicklung werden für die Untersuchung in Betracht gezogen; ökologische, ökonomische und soziale Faktoren.

Co-Vergärung in der ARA Bern

3. Einleitung

Die Faultürme der ARA sind meist grosszügig dimensioniert. Zu ihrer Auslastung können organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe angenommen werden. Dies bringt nicht nur eine wesentlich bessere Gasausbeute, sondern auch Einnahmen über die Entsorgungsgebühren. Die ARA Bern stellt ein gutes Beispiel für eine Anlage mit Co-Vergärung dar und dient dieser Studie als Grundlage. Aufgrund der genauen und

konsequenter Datenerfassung des Betriebs können die ökologischen und ökonomischen Analysen durchgeführt werden.

Die wichtigsten Anlagendaten der ARA Bern sind in Tabelle 1 beschrieben:

Ausbaugrösse	350'000 EW
Elektrische Leistung BHKW	640 kW _{el}
Faulraumvolumen	18'000 m ³
Anfallender Klärschlamm	229'950 t FS/a
Angenommene Co-Substrate	27'977 t FS/a
Biogasproduktion	5'347'250 Nm ³ /a

Tabelle 1: Charakterisierung der ARA Bern

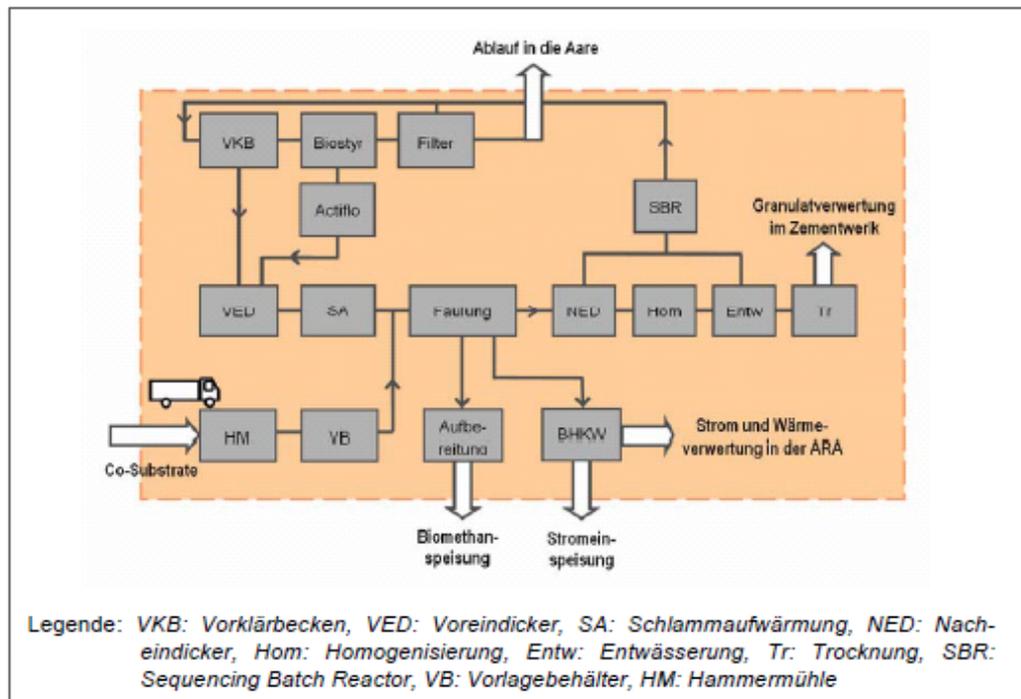


Abb. 1: Systemgrenzen der Co-Vergärung in der ARA Bern

In Abb.1 sind die Systemgrenzen vereinfacht dargestellt, die den Betrachtungen zugrunde gelegt wurden.

Im Jahr 2008 wurden der ARA 27'977 Tonnen Co-Substrate geliefert. Tabelle 2 gibt einen Überblick.

Co-Substrate	Herkunft , Beschreibung	Menge [t/d]
Hefezellwände	Cellulosefabrik, Zellwände lysiert	29.3
Kaffeepresswasser	Herstellung von löslichem Kaffee	15.5
Speisereste	Gewerbeküchen	13.4
Fettabscheider	Kanalreinigung	6.7
Flotat	Geflügel-Schlachthof	4.3
Milchserum	Milchindustrie, „Molke“	2.9
Enteisungswasser	Flughafen	2.6
Ethanol-Wassergemisch	Chem. Industrie, 40% Ethanol	0.9
Getränke Abfall	Fruchtsaft und Süssgetränke	0.8
Speiseöl	Fettverarbeitung	0.1
TOTAL		76.6

Tabelle 2: Co-Substrate der ARA Bern

4. Stofffluss

Für den Massenfluss der Co-Substrate musste ein Nullwert (vor Co-Substratzugabe errechnet werden, da die Aufbereitungsschritte seither wesentlich verändert wurden. Die Mengenbilanz zeigt dabei eine hervorragende Qualität der erfassten Daten. Tabelle 3 fasst die Massenflüsse zusammen.

	Masse [t/a]	Anteil an Gesamtmenge [%]
Energieträger		
- Biogas	4'198	66.7
- Granulat	767	8.3
Abwasserbelastung		
- N_{tot} entstickt (SBR + Biostyr)	28.1	3.5
Nährstoffverlust		
- P_{tot} im Granulat	13.9	4.8
- N_{tot} im Granulat und entstickt	49.6	4.6
- oTS im Granulat	683	16.3

Tabelle 3: Stofffluss der Co-Substrate und der darin enthaltenen Nährstoffe

Der Anteil der Co-Substrate an der Biogasproduktion von 66.7 % ist beträchtlich. Der Verlust an Stickstoff und Phosphor in den Co-Substraten ist im Vergleich zum gesamten Schlamm sehr gering, stellt jedoch in absoluten Mengen einen wichtigen Verlust für die Landwirtschaft dar. Beim Stickstoff im Gärgut ist zu beachten, dass bei einer Verwendung als Dünger nur etwa 78 % davon, also 36.7 t, pflanzenverfügbar wären.

5. Energiebilanz

Um die Biogasproduktion einzelner Co-Substrate zu ermitteln, wurden in zwei Serien Doppelbestimmungen zur Gasausbeute in Batch-Versuchen durchgeführt (Abb. 2)

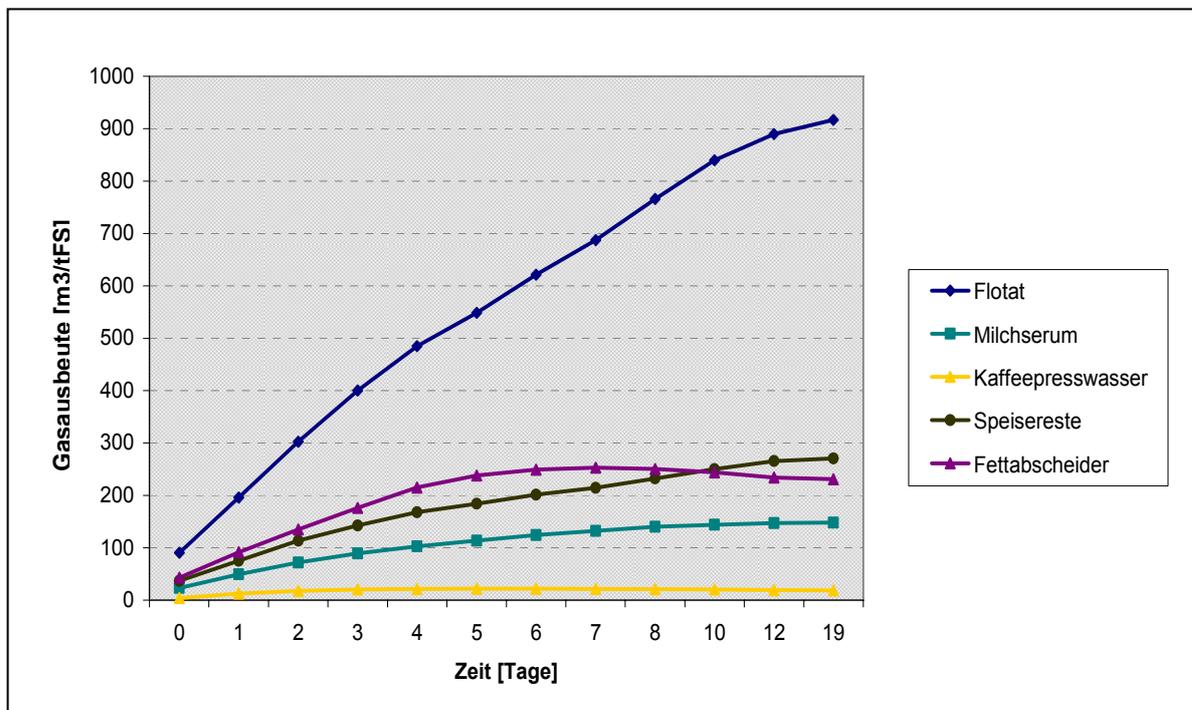


Abbildung 2: Gasausbeuten verschiedener Co-Substrate

Die Produktion von Biogas respektive Granulat erreicht die folgenden energetischen Werte (Tab. 4)

	Gasproduktion [Nm ³ /d]	Methangehalt [%]	Energiewert [kWh/ Nm ³]	Bruttoenergie [MWh/a]
Klärschlamm	5'000	67	6.66	11'997
Co-Substrate	10'000	65	6.46	23'303
Total				35'300

Tabelle 4: Bruttoenergieproduktion mit Biogas

Das produzierte Biogas wird über verschiedene Wege verwertet. Etwa ein Drittel wird zu Erdgasqualität aufbereitet. Das so genannte Biomethan mit 98 % Methangehalt wird ins Gasnetz der EWB eingespeist. Die anderen zwei Drittel werden in der Kläranlage in Strom und Wärme umgewandelt.

Durch die Trocknung des Schlammes entsteht eine staubfreie, körnige Masse, das Granulat, welches an vier Zementwerke der Schweiz geliefert wird. In Tabelle 5 ist der Energiegehalt des Granulats beschrieben, nach Klärschlamm und Co-Substraten aufgeteilt.

	Granulatproduktion [t/a]	oTS [t/a]	Energiewert [MWh/a]
Klärschlamm	8067	3508	20'872
Co-Substrate	705	690	4105
Total	8772	4198	24'977

Tabelle 5: Energieproduktion aus Granulat

Die Verwertung von Co-Substraten braucht auch Energie. Dazu gehört der – zum Teil doch weite – Transport, vor allem aber die Energieaufwendungen für die fest/flüssig Trennung, die Trocknung des Feststoffs und die Nitrifikation/Denitrifikation der rezirkulierenden flüssigen Phase.

Der Energieverbrauch der Co-Vergärung wird zu einem grossen Teil durch das produzierte Biogas gedeckt. Es wird aber auch Fremdenergie (Netzstrom und Erdgas) bezogen. Die Energiebilanz ist in Tab. 6 zusammengefasst. Sie stellt sich als sehr vorteilhaft dar für die ARA Bern.

Fremdenergie [MWh/a]		Erzeugung [MWh/a]	
Erdgas	37	Biomethan	6'823
Strom	513	Strom	109
Transportenergie	252	Granulat	3'773
	802		10'705

Tabelle 6: Energiebilanz der Co-Substrate in der ARA Bern

Die Nettoenergieproduktion beträgt 9'903 MWh pro Jahr oder 27.1 MWh pro Tag. Aus den Daten liessen sich folgende weitere Kennzahlen errechnen:

- Pro Tonne oTS, die dem Fermenter mit Co-Substraten zugeführt wird, können Netto 4'111 kWh in Form von Biogas oder Granulat produziert werden
- Der Selbstversorgungsgrad der Co-Vergärung liegt bei 29.4% elektrisch und 96% thermisch
- Der Transport macht 31% der Fremdenergie aus

6. CO₂-Bilanz der Co-Substrate

Durch die Verwendung von Biogas und Klärschlammgranulat anstelle von fossilen Brennstoffen werden also klimaschädliche CO₂-Emissionen reduziert. Bei der Berechnung substituiert Biomethan Erdgas (198 gCO₂/kWh₀), Ökostrom den gewöhnlichen Strommix (142 gCO₂/kWh_{el} 0) und Klärschlammgranulat Steinkohle (331 gCO₂/kWh_{th} 0). Die CO₂-Produktion beim Transport pro tkm ist von der LKW-Grösse und Auslastung

abhängig. Mit der Annahme, dass die Fahrzeuge immer voll ausgelastet sind, liegen die Emissionen zwischen 0.13 und 0.06 kg CO₂/tkm [12]. Tabelle 7 zeigt die Emissionsminderung.

	Menge	CO ₂ -Emissionen [t/a]
Einsparungen:		
Biomethan (Einspeisung)	6'823 MWh/a	- 1351
Strom (Einspeisung)	109 MWh/a	- 15
Granulat (Brennstoff)	3'773 MWh/a	- 1'249
Emissionen:		
Netzstrombezug	513 MWh/a	+ 72
Erdgasbezug	37 MWh/a	+ 7
Transport Co-Substrate	805'000 tkm	+ 54
Bilanz		- 2'482

Tabelle 7: CO₂-Bilanz der Co-Substrate

7. Nährstoffbilanz

Gemäss ChemRRV, Anhang 2.6 darf Klärschlamm seit 2005 bzw. 2006 nicht mehr auf Acker- bzw. Grünland ausgebracht, sondern muss verbrannt werden. Damit wird auch das in der ARA mitvergorene Co-Substrat nicht mehr rezykliert. Die Frage stellte sich daher, wie viel des wertvollen Stickstoffs und Phosphors jährlich in der ARA Bern verloren gehen.

Die Resultate der Stoffflussanalyse sind in Tabelle 8 dargestellt. Während der Phosphor bei der Separierung des Gärguts in der festen Fraktion bleibt – also in jenem Teil, der im Zementwerk verbrannt wird - verteilt sich der Stickstoff auf die flüssige (ca. 60 %) und feste (ca. 40 %) Fraktion. Die flüssige Fraktion wird anlagenintern rezykliert und zusammen mit dem Rohwasser in einem SBR (Sequencing Batch Reactor) und einem Biostyr entstickt, mit einem Wirkungsgrad der N_{tot}-Eliminierung von rund 90 %. Der Stickstoff wird in Form von N₂ abgeblasen.

Der Phosphor geht zu praktisch 100% in fester Form ins Granulat und wird damit über die Verbrennung dem natürlichen Kreislauf entzogen.

In der ARA Bern gehen jährlich durch die Vergärung der Co-Substrate und anschliessender Verbrennung des Schlammes bzw. Entstickung des Prozesswassers 13.9 t Phosphor (P_{tot}), 49.6 t Stickstoff (N_{tot}) und 683 t organisches Material (oTS) dem Stoffkreislauf verloren. Beim Stickstoff ist zu erwähnen, dass bei einer Verwendung als Dünger nur etwa 78 % davon, also 36.7 t, pflanzenverfügbar wären [13]. Wenn man den Nährstoffverlust der Co-Substrate dem Gesamtverlust durch den Klärschlamm gegenüberstellt, machen diese Mengen einen relativ geringen Anteil aus (Tab. 8): weniger als 5 % des Phosphors und des Stickstoffs und rund 16 % beim organischen Material. Absolut gesehen würde jedoch der Stickstoff ausreichen um 334 ha Silomais, 306 ha Sommerweizen oder 432 ha Dauerwiese zu düngen, was ca. 19 mittleren Bauernbetrieben entspricht. Die vergleichbaren Daten für Phosphor betragen 386 ha Silomais, 604 ha Sommerweizen oder 469 ha Dauerwiese [1].

Nährstoff	Gesamtverlust ARA [t/a]	Verlust durch Co-Vergärung [t/a]	[%]
P _{tot}	290	13.9	4.8
N _{tot}	1078	49.6	4.6
oTS	4190	683	16.3

Tabelle 8: Stofffluss der Co-Substrate

8. Wirtschaftlichkeit

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Co-Vergärung der arabern wurde eine Spartenrechnung durchgeführt. Für Prozesse, die ausschliesslich den Co-Substraten dienen (Annahme, Aufbereitung, Lagerung), wurden die Vollkosten bestimmt. Für Prozesse, die auch vom Abwasser resp. Klärschlamm durchlaufen werden, wurde mit den Grenzkosten gerechnet, d.h. nur die proportionalen Kosten wurden beachtet, weil die Investition bereits für die Abwasserbehandlung getätigt wurden und nur die freien Kapazitäten genutzt werden. In Tabelle 9 ist der Aufwand und der Ertrag zusammengefasst.

Der Ertrag besteht zum grössten Teil, nämlich zu 73 %, aus den Annahmgebühren für die Co-Substrate. Diese sind also ein sehr dominanter Faktor der Rentabilität. Mit 21 % ist auch die Gaseinspeisung ein wichtiger Bestandteil. Die Stromeinspeisung ist marginal weil insgesamt der Stromdeckungsgrad der Anlage nur 21% beträgt. Bei den Kosten fallen die Abschreibungen für die Annahmestelle stark ins Gewicht (31 %). Weitere relevante Kostenpunkte sind die Personalkosten und die Granulatabgabe, welche heute immer noch mit einer Gebühr verbunden ist.

Ertrag [CHF]		Kosten [CHF]	
Annahmgebühren	865'483	Personal- u. Materialkosten	91'000
Gasertrag	343'545	Dienstleistungskosten	35'326
Stromertrag	69'520	Abschreibungen	156'020
		Kapitalkosten	33'784
		Entwässerung, Trocknung ^{a)}	55'799
		Entsorgung Gärgut ^{a)}	74'961
		VED/NED ^{a) b)}	6'339
		Biologische Reinigung ^{a)}	24'827
		Gasaufbereitung	25'524
	1'278'548		503'580

Tabelle 9: Erträge und Kosten der Vergärung der Co-Substrate

^{a)} Grenzkosten

^{b)} VED: Voreindicker
NED: Nacheindicker

Der jährliche Brutto-Ertrag beträgt also **774'968 CHF** ohne Overheadkosten und Gewinn, was 15 % des Gesamtgewinns der ARA Bern ausmacht.

Landwirtschaftliche Co-Vergärung

9. Einleitung

In der Vergärung landwirtschaftlicher Abfallstoffe liegt ein grosses energetisches Potential. Die Biogasgewinnung ist für viele Landwirte, neben der traditionellen Tätigkeit, zu einem interessanten Betriebszweig geworden. Das produzierte Biogas wird mittels Blockheizkraftwerken in Wärme und Elektrizität umgewandelt, welche auf dem Hof verwendet und vermarktet werden können. Eine vollständige Nutzung der Wärme ist in der Regel nicht möglich. Das Gärgut wird auf dem Betrieb als Dünger verwertet. Wenn zum Ausgleich der Nährstoffbilanz Stickstoff und Phosphor den Hof wieder verlassen müssen (DZV Art. 6), werden Abnehmerverträge mit anderen Landwirten geschlossen.

Die Vergärung von Gülle allein und Stromproduktion ist trotz Kostendeckender Einspeisevergütung (KEV) nicht rentabel. Die Gasausbeute ist zu gering und ausser dem Strom- und Wärmeverkauf werden keine Erträge erzielt. Erst die Annahme von fremden organischen Abfällen und den damit verbundenen Annahmehöhen, sowie der höheren Gasproduktion, macht die landwirtschaftliche Vergärung attraktiv.

Wegen dem wichtigen Einfluss der Co-Substrate auf die Wirtschaftlichkeit wird der Kampf um die gasertragreichen Substrate immer grösser und folglich sinken die Annahmepreise. Als wichtigste Konkurrenten werden Kläranlagen angesehen, weil diese grosse Mengen annehmen können und ihnen keine gesetzlichen Limiten in Bezug auf die Menge und Transportdistanz der angenommenen Co-Substrate vorgegeben sind. In der Landwirtschaft ist die Annahme von Co-Substraten durch die KEV auf 20% beschränkt. Wird der Strom auf dem freien Markt verkauft (z.B. als zertifizierter Strom nach naturemade star) schreibt das Raumplanungsgesetz eine Beschränkung auf 50% vor bei einer Sammeldistanz von maximal 50km. Viele Landwirte sind darüber verärgert und rufen nach neuen gesetzlichen Regelungen.

10. Auswahl der Betriebe

Die Auswahl der Anlagen wurde stark von den verfügbaren Daten beeinflusst. Die Daten für die Anlagen A, C und D wurden 2007 im Rahmen von EnergieSchweiz durch BiomassEnergie ermittelt. Die Daten von Anlage B wurden von der Nova Energie zur Verfügung gestellt (Tab. 10).

Anlage		A	B	C	D
Inbetriebnahme		2004	2005	2001	2000
Elektrische Leistung BHKW	kWh	100	100	80	50
Faulraumvolumen	m ³	470	475	400	300
Gülle	t FS/a	2'500	1'417	3'040	750
Co-Substrate	t FS/a	330	900	366	250
Anteil Co-Substrat	% FS	12	39	11	25
Biogasproduktion	Bm ³ /a	330'000	127'300	101'730	85'131

Tabelle 10: Charakterisierung der landwirtschaftlichen Anlagen

Alle Anlagen sind von gleicher Bauweise mit einem – mit Kunststoffmembran abgedeckten – Fermenter und einer nachgeschalteten Lagergrube. Das Gas wird in einer WKK-Anlage zu Wärme und Strom umgesetzt, wobei die Wärme, neben der Verwendung zur Fermenterbeheizung und der Beheizung des eigenen Hauses, nur in einer Anlage an Dritte abgegeben werden kann.

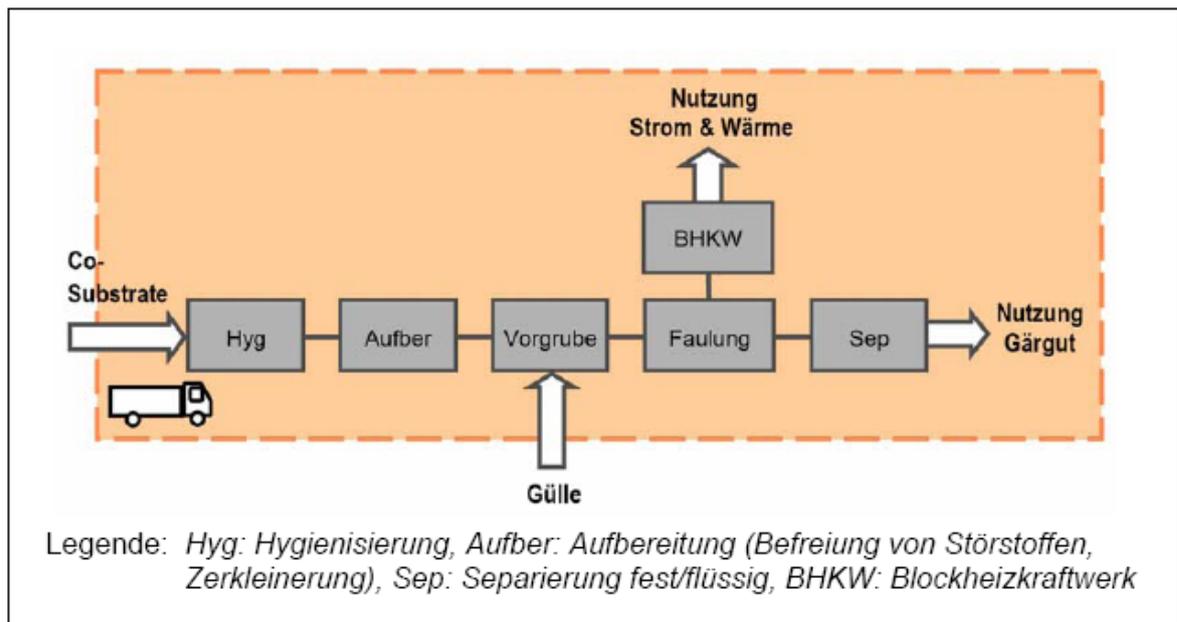


Abbildung 3: Systemgrenzen der landwirtschaftlichen Co-Vergärung

Im Gegensatz zur ARA werden in den landwirtschaftlichen Anlagen nicht nur die Co-Substrate betrachtet, sondern die gesamte Vergärung, weil das eine nicht vom anderen zu trennen ist. Die Einnahmen durch die Annahmehöhen und durch das zusätzlich produzierte Biogas sind schon Bestandteil der Planungsphase und müssen zur Deckung der Investitionskosten beitragen. Ohne die Co-Substrate wäre die Vergärung wirtschaftlich uninteressant. Die Transportwege der Co-Substrate und die Verwertung der Energieträger (Biogas und Gärprodukt) liegen auch innerhalb der Systemgrenzen.

11. Stoffflüsse

Bei der maximal möglichen Zusatzmenge an Co-Substraten haben wir uns gefragt, wie viel Biogas und Nährstoffe ein Landwirt gewinnen könnte, wenn er die nach KEV-Richtlinien (max. 20 %) oder nach Raumplanungsgesetz (max. 50 %) zugelassene Co-Substratmenge vergären würde. Bei der Gasproduktion ist auch die Leistungsgrenze des bestehenden BHKWs von Bedeutung. Für die Szenarien wird jeweils geprüft, ob die Fermenterkapazität ausreichend ist. Eine Verweilzeit von mindestens 20 Tagen und eine maximale Raumbelastung von 4 kg oTS/m³d werden vorausgesetzt. Die organische Substanz, Stickstoff- und Phosphorfrachten im Gärprodukt der Ist-Situation wurden mit den optimierten Varianten verglichen.

Im Rahmen der KEV-Richtlinien weisen die Anlagen A und C Spielraum auf, im Rahmen des Raumplanungsgesetzes können alle Anlagen noch mehr Co-Substrate annehmen. Die Fermenterkapazität ist bei allen ausreichend.

11.1. Biogas

Die Biogasproduktion der Anlagen (Abb. 4) lässt erkennen, dass über die reale Situation („Ist-Situation“), hinaus, Innerhalb der KEV-Richtlinien, nicht mehr viel zusätzliches Biogas gewonnen werden kann. Ganz anders sieht es beim Szenario mit 50 % Co-Substrat aus. Die Produktion könnte dabei um 45 (D) bis 290% (C) gesteigert werden. Auch der Methangehalt des Biogases verändert sich je nach Szenario und damit sein Energiegehalt.

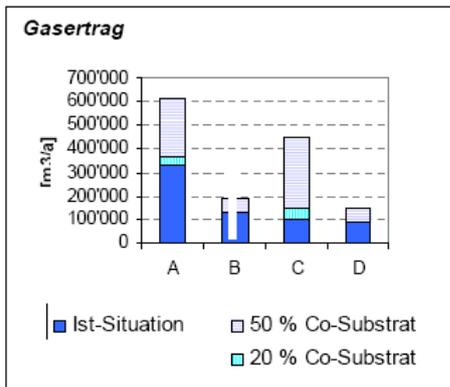


Abb. 4: Biogasproduktion

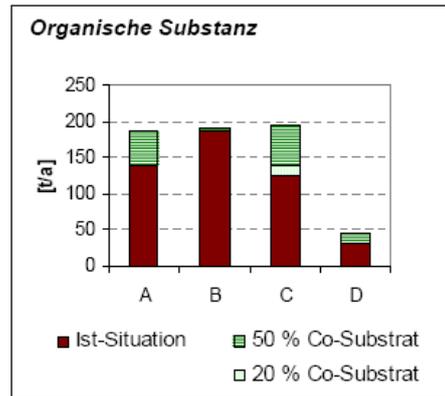


Abb. 5: Potenzial org. Substanz

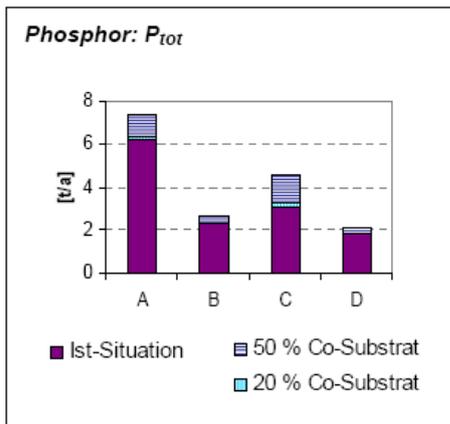


Abb. 6: Zusätzlicher Phosphor

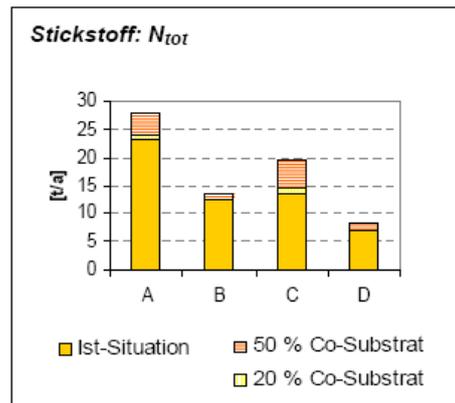


Abb. 7: Zusätzlicher Stickstoff

11.2. Organik und Nährstoffe

Generell ist innerhalb der KEV-Richtlinien so gut wie kein Potential zu höheren Nährstofffrachten vorhanden. Innerhalb des Raumplanungsgesetzes ist jedoch ein gewisser Spielraum zu erkennen; vor allem bei den Anlagen A und C, wo die aktuellen Co-Substratanteile am kleinsten sind:

oTS: 58 t bei A bzw. 83 t bei C an Co-Substraten können pro Jahr zusätzlich auf den Boden ausgebracht werden, was einer Erhöhung von 40 resp. 70 % der heutigen oTS-Fracht entspricht (Abb. 5).

Stickstoff: 4.2 t bei A und 5 t bei C können max. pro Jahr zusätzlich mit Co-Substraten eingebracht werden, was einer Erhöhung von 20 resp. 46 % entspricht (Abb. 6).

Phosphor: 1.1 t bei A und 1.3 t bei C können pro Jahr zusätzlich eingebracht werden, was einer Erhöhung von 18 resp. 48 % entspricht. Die Rückführung dieser Nährstoffe in den Boden ist in der landwirtschaftlichen Co-Vergärung gewährleistet; ob die Nährstoffe auf dem jeweiligen Betrieb bleiben können, oder ob sie wegen der Stickstoff- oder Phosphorbilanz den Hof verlassen müssen, konnte aufgrund der Datenlage nicht ermittelt werden (Abb. 7).

12. Energiebilanz

Bei der Vergärung in landwirtschaftlichen Betrieben wird das Biogas in der Regel in einem BHKW verwertet, so auch in den betrachteten Anlagen. Mangels von erhobenen Messwerten wurde mit folgenden Daten [9] gerechnet:

- elektrischer Wirkungsgrad: 36 %
- thermischer Wirkungsgrad: 48 %

Für den Betrieb der Anlage werden 20 bis 30 % der produzierten Wärme und ca. 8 % des Stroms verbraucht [9]. Die so genannte Prozessenergie wird für die Aufheizung der Substrate (Wärme) sowie für Rührer und Pumpen (Strom) gebraucht. Wichtiger als der Wirkungsgrad ist in der landwirtschaftlichen Vergärung jedoch der Nutzungsgrad, denn für die Landwirte ist es schwierig, externe Abnehmer der Wärme zu finden.

Der Dünger wird ebenfalls als Energieträger betrachtet. Um dessen Wert zu bestimmen, wird für Stickstoff mit 9.6 kWh/kgN gerechnet (entspricht dem Energieverbrauch zur synthetischen Ammoniakherstellung mit dem Haber-Bosch-Verfahren) und für Phosphor mit 13 kWh/kg P.

Da die Anlagen mit der selbst erzeugten Energie betrieben werden, besteht die Fremdenergie ausschliesslich aus dem Zündölverbrauch für das BHKW und der Transportenergie der Co-Substrate. Für Berechnungen werden folgende Werte verwendet:

- Zündöl: Heizwert 10 kWh/l, Verbrauch 0.035 l/kWh_{el} (aus Daten abgeleitet)
- Lieferdistanz der Co-Substrate: 12 km für die aktuellen Co-Substrate, 30 km für die zusätzlichen Co-Substrate
- Lieferfahrzeuge von 3.5 t, 0.6 kWh/tkm [12]

Zur Energieerzeugung zählen der Verkauf von Strom und Wärme an Dritte, der Verbrauch auf dem Hof (exklusiv des Verbrauchs für die Gärungsanlage) und der Dünger.

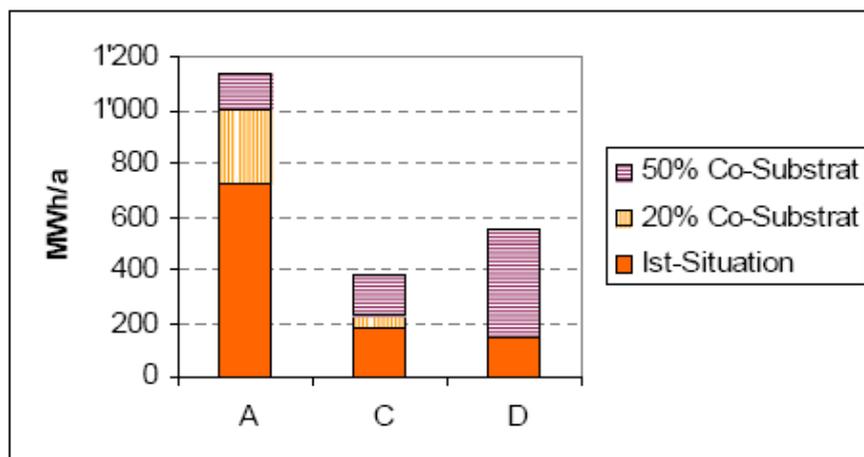


Abb. 8: Nettoenergieproduktion der landwirtschaftlichen Biogasanlagen

Anlage A (Ist-Situation) produziert eindeutig am meisten Energie. Dank einem externen Wärmeabnehmer ist der Nutzungsgrad gross. Bei Auslastung der Anlage mit Co-Substraten könnte die Nettoenergieproduktion um 56 % gesteigert werden.

Im 50 %-Szenario wird die Energieerzeugung durch die Kapazität des BHKW limitiert. Um das gesamte produzierte Biogas umsetzen zu können, müsste in ein leistungsstärkeres BHKW investiert werden.

Auch das BHKW der Anlage C weist im 50 % Szenario nicht genügend Kapazität auf. Das Steigerungspotential der Nettoenergieproduktion liegt trotzdem bei 113 %. Anlage D stösst auch bei voller Auslastung mit Co-Substraten nicht an seine Grenzen. Das gesamte Biogas kann verwertet werden, womit die Nettoenergieproduktion um 188 % gesteigert werden könnte.

13. CO₂-Emissionen

Durch die Nutzung von Biogas anstelle eines fossilen Energieträgers können Emissionen an klimaschädlichem CO₂ verringert werden.

	A	C	D
Ist-Situation			
Energieerzeugung ⁸ [kWh/a]	860'000	257'329	182'606
CO ₂ Einsparung [t/a]	-170	-51	-36
Transport [tkm]	3'960	4'392	3'000
CO ₂ -Produktion [t/a]	+ 0.52	+ 0.58	+ 0.40
Zündölverbrauch [kWh/a]	180'000	75'480	55'000
CO ₂ -Produktion [t/a]	+48	+20	+15
Bilanz	-121	-30	-21
50% Co-Substrat			
Energieerzeugung [kWh/a]	1'281'679	651'782	509'800
CO ₂ Einsparung [t/a]	-274	-129	-101
Transport [tkm]	69'060	84'612	18'000
CO ₂ -Produktion [t/a]	+ 9.12	+ 11.17	+ 2.38
Zündölverbrauch [kWh/a]	306'600	245'280	116'389
CO ₂ -Produktion [t/a]	+81	65	31
Bilanz	-184	-53	-68

Tabelle 11: CO₂-Bilanz der landwirtschaftlichen Anlagen

Bei allen Anlagen fällt die Bilanz negativ aus, das heisst, die Einsparungen sind grösser als die Emissionen. Der Transport hat einen geringen Einfluss auf die CO₂-Bilanz, es fällt jedoch auf, dass beim 50 % Szenario die Emissionen deutlich zunehmen. Die Bilanz verbessert sich trotzdem beträchtlich, mit bis zu 3-facher CO₂-Einsparung.

14. Wirtschaftlichkeit

Die Kosten der Co-Vergärungsanlagen bestehen aus dem Aufwand für Personal, Material und Unterhalt, Kapital, Dienstleitungen und Abschreibungen.

Die Abschreibungen sind die wichtigsten Kostenfaktoren. Letztere sind direkt von der angenommenen Nutzungsdauer abhängig und somit von den Angaben des Betreibers. Bei Anlage C werden die längsten Nutzungszeiten angenommen, was sich durch die kleinsten Abschreibungen widerspiegeln.

Die Erträge setzen sich aus dem Stromverkauf, Wärmeverkauf und den Annahmgebühren zusammen. Mitgezählt werden die Einsparungen durch die Wärme und Stromnutzung auf dem Bauernhof (ausserhalb der Biogasanlage). Bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung der optimierten Szenarien gilt:

- Annahmgebühren für die zusätzlichen Co-Substrate 31 CHF/t (Durchschnittspreis ARA)
- Der zusätzlich produzierte Strom wird ins Netz eingespeist
- Einsparungen durch den Verbrauch auf dem Hof bleiben konstant
- Wenn ein Wärmeabnehmer vorhanden ist (A und C) kann auch die zusätzlich produzierte Wärme vermarktet werden.

	Einheit	A	C	D
Ist-Situation				
Kalkulatorischer Gewinn	CHF/a	91'581	2'999	-15'557
Arbeitsverwertung	CHF/h	149	49	5
Stromgestehungskosten				
- Brutto	CHF/kWh	0.24	0.46	0.44
- Netto	CHF/kWh	0.18	0.35	0.35
20% Co-Substrat				
Kalkulatorischer Gewinn	CHF/a	149'798	9'693	
Arbeitsverwertung	CHF/h	220	58	
Stromgestehungskosten				
- Brutto	CHF/kWh	0.20	0.32	
- Netto	CHF/kWh	0.16	0.20	
50% Co-Substrat				
Kalkulatorischer Gewinn	CHF/a	109'161	100'351	36'348
Arbeitsverwertung	CHF/h	171	179	147
Stromgestehungskosten				
- Brutto	CHF/kWh	0.18	0.21	0.18
- Netto	CHF/kWh	0.10	0.11	0.15

Tabelle 12: Gewinnpotenziale der landwirtschaftlichen Anlagen

Es wird deutlich, dass die Wirtschaftlichkeit sehr stark variieren kann (Tab. 12). Anlage A, die grösste der drei, ist am rentabelsten. Sie wirft in der Ist-Situation und in den Szenarien einen stattlichen Jahresgewinn ab, weist relativ tiefe Gestehungskosten und eine sehr gute Arbeitsverwertung auf. In dem spezifischen Fall erweist sich die Annahme von 20 % Co-Substraten sinnvoller als 50 % Co-Substrate, weil das BHKW für letzteres zu leistungsschwach ist und das Biogas nicht vollständig verstromt werden kann.

Anlage C ist auch rentabel, weist aber in der Ist-Situation einen sehr kleinen finanziellen Spielraum auf. Durch die Steigerung der Co-Substrate auf 20 %, können die Kennzahlen wesentlich verbessert werden. Mit 50 % Co-Substraten, also ohne KEV, sieht die Situation nochmals relevant besser aus, obwohl auch hier das BHKW nicht das gesamte Biogas umsetzen kann.

Bei Anlage D ist die Ist-Situation sehr unvorteilhaft. Der Gewinn ist negativ (Verlust), die Gestehungskosten werden durch die Vergütung nicht gedeckt und der Betreiber hat für 5 CHF pro Stunde gearbeitet. Durch Auslastung der Anlage kann die Situation verbessert werden. Bei 50 % Co-Substraten könnte auch hier eine gute Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Agrarforschung 16 (2),2009, 8-15. Jährliche Entzüge und korrigierte Düngungsnormen.
- [2] Angele H., Serfimova K. (2008). *Biomasse-Strom: Perspektiven für Energieversorger*. Bulletin SEV/AES 2008-8.
- [3] Braun R., Wellinger A. (2003). *Potential of Co-digestion*. IEA Bioenergy, Task 37.
- [4] Bundesamt für Energie (2008). CO₂-Abgabe Rechner, Version 7.

- [5] Bréthaut Y., Gremaud D., Margot J. (2007). *Traitement de l'ammonium du lisier digéré après biométhanisation*. Design Project Section Sciences et Ingénierie de l'environnement, EPF Lausanne.
- [6] Baserga U. (2000). *Vergärung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, FAT-Berichte Nr. 546, Ettenhausen.
- [7] Baserga U. (1998). *Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen*. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, FAT-Berichte Nr. 512, Ettenhausen.
- [8] Charles R., Flisch R., Richner W., Sinaj S. (2009). *Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau*. Forschungsanstalten Agroscope Reckenholz-Wädenswil und Agroscope Reckenholz-Tänikon, Agrarforschung 16(02), 2-54.
- [9] Dux D., Engeli H., Gazzarin C., Gubler N. (2007). *Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen*. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, ART-Berichte Nr. 676, Ettenhausen.
- [10] Edelmann W., Baier U., Engeli H., Schleiss K. (2001). *Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas*. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 210146.
- [11] Engeli H., Membrez Y., Ndoh M., Nussbaumer T., Sommerhalder M., Tacchini C. (2006). *Wirtschaftlichkeit von heutigen Biomasse-Energieanlagen*. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 270006.
- [12] ESU-services, fair consulting in sustainability. Transportation calculator 2009.
- [13] Holm-Nielson J. (2009). *Biofertilizer optimal recycling, processing digestate to valuable products*. Seminar programme IEA Bioenergy, Task 37.
- [14] Mulder A. (2003). *The quest for sustainable nitrogen removal technologies*. Water Science and Technology Vol 48, 1: 67-75.
- [15] Oettli B., Blum M., Peter M., Schwank O., Bedniaguine D., Dauriat A., Gnansounou E., Chételat J., Golay F., Hersener J. L., Meier U., Schleiss K. (2004). *Potentiale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz*. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 240180.
- [16] Wellinger A., Baserga U., Edelmann W., Egger K., Seiler B. (1991). *Biogas Handbuch, Grundlagen-Planung-Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen*. Verlag Wirz AG, Aarau.
- [17] Wiedenhöft C. (2000). *Mitbehandlung von biogenen Abfällen in Faulbehältern*. Merkblätter Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW), ISSN 0947-5788.