

Modell zur Optimierung der Substratbereitstellungskosten bei Biogasanlagen

Bernhard Stürmer und Michael Eder

Modeling and optimization of feedstock costs for biogas plants

1 Einleitung

Die Richtlinie 2001/77/EG legt die nationalen Ziele zur Erhöhung der Stromproduktion aus erneuerbaren Energiequellen fest. Demnach hat sich Österreich verpflichtet, den Anteil der Stromproduktion aus erneuerbaren Energieträgern, gemessen am Bruttoinlandsverbrauch, von 70 % im Jahr 1997 auf 78,1 % in 2010 zu steigern. Vor allem der Bioenergieproduktion aus landwirtschaftlichen Kulturen wird ein beachtliches Potenzial zugeschrieben. Zur Steigerung der Stromproduktion aus Biomasse landwirtschaftlicher Herkunft eignet sich vor allem die Verstromung von Biogas.

In den letzten Jahren hat in Österreich die durchschnittlich installierte elektrische Leistung von Biogasanlagen kontinuierlich zugenommen. Im 4. Quartal 2008 waren 344 Anlagen mit einer Engpassleistung von 92,1 MW_{el} anerkannt. Dies bedeutet eine durchschnittliche Engpassleistung von 267 kW_{el} je Anlage. Allerdings lag die durchschnittliche Größe der zwischen dem 4. Quartal 2007 und dem 4. Quartal 2008 neu gebauten Anlagen bei knapp 740 kW_{el} (E-CONTROL, 2009). Derzeit produzieren Biogasanlagen in Österreich rund ein PJ Energie. Dies entspricht einem Anteil von 0,3 % der gesamten Energieproduktion aus erneuerbaren Energiequellen (BMWA, 2008). Um weiterhin, angesichts begrenzter Fördermittel, eine

Summary

With increasing size of biogas plants, the importance of harmonized mechanization of harvesting and transporting of biomass increases. Beside the logistic costs, cultivation costs can affect the choice of energy crops. The model, which is presented at this article, was developed to optimize the handling system of producing and storing feedstock for biogas production at least costs. By choosing best capacity of transportation and best chopper performance in dependence of used energy crops, biomass yield and transport distance machinery chain will be optimized. Furthermore, the decision about size of slurry transportation tank influences the feedstock costs. The results of this study emphasize the economic advantage of silage maize as feedstock. The use of slurry from animal production and the covering of biogas slurry depot lead to lower total feedstock costs.

Key words: Biogas, feedstock costs, optimization model, harvest logistics, slurry application.

Zusammenfassung

Mit zunehmender Größe der Biogasanlagen gewinnt die optimale Abstimmung von Feldhäckslerleistung und Transportvolumen an Bedeutung. Für eine umfassende ökonomische Analyse sind allerdings nicht alleinig die Logistikkosten maßgebend, sondern die Summe der Kosten für die Substratbereitstellung. Diese enthalten neben den Ernte- und Transportkosten auch noch die Anbau- und Kulturführungskosten (inkl. Ausbringung der Biogasgülle) der in der Biogasanlage eingesetzten Energiepflanzen. In dem hier vorgestellten Modell werden durch die Wahl der Kulturen und durch die Entscheidung über Feldhäcksler-, Transport- und Güllefassgröße unter gegebener innerbetrieblicher Infrastruktur die Substratbereitstellungskosten optimiert. Die Modellanalysen unterstreichen dabei den ökonomischen Vorteil von Silomais als Substrat. Aufgrund weiterer Analysen konnte der Veredelungswert von Gülle aus der Viehhaltung und die Höhe der Kostenminderung durch die Abdeckung des Gülleendlagers abgeleitet werden.

Schlagworte: Biogas, Substratkosten, Optimierungsmodell, Erntelogistik, Gülleausbringung.

kontinuierliche Entwicklung der Ökostromproduktion aus Biogas zu gewährleisten, bedarf es neben einer Effizienzsteigerung auch einer Kosteneinsparung.

Bei NAWARO-Biogasanlagen sind vor allem die Substratkosten, je nach Anlagengröße, mit 40 bis 50 % der jährlichen Gesamtkosten ein wesentlicher Kostenfaktor (WALLA und SCHNEEBERGER, 2008). Aufgrund des relativ hohen Wassergehalts der eingesetzten Rohstoffe und dem damit verbundenen hohen Transportvolumen steigt mit zunehmender Größe der Biogasanlage der Anteil der Transportkosten an den Substratbereitstellungskosten. KARPENSTEIN-MACHAN (2005) geht bei einer 500 kW_e Anlage von einem täglichen Substratbedarf bis zu 38 t Frischmasse aus. Um diese Mengen an Substraten bereitstellen zu können, werden abhängig von den eingesetzten Kulturen und der Ertragslage 250 bis 300 ha Anbaufläche benötigt. Je nach Angebotsdichte der für die Biogasanlage benötigten Flächen müssen beträchtliche Transportdistanzen zurückgelegt werden. Neben der Angebotsdichte beeinflusst die Wahl der eingesetzten Energiepflanzen über deren Methanhektarertrag die Ernte- und Logistikkosten. Zur Berechnung der Substratbereitstellungskosten müssen weiters noch die Anbau- und Kulturführungskosten (inkl. Ausbringung der Biogasgülle) der Kulturen berücksichtigt werden.

Eine Reihe von Studien beschäftigte sich mit der Optimierung des Transportes von Biomasse. OVEREND (1982) befasste sich mit der durchschnittlichen Transportdistanz bei der Bereitstellung von Biomasse für Verarbeitungsanlagen in Abhängigkeit der produzierten Biomasse je ha und der Größe der Anlage. Dabei verwendete er geometrische Grundüberlegungen, um die optimale Anlagengröße ableiten zu können. JENKINS (1997) arbeitete in seiner Studie den Einfluss der Transportkosten auf die optimale Anlagengröße heraus. In der Studie von BÖRJESSON (1996) wurden Energiebilanzen von Kulturen zur Energieerzeugung behandelt. In die Bewertung flossen neben dem Transport auch die Maschinen, das Saatgut, die Düngung und der Pflanzenschutz ein. SOKHANSANJ et al. (2006) entwickelten ein Logistikmodell, das sie anhand der Ernte und Logistik von Maisstroh vorstellten. In dieser Untersuchung fanden allerdings die Anbau-, Kultivierungs- und Nutzungskosten der Fläche keine Berücksichtigung, weil davon ausgegangen wurde, dass diese Kosten durch das Hauptprodukt Körnermais gedeckt sind. In einer weiteren Studie wurde dieses Logistikmodell für die Optimierung des Ernte- und Logistiksystems von Switchgrass angewendet (SOKHANSANJ et al., 2009). In diesen Berechnungen inkludierten sie neben den

Ernte- und Transportkosten die Anbau- und Kulturführungskosten, die Düngekosten sowie die Landnutzungskosten. In einer Studie zum Transport von Pappel aus Kurzumtrieb setzten LEDUC et al. (2009) bis zu einer Entfernung von 25 km Traktoren mit Anhänger ein. Für längere Transportwege gingen sie davon aus, dass Lastkraftwagen den Transport kostengünstiger erledigen können. Eine Studie, die sich speziell mit der Abstimmung der Erntemaschinen und der Logistik für Klee gras zur Biogasproduktion befasst, veröffentlichten GUNNARSSON et al. (2008). Einen gesamtbetrieblichen Ansatz stellten WALLA und SCHNEEBERGER bereits 2006 vor. Dabei konnte ihr Modell aus mehreren Substraten (Energiepflanzen und Rindergülle) auswählen. Eine detaillierte Aufspaltung der einzelnen Kostenblöcke nahmen WALLA und SCHNEEBERGER (2008) in einer weiteren Untersuchung vor. Sie ermittelten neben den Transportkosten für Silomais auch die Ausbringungskosten der anfallenden Biogasgülle, allerdings ohne eine Optimierung der Ernte- und Transportmaschinen vorzunehmen.

Im vorliegenden Beitrag wird ein mathematisches Optimierungsmodell vorgestellt, mit dem die Kultivierung, das Ernteverfahren, die Erntelogistik und die Biogasgülleausbringung für eine Biogasanlage simultan optimiert werden kann. Anhand eines Beispielbetriebes mit einer bestehenden Flächenverteilung werden unterschiedliche Rahmenbedingungen hinsichtlich Fruchtfolge, Beimischung von Gülle aus der Tierhaltung bzw. Stickstoffverluste im Endlager einer 500 kW_e Biogasanlage optimiert und gegenübergestellt. Die Diskussion und Schlussfolgerungen geben einen Überblick der Ergebnisse aus der Gegenüberstellung von Berechnungsvarianten und erläutern die Stärken und Schwächen des Optimierungsmodells.

2 Modellaufbau und Datengrundlage

Um eine simultane Optimierung des Anbaus, der Ernteverfahren und der Erntelogistik sowie der Biogasgülleausbringung zu ermöglichen, wurde ein Betriebsoptimierungsmodell programmiert. Frischmasseertrag (FM_{ertrag}), Trockenmassegehalt (TMG), Rohproteingehalt der Silage (PG) und Methangehalt (MG) beschreiben die Kulturen (siehe Tabelle 1). In das Modell wurden Daten von häufig in Biogasanlagen eingesetzten Kulturen (Silomais, Sonnenblumen, Grünroggen, Getreideganzpflanzensilage (GPS), Hirse, zwei- bzw. dreischnittiges Ackerfutter, Körnermais und Zuckerrübe) bzw. Kulturkombinationen (Grünroggen-Sonnenblumen, Grünroggen-Hirse, GPS-Sonnenblu-

men, GPS-Hirse) eingearbeitet. Bei Kulturkombinationen wird davon ausgegangen, dass die beiden Hauptfrüchte in einem früheren Vegetationsstadium (früh 1. Kultur, früh 2. Kultur) geerntet werden müssen, damit beide Hauptfrüchte die jährliche Vegetationszeit gut ausnützen können. Wird nur eine Kultur verwendet, wird diese in einem späteren Vegetationsstadium (spät) geerntet.

In der Zielfunktion (Gleichung 1) werden die Substratbereitstellungskosten minimiert. Die Gesamtkosten ($GKK_{k,f,fh,t}$ in €/ha) errechnen sich dabei aus den kulturspezifischen Anbau- und Kulturführungskosten (VK_k in €/ha), den Nutzungskosten (NK , in €/ha) und den Erntekosten ($EK_{k,f,fh,t}$ in €/ha). Die Erntekosten werden in Abhängigkeit der Kultur (k), dem Feld (f), der Feldhäckslerleistung (fh) und der Transportkapazität (t) errechnet. Der Feld-Index (f) wird in zweifacher Weise genutzt: Für die Hof-Feld-Entfernung (in km) und für die Größe des Feldes (in ha). Die Variable $varA_{k,f,fh,t}$ (in ha) wird verwendet, um die Kulturen den Feldern (je Hof-Feld-Entfernung) zuzuordnen, das Flächenausmaß zu bestimmen und die Erntekombination (Wahl des Feldhäckslers und des Transportvolumens) zu wählen. Die Gülleausbringungskosten ($AK_{f,gf,m}$) in €/m³ hängen von der Hof-Feld-Entfernung (f), dem Güllefasstyp (gf, Vakuum- bzw. Pumptfass) und der Fassgröße (m, 8 bzw. 18 m³) ab. Um die Nebenbedingung der N-Ober- und Untergrenze (in kg N/ha) einfließen las-

sen zu können, werden die Ausbringungskosten ($AK_{f,gf,m}$) durch den N-Gehalt der Biogasgülle (NGG in kg N/m³) dividiert. Über die Variable $varG_{f,gf,m}$ (in kg N) wird der Einsatz des Güllefasstyps (gf) und die Fassgröße (m) je Hof-Feld-Entfernung festgelegt. In den Substratbereitstellungskosten sind ebenfalls die Kosten für den eventuell zusätzlich benötigten Stickstoff inkludiert. Wobei die zugekaufte Stickstoffmenge ($varNZ$) mit einem exogen vorgegebenen Preis (NP) für den Stickstoffzukauf und die Ausbringung multipliziert wird.

(1) Min Substratbereitstellungskosten

$$= \sum_{k,f,fh,t} GKK_{k,f,fh,t} * varA_{k,f,fh,t} + \sum_{f,gf,m} \frac{AK_{f,gf,m}}{NGG} * varG_{f,gf,m} + varNZ * NP$$

Die Wahl der Feldhäckslerleistung (232 kW, 458 kW) und des Transportvolumens (16 m³, 40 m³) wird modellintern anhand der Kosten vorgenommen und ist von der zu erntenden Kultur, vom Frischmasseertrag (FMErtrag_k in t), dem Trockenmassegehalt (TMG_k in %) und der Transportentfernung (Entfernung_f in km) abhängig (STÜRMEYER et al., 2008). Die Anzahl und Größe der Walzmaschinen im

Tabelle 1: Frischmasseertrag, Trockenmasse- und Rohproteingehalt, spezifischer Methanertrag sowie Anbau- und Kulturführungskosten der Kulturen bzw. Kulturkombinationen

Table 1: Fresh matter yield, dry matter content, crude protein content, specific methane yield and cultivation costs for different energy crops

Kultur	Erntezeitpunkt	FMErtrag [t FM/ha]	TMG [%]	PG [g XP/kgTM]	MG [l _N /kg oTM]	VK [€/ha]
Ackerfutter	1. Schnitt	11,9	35	137	315	95,50 ^{*)}
Ackerfutter	2. Schnitt	10,0	35	125	272	
Ackerfutter	3. Schnitt	8,5	35	125	190	
GPS	Spät	33,3	30	115	292	347,00
GPS	Früh, 1. Kultur	30,0	25	113	250	347,00
Grünroggen	Spät	21,0	32	120	332	298,70
Grünroggen	Früh, 1. Kultur	16,0	28	140	332	298,70
Hirse	Spät	46,2	26	71	317	219,40
Hirse	Früh, 2. Kultur	40,0	24	81	317	219,40
Körnermais	Spät	13,8	65	165	390	430,40
Silomais	Spät	46,7	30	89	340	332,40
Sonnenblumen	Spät	30,0	32	89	275	391,90
Sonnenblumen	Früh, 2. Kultur	33,0	28	111	275	391,90
Zuckerrübe	Spät	60,0	23	89	377	658,40

FMErtrag = Frischmasseertrag, TMG = Trockenmassegehalt, PG = Proteingehalt, MG = Methangehalt, VK = variable Anbau- und Kulturführungskosten, t FM/ha = Frischmasseertrag in t je Hektar, g XP/kg TM = g Rohprotein je kg Trockenmasse, l_N/kg oTM = Normliter Methan je kg organischer Trockenmasse

^{*)} jährliche VK bei zweijähriger Nutzung

Quelle: Amon et al., 2006; Karpenstein-Machan, 2005; DLG, 1997; eigene Annahmen

Flachsilo richtet sich nach deren Eigengewicht. Das benötigte gesamte Walzgewicht steht dabei im Verhältnis von 1 : 4 zum Massedurchsatz (t FM/h) des Feldhäckslers. Zur Berechnung der Erntekosten ($EK_{k,f,fh,t}$ in €/ha) in Abhängigkeit der zu erntenden Kultur (k), der Hof-Feld-Entfernung (f), der Feldhäckslleistung (fh) und des Transportvolumens (t) wird Gleichung (2) verwendet. Die verwendeten Koeffizienten (C = Konstante, C_{km} = Koeffizient für die Entfernung in km, C_{tFM} = Koeffizient für den Frischmasseertrag in t und CTM = Koeffizient für den Trockenmassegehalt) sind in Tabelle 3 (Anhang) aufgezeigt. Für die Berechnung der Maschinenkosten wurden Maschinenringsätze bzw. Preise von Lohnunternehmern herangezogen. Somit sind in den Kalkulationen die Gesamtkosten der eingesetzten Maschinen und Geräte enthalten und die damit verbundenen Arbeitskosten entlohnt. Sämtliche Kosten und Preise enthalten keine Umsatzsteuer.

$$(2) EK_{k,f,fh,t} = C + C_{km_{f,fh,t}} * \text{Entfernung}_f + C_{tFM_{k,fh,t}} * \text{FMErtrag}_k + CTM_{k,fh,t} * \text{TMG}_k \quad \text{für alle } k, f, fh, t$$

Neben den Erntekosten sind in den Gesamtkosten der Kultur ($GKK_{k,f,fh,t}$), die Anbau- und Kulturführungskosten (VK_k) und die Nutzungskosten der Fläche (NK in €/ha) inkludiert (siehe Gleichung 3). In VK_k sind die Bodenbearbeitung, der Anbau und der Pflanzenschutz enthalten (nach BMLFUW, 2008). Die Maschinenkosten wurden nach den Arbeitsvoranschlägen von BMLFUW (2002) für Betriebe mit 300 ha Ackerfläche (entspricht in etwa dem Flächenbedarf einer 500 kW_{el} Biogasanlage) errechnet (Tabelle 1).

$$(3) GKK_{k,f,fh,t} = EK_{k,f,fh,t} + VK_k + NK \quad \text{für alle } k, f, fh, t$$

Die Ausbringung der Biogasgülle wird modellintern optimiert (vgl. STÜRMEER et al., 2008). Die auszubringende Menge an Gülle je Hektar wird über den N-Gehalt der Gülle und einen N-Bedarfsbereich der Kulturen definiert. Die Untergrenze (N_{min_k} in kg N/ha) des Bereiches stellen die maximalen N-Bedarfswerte für Acker nach ÖPUL 2007 dar (BMLFUW, 2006a). Die Obergrenze (N_{max_k} in kg N/ha) wird durch die EU-Nitratrachtlinie (91/676/EWG) mit 175 bzw. 210 kg N/ha beschrieben. Wie viel Stickstoff auf den Feldern ausgebracht wird, wird in der Zielfunktion über die Variable $varG_{f,gh,m}$ (in kg N) entschieden. Je nachdem, welche Kulturen in welchem Flächenausmaß auf wel-

chen Feldern angebaut werden ($varA_{k,f,gh,t}$) beschränken N_{min_k} und N_{max_k} die auszubringende Menge an Stickstoff auf den Feldern (Gleichung 4 und 5).

$$(4) \sum_{gf,m} (varG_{f,gh,m}) \geq \sum_{k,fh,t} (N_{min_k} * varA_{k,f,gh,t}) \quad \text{für alle } f$$

$$(5) \sum_{gf,m} (varG_{f,gh,m}) \leq \sum_{k,fh,t} (N_{max_k} * varA_{k,f,gh,t}) \quad \text{für alle } f$$

Der Anfall an Gesamtstickstoff aus den Kulturen (NKulturen) errechnet sich nach DLG (1997) als Quotient aus dem gesamten Proteinanfall der Silage dividiert durch 6,25 (Gleichung 6). Über den Ertrag (FMErtrag_k in t FM je ha), die Silierverluste (SV), den Trockenmassegehalt (TMG_k in %) und den Proteingehalten (PG_k in kg je t Trockenmasse) wird der Gesamtproteinanfall errechnet. Die Silierverluste werden gemäß DLG (2006) mit 10 % festgelegt.

$$(6) NKulturen = \frac{\text{FMErtrag}_k * (1 - SV) * \text{TMG}_k * \text{PG}_k}{6,25} \quad \text{für alle } k$$

Neben dem Anfall an Stickstoff aus dem Einsatz von Energiepflanzen wird der Gesamt-N-Eintrag über Co-Fermente (in kg N) berücksichtigt. Die Menge des eingesetzten Co-Ferments (FM_{cf}) wird dabei mit dem N-Gehalt des Co-Ferments (NG_{cf}) multipliziert. Über die Variable $varA_{k,f,gh,t}$ (in ha) werden in der Zielfunktion die Kulturen und deren Flächenausmaß bestimmt. Die Umrechnung von N-stallfallend auf N-feldfallend erfolgt mit dem Faktor 0,87 nach BMLFUW (2006a). Für etwaige zusätzliche N-Verluste (NV, z.B.: 10 %) wird dieser Faktor verringert. Um die N-Bilanz ausgeglichen gestalten zu können, wird ein Zukauf (varNZ) bzw. Export (varNE) an Stickstoff ermöglicht (Gleichung 7).

$$(7) \sum_{f,gh,m} varG_{f,gh,m} = \left(\sum_{k,f,gh,t} (NKulturen * varA_{k,f,gh,t}) + \sum_{cf} (FM_{cf} * NG_{cf}) \right) * 0,87 * (1 - NV) - varNE + varNZ$$

Die auszubringende Menge an Biogasgülle aus den Energiepflanzen (MGuelle in m³) errechnet sich aufgrund des Silageanfalls (geerntete Frischmasse minus Silierverluste) und einem Faktor zur Abschätzung der Mengenreduktion

(FMR). Nach REINHOLD et al. (2006) liegt der Massenverlust bei der Vergärung von Silagen je nach Trockenmassegehalt bei rund 25 % ($FMR_k = 0,75$). Bei Einsatz von Gülle aus der Tierhaltung sind dies ca. 2 % ($FMR_{cf} = 0,98$). Um einen reibungslosen Betrieb einer NAWARO-Biogasanlage zu gewährleisten, wird ein Wasserzusatz angenommen. Daraus folgt ein Wert für FMR_k von 0,9 (Gleichung 8).

$$(8) \text{ MGuelle} = \sum_{k,f,th,t} ((FMErtrag_k * (1 - SV) * FMR_k) * \text{var}A_{k,f,th,t}) + \sum_{cf} (FM_{cf} * FMR_{cf})$$

Um den N-Gehalt der Biogasgülle (NGG in kg N/m^3) abzuschätzen, wird der Gesamt-N-Anfall aus den Energiepflanzen und der Gesamt-N-Eintrag aus den Co-Fermenten durch den gesamten Mengenanfall an Biogasgülle aus den Energiepflanzen und den Co-Fermenten dividiert (Gleichung 9).

$$(9) \text{ NGG} = \frac{\sum_{k,f,th,t} (\text{NKulturen} * \text{var}A_{k,f,th,t}) + \sum_{cf} (FM_{cf} * \text{NG}_{cf})}{\text{MGuelle}} * 0,87 * (1 - NV)$$

Die Größe der Biogasanlage wird über den Methanbedarf definiert. Der Methanbedarf einer 500 kW_{el} Anlage wird von einer angenommenen Generatorlaufzeit (7.500 h/Jahr), dem Energiegehalt von Methan (9,94 kWh/m^3_N) und dem Wirkungsgrad des Generators (= 37,5 %; WALLA und SCHNEEBERGER, 2008) abgeleitet. Die eingesetzten Kulturen müssen demnach eine Methangesamtleistung von mindestens 1,0 Mio. m^3_N erbringen. Über die Silagemenge, den Gehalt an organischer Trockenmasse (oTMG_K in %) und den Methangehalt des Substrats (MG_K in $\text{m}^3_N \text{CH}_4$ je t oTMG) wird der Methanhektarertrag errechnet (Gleichung 10). Die Summe über alle eingesetzten Kulturen und deren Flächenausmaß muss die Mindestanforderung an Methan (z.B.: 1,0 Mio. m^3_N) erfüllen. Bei einem Einsatz von Co-Substraten wird die Mindestanforderung an Methan von den Kulturen entsprechend verringert.

$$(10) \sum_{k,f,th,t} ((FMErtrag_k * (1 - SV) * \text{oTMG}_k * \text{MG}_k) * \text{var}A_{k,f,th,t}) \geq \text{Methanbedarf}$$

3 Modellsimulationen

Beispielhaft wird das nicht lineare Optimierungsmodell an einer bestehenden Biogasanlage mit einer Leistung von 500 kW_{el} angewandt. Die Flächenausstattung der Basisvariante beträgt 277 ha Ackerfläche. Davon liegen 25 ha in einer Entfernung von 0,5 km von der Biogasanlage, 28 ha in 1 km, jeweils 87 ha in 1,5 km und in 2 km, 20 ha in 2,5 km, 16 ha in 3 km und 14 ha in 3,5 km Entfernung. Die Fruchtfolge besteht aus 50 % Silomais, 25 % Grünroggen/Sonnenblumen und 25 % Getreideganzpflanzen/Hirse. Weiters wurde angenommen, dass das Gülleendlager abgedeckt ist. Über das Modell wird die kostengünstigste Anbau- und Erntevariante (Basisvariante) errechnet. Die Nutzungskosten der Fläche wurden mit 500 €/ha angenommen. In weiterer Folge wurden mit dem oben vorgestellten Modell nachstehende Varianten optimiert:

- In Variante A wurde die Fruchtfolgebeschränkung freigegeben. Dem Modell sind dadurch die Kulturauswahl und das Flächenausmaß der verwendeten Kulturen freigestellt.
- In Variante B wurde ein Gülleinsatz aus der Tierhaltung simuliert. Es wurden 2.500 m^3 Rindergülle (aus Stiermast – Maissilagebetonte Fütterung) und 2.500 m^3 Schweinegülle (aus Schweinemast – CCM Fütterung) als Substrat eingesetzt. Da gegenüber einer ausschließlich mit nachwachsenden Rohstoffen gespeisten Anlage kein Wasserzusatz notwendig ist, beträgt der Wert für FMR_k 0,75. Für diese Simulation wurde FMR_{cf} mit 0,98 angenommen (2 % Masseverlust bei der Vergärung von Gülle). Der Stickstoffgehalt (stallfallend) der Rinder- bzw. Schweinegülle beträgt 5,2 kg N/t FM (BMLFUW, 2006b). Nach KTBL (2005) wurde mit einem Methanertrag bei Rindergülle von 9,86 $\text{m}^3_N/\text{t FM}$, bei Schweinegülle von 11,52 $\text{m}^3_N/\text{t FM}$ gerechnet. Damit sinkt der gesamte Methanbedarf von den Energiepflanzen auf 946.550 m^3_N .
- Mit der Variante C wird dargestellt, wie sich die Kosten der Substratbeschaffung und der Gülleausbringung verändern, wenn das Gülleendlager nicht abgedeckt ist. Es wurde davon ausgegangen, dass 5 % des Methanertrages nicht gewonnen werden können ($\text{MG}_k * 0,95$) und 10 % N-Verluste ($NV = 0,10$) durch Ausgasung auftreten. Der Wassereintrag durch Niederschlag wurde nicht berücksichtigt.

4 Ergebnisse

Die Modellrechnungen liefern Kennzahlen zu den Substratbereitstellungskosten, dem Flächenbedarf und der N-Bilanz aus denen sich weitere Kenngrößen, wie z. B. Substratbereitstellungskosten in Cent je kWh_{el}, ableiten lassen. Darüber hinaus zeigt der Modelloutput für die einzelnen Varianten jeweils, welche Kulturen welchen Flächen zuzuordnen sind, welche Erntelogistik aber auch welches Güllefass zum Einsatz kommt respektive welche Gesamtmenge an Stickstoff je Flächeneinheit sich ergibt. Während Tabelle 2 einen vergleichenden Überblick über zentrale Kenngrößen verschafft, seien nachfolgend die markantesten Ergebnisse detaillierter beschrieben.

4.1 Basisvariante

Zur Erreichung des Gesamtmethanbedarfes von 1.000.000 m³_N werden in der Basisvariante, mit der zugrunde gelegten Fruchtfolge, rund 275 ha benötigt. Die kostengünstigste Anbauvariante wird erreicht, wenn auf den nahegelegenen Feldern Getreideganzpflanzen in Kombination mit Hirse angebaut wird. Grünroggen/Sonnenblumen werden auf den Feldern angebaut, die am weitesten von der Biogasanlage entfernt liegen, dazwischen wird Silomais kultiviert.

Die kostengünstigste Ernte ergibt sich, wenn die Ernte von Hirse, Silomais, Grünroggen und Sonnenblumen mit großen Feldhäckslern (458 kW) erledigt wird. Die Getreideganzpflanzen werden mit einem 232 kW Feldhäckslern geerntet. Den Abtransport übernehmen bei allen Kulturen Transporteinheiten mit 16 m³ Transportvolumen. Die Anbau-, Ernte- und Nutzungskosten betragen rund 341.400 €. Die Ausbringung der Gülle (4,3 kg N/m³ stallfallend) wird mit einem 8 m³ großen Vakuuffass erledigt. Dadurch fallen Gülleausbringungskosten von ca. 14.100 € an.

4.2 Variante A

Wird die Fruchtfolgebeschränkung aufgehoben, wird ausschließlich Silomais als Substrat eingesetzt. Die benötigte Ackerfläche sinkt auf 250 ha. Der N-Gehalt der Biogasgülle verringert sich auf 4,1 kg N/m³. Allerdings muss zur Abdeckung des Stickstoffbedarfes (160 kg N/ha) rund 950 kg N als Dünger zugekauft werden. Für den Zukauf (1,40 €/kg N) und die Ausbringung (0,11 €/kg N) des zusätzlich benötigten Stickstoffes fallen Kosten von 1.430 € an. Der Einsatz von 100 % Silomais reduziert die Kosten um rund 84.000 € gegenüber der Basisvariante. Die Ernte erfolgt auf allen Feldern mit großem Feldhäckslern (458 kW) in Kombination mit kleinen Transporteinheiten (16 m³).

Tabelle 2: Gegenüberstellung der wichtigsten Kennzahlen der Varianten
Table 2: Results-overview of the scenarios at the key figures

	Basisvariante	Variante A	Variante B	Variante C
Methanertrag Gesamt [m ³ _N]	1.000.000	1.000.000	946.550	1.000.000
Anbau- und Kulturführungskosten [€/a]	132.055	83.066	124.997	139.005
Erntekosten [€/a]	71.901	50.659	67.594	76.276
Ausbringungskosten Biogasgülle [€/a]	14.117	11.262	12.026	15.920
Kosten Handelsdünger [€/a]	0	1.430	0	3.181
Nutzungskosten [€/a]	137.436	124.961	130.090	144.670
Substratbereitstellungskosten [€/a]	355.509	271.378	334.707	379.052
geerntete Fläche [ha]	275	250	260	289
Ernteanfall [t FM]	14.596	11.671	13.816	15.364
Biogasgülleanfall [m ³]	11.823	9.454	14.326	12.445
N-Gehalt Gülle [kg N/m ³]	4,3	4,1	4,9	3,8
N-Export [kg]	0	0	20.298	0
N-Import [kg]	0	947	0	2.107
Cent/m ³ _N	35,55	27,14	33,47	37,91
Cent/kWh _{el}	9,41	7,18	8,86	10,04

Quelle: eigene Berechnungen

Hinweis Variante B: Der in die Anlage eingebrachte Stickstoff wird wieder entnommen.

4.3 Variante B

Durch den Einsatz von 2.500 m³ Rinder- und 2.500 m³ Schweinegülle reduziert sich der Methanbedarf aus den Kulturen von 1.000.000 auf 946.550 m³_N. Die Anbau- und Kulturführungskosten betragen zusammen mit den Ernte- und Nutzungskosten für die benötigten 260 ha rund 322.700 €. Durch den höheren N-Gehalt der Biogasgülle (4,9 kg N/m³) wurde von einer ausgeglichenen N-Bilanz ausgegangen. Deswegen müssen von den eingebrachten 5.000 m³ Gülle (aus der Tierhaltung) rund 4.000 m³ Biogasgülle wieder „exportiert“ werden. Die Ausbringung der 10.300 m³ Biogasgülle auf den eigenen Flächen kostet 12.000 €.

Werden die Gesamtkosten dieser Variante der Basisvariante gegenübergestellt, ergibt sich ein Kostenvorteil von rund 20.800 €. Davon müssen allerdings die Kosten für zusätzliche 1.000 m³ Gärrestendlager in der Höhe von 2.800 € noch abgezogen werden. Der Kostenvorteil durch den Einsatz von Gülle errechnet sich in diesem Fall mit 3,60 €/m³ Rinder- bzw. Schweinegülle.

4.4 Variante C

Durch die um 5 % schlechtere Methanausnutzung der Substrate erhöht sich der Bedarf an Ackerfläche auf rund 289 ha. In der Simulation wurde deshalb angenommen, dass der Betrieb zusätzliche 13 ha in einer Entfernung von 4 km pachten kann. Die anfallenden Kosten hierfür werden in Anlehnung an die Nutzungskosten mit 500 €/ha angenommen. Die Summe der Kosten für Anbau, Kulturführung, Ernte und die Nutzungskosten beträgt ca. 360.000 €. Die Ausbringung von 12.450 m³ Gülle (3,8 kg N/m³) schlägt mit knapp 16.000 € zu Buche. Allerdings ist durch den 10 %igen N-Verlust im Gärrestendlager ein N-Zukauf in der Höhe von rund 2.100 kg nötig, um die N-Untergrenze (Silomais: 160 kg N/ha, Grünroggen-Sonnenblumen: 160 kg N/ha, Getreideganzpflanzen-Hirse: 210 kg N/ha) zu erfüllen. Für den Zukauf und die Ausbringung des zusätzlich benötigten Stickstoffes fallen Kosten von ca. 3.200 € an. Die Kosten für Anbau, Kulturführung, Ernte, Nutzung und Gülleausbringung liegen um rund 23.500 € höher als in der Basisvariante. Demgegenüber stehen zusätzliche jährliche Kapitalkosten für die Abdeckung des Gülleendlagers von rund 11.000 € (vgl. STÜRMEYER et al., 2008).

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Mit dem entwickelten Modell kann unter Eingabe von Felddaten (Feldgröße und Hof-Feld-Entfernung) und Kulturdaten (Frischmasseertrag, Trockenmassegehalt, Stickstoffbedarf, variable Kosten für Anbau und Pflanzenschutz, Methangehalt und Rohproteingehalt) der Anbauplan für eine Biogasanlage optimiert werden. Die Berechnungen können für jede beliebige Anlagegröße angestellt werden. Bei den vorliegenden Berechnungsvarianten konnte das Modell aus gebräuchlichen Kulturen bzw. Kulturkombinationen wählen. Die Wahl der optimalen Feldhäcksler-Transporteinheiten-Kombination und der Größe des Güllefassens erfolgte modellintern.

Im Modell werden die jährlichen Kosten für Anbau und Kulturführung sowie Ernte und Gülleausbringung unter Einbeziehung von Nutzungskosten der benötigten Ackerfläche berechnet. Der Substrat- und Biogasgülleanfall sind ebenso wichtige, im Modell errechnete Kennzahlen. Für die Optimierung der Gülleausbringung wird der N-Gehalt geschätzt und ein eventuell notwendiger N-Import bzw. Export aufgezeigt. Der Einsatz von Co-Substraten (wie z. B. Gülle oder Mist aus der Tierhaltung) kann ebenso abgebildet werden wie N-Verluste bei der Endlagerung.

Das Modell eignet sich, um die in den Varianten dargestellten Problemstellungen zu beantworten. Derzeit verfügt das Modell über eine Auswahl von gängigen Kulturen, die beliebig erweitert werden kann. Der große Vorteil dieses Modells ist, neben der Berücksichtigung der Anbau- und Kulturführungskosten, die Methode der Berechnung der Gülleausbringungskosten. Diese sind nicht wie in anderen Studien an den Mengenanfall gekoppelt, sondern werden über den geschätzten N-Gehalt der Biogasgülle und über den N-Bedarf der Kulturen berechnet. Darin inkludiert ist die Verteilung der Kulturen auf die Fläche in Abhängigkeit der Entfernung. Wäre es, aufgrund der Transportkosten bei der Ernte, günstiger Kultur A auf weit entfernten Flächen anzubauen, könnte der höhere N-Bedarf dieser Kultur dazu führen, dass sie näher zur Biogasanlage angebaut wird als Kultur B mit höheren Erntekosten, die durch höhere Transportkosten bedingt sind.

Verbesserungswürdig ist besonders die Datengrundlage, weil vor allem Unterschiede in den Ertragsniveaus (vor allem bei regionaler Betrachtungsweise) die Modellscheidungen und somit die Ergebnisse beeinflussen. Durch den Aufbau des Modells sind aber Inputfaktoren wie Ertrag, Methangehalt oder Proteingehalt leicht an die gegebenen Umstände anpassbar.

Ein Kritikpunkt zum Modell ist die Gülleverteilerung. Durch die Minimierung der Ausbringungskosten, werden zuerst die hofnahen Flächen bis zum oberen N-Limit aufgedüngt. Auf Flächen mit höherer Hof-Feld-Entfernung wird, je nach verfügbarer Stickstoffmenge, weniger Stickstoff ausgebracht. Eine Rückkopplung von der Düngeintensität auf den Ertrag könnte dieses Problem lösen. Dazu sind aber Ertragskurven in Abhängigkeit der N-Düngung für jede eingesetzte Kultur notwendig.

Beim Vergleich der Ergebnisse der 4 Berechnungsvarianten wird der ökonomische Vorteil des Einsatzes von Silomais als Substrat ersichtlich. Jährliche Einsparungen von 80.000 € und mehr (bei einer 500 kW_{el} Biogasanlage) gegenüber den anderen Varianten können über die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage entscheiden. Dies erklärt auch den Trend zu Silomais als Substrat, den HOPFNER-SIXT et al. (2007) und E-CONTROL (2008) in ihren Erhebungen feststellten. Diesen Studien zufolge ist auch der Anteil von Gülle als Substrat beträchtlich. Den Modellergebnissen zufolge beträgt der Veredelungswert bei Gülle rund 3,50 € je m³.

In der Variante C konnte die Zweckmäßigkeit einer Abdeckung des Endlagers in wirtschaftlicher Hinsicht aufgezeigt werden. Die Einsparungen durch den geringeren Substratbedarf und durch die Vermeidung von Stickstoffverlusten übersteigen die zusätzlichen Kosten der Abdeckung des Endlagers. Hinzu kommen noch die positiven Umwelteffekte dieser Maßnahme.

GUNNARSSON et al. (2008) zeigten bereits die Kostenunterschiede verschiedener Logistiksysteme am Beispiel Klee-gras in Schweden. Ihr Modell beschäftigt sich vorwiegend mit der Ableitung von Ernte- und Logistikkosten verschiedener Logistiksysteme in Abhängigkeit von Transportdistanz, geernteter Fläche und Ertrag. Den Landwirten wird für ihre Aufwendungen zu Anbau und Kulturführung sowie für die Nutzungskosten der Fläche eine ertragsabhängige Pauschale eingerechnet. Nicht in den Kalkulationen enthalten sind Kosten für die Verwertung der anfallenden Biogasgülle. Das hier vorgestellte Modell hat den Vorteil, dass neben der Transportkapazität auch die Feldhäckslerleistung in Abhängigkeit von Ertrag und Transportentfernung berücksichtigt wird. Die Anbau-, Kulturführungs- und Nutzungskosten für Klee-gras liegen nach den vorliegenden Ergebnissen deutlich über jenen von GUNNARSSON et al. (78 €/t TM vs. 22 €/t TM). Die darüber hinaus kalkulierten Ausbringungskosten für die rückgeführte Biogasgülle betragen bei zweischnittigem Klee-gras je nach Entfernung 3 bis 13 €/t TM.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit lässt sich – wie schon in der Untersuchung von WALLA UND SCHNEEBERGER (2006) dokumentiert – die ökonomisch sinnvolle Veredelung von Gülle in einer Biogasanlage ableiten. Durch die Schätzung des N-Gehaltes in dem hier vorgestellten Modell kann die N-Düngung explizit bilanziert werden. Dies ermöglicht das Aufzeigen von allfälligen N-Überschüssen beim Einsatz von Gülle aus der Tierhaltung.

Die in den Modellergebnissen ermittelten Kosten bei Silomais decken sich weitgehend mit jenen von WALLA UND SCHNEEBERGER (2008). Bei höheren Transportentfernungen wird im vorgestellten Modell jedoch ein Wechsel von kleinen zu großen Transporteinheiten vollzogen, wodurch die Ernte- und Logistikkosten mit zunehmender Entfernung unter denen von WALLA UND SCHNEEBERGER liegen. Gerade beim Vergleich von unterschiedlichen Anlagengrößen und damit verbundenen unterschiedlichen Transportentfernungen kommt diesem Punkt zunehmende Bedeutung zu.

Ausgehend von den Modellergebnissen dieser Analyse ergänzt um die von WALLA UND SCHNEEBERGER (2008) kalkulierten jährlichen Kosten einer 500 kW_{el} Biogasanlage kann von einem notwendigen Einspeisetarif für Ökostrom zwischen 16,04 Cent/kWh (Variante A) und 18,90 Cent/kWh (Variante C) ausgegangen werden. Je nach Jahr der Inbetriebnahme einer Biogasanlage ist in Österreich die Abnahme von Strom gesetzlich vorgeschrieben und die Vergütung unterschiedlich geregelt (BGBl. II Nr. 508/2002; BGBl. II Nr. 401/2006; BGBl. II Nr. 59/2008). Demnach wurde für eine 500 kW_{el} Biogasanlage, die in den Jahren 2003 bis 2005 in Betrieb ging, ein Tarif von 14,50 Cent/kWh für 13 Jahre festgesetzt. Bei Anlagen, die 2006 bis 2008 in Betrieb gingen, wurde der Tarif für 10 plus 2 reduzierte Jahre (75 % im 11. und 50 % im 12. Jahr) mit 14,10 Cent/kWh für das Jahr 2006, mit 14,00 Cent/kWh für 2007 und 13,99 Cent/kWh für die darauf folgenden Jahre fixiert. Es kann daher die Schlussfolgerung gezogen werden, dass keiner der bisherigen Tarife die Vollkosten bei einer 500 kW_{el} Biogasanlage deckt.

Gerade in den Jahren 2003 bis 2005 stieg die Anzahl der Biogasanlagen beträchtlich (E-CONTROL, 2009). Nach Ablauf der fixierten 13 Jahre (2016 bis 2018) müssen die Biogasanlagen, sollte es bis dahin keine Übergangslösung geben, zu Marktpreisen produzieren. Dies würde bedeuten, dass der Marktpreis für Strom ausgehend von 5,30 Cent/kWh (Durchschnitt bEXAbase (00–24 h) 2008 und 2009; EXAA, 2009) bis dahin um ca. 35 % (Variante A) bzw. ca. 75 % (Basisvariante) steigen müsste, um zumindest die

Substratbereitstellungskosten zu decken. Soll das gesteckte Ziel einer substanziellen Steigerung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen erreicht werden, bedarf es aus heutiger Sichte auch in Zukunft einer Unterstützung von Ökostromanlagen. Die vorliegende Arbeit liefert diesbezüglich Anhaltspunkte im Bereich der Erzeugung von Ökostrom aus Biogas.

Danksagung

Das Optimierungsmodell wurde im Zuge des Projektes „Optimierung der Beschaffungs- und Distributionslogistik bei großen Biogasanlagen“ entwickelt. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie über das Programm „Energiesysteme der Zukunft“ finanziert.

Anhang

Tabelle 3: Koeffizienten zur Berechnung der Ernte- und Transportkosten

Table 3: Coefficients for calculating the harvest and logistic costs

Kultur	Feldhäckslerleistung	Transportkapazität	C	Ckm	CtFM	CTM
Ackerfutter	458 kW	40 m ³	10.643	3.450	3.085	190.070
Ackerfutter	458 kW	16 m ³	-13.113	3.928	3.798	224.164
Ackerfutter	232 kW	40 m ³	18.513	3.339	2.732	227.710
Ackerfutter	232 kW	16 m ³	-8.473	3.905	3.750	237.653
Ganzpflanzensilage	458 kW	40 m ³	-159.010	9.359	7.843	405.242
Ganzpflanzensilage	458 kW	16 m ³	-197.695	11.351	8.539	419.664
Ganzpflanzensilage	232 kW	40 m ³	-173.469	10.792	8.569	431.750
Ganzpflanzensilage	232 kW	16 m ³	-179.236	11.880	7.985	436.630
Grünroggen	458 kW	40 m ³	1.862	4.239	4.963	123.493
Grünroggen	458 kW	16 m ³	-54.998	5.584	6.261	219.342
Grünroggen	232 kW	40 m ³	-4.815	4.414	5.703	154.317
Grünroggen	232 kW	16 m ³	-45.657	5.065	6.172	231.371
Hirse	458 kW	40 m ³	-328.389	14.898	6.552	841.125
Hirse	458 kW	16 m ³	-377.035	17.719	6.238	1.014.517
Hirse	232 kW	40 m ³	-317.032	15.277	7.098	927.918
Hirse	232 kW	16 m ³	-374.898	17.696	6.704	1.100.045
Körnermais	221 kW	39 m ³	135.238	0.487	10.866	0
Körnermais	221 kW	27 m ³	160.785	2.551	9.323	0
Körnermais	221 kW	16 m ³	136.699	3.182	9.532	0
Silomais	458 kW	40 m ³	-196.010	19.452	5.549	412.312
Silomais	458 kW	16 m ³	-174.496	22.065	5.621	263.493
Silomais	232 kW	40 m ³	-167.870	17.308	6.715	417.335
Silomais	232 kW	16 m ³	-215.021	21.299	6.455	466.629
Sonnenblumen	458 kW	40 m ³	-120.201	8.985	4.912	514.179
Sonnenblumen	458 kW	16 m ³	-176.370	11.934	6.082	487.341
Sonnenblumen	232 kW	40 m ³	-69.642	8.174	3.956	770.695
Sonnenblumen	232 kW	16 m ³	-127.533	9.645	4.580	828.169
Zuckerrübe	300 kW	39 m ³	86.843	4.454	8.075	0
Zuckerrübe	300 kW	27 m ³	-576.236	19.885	20.049	0
Zuckerrübe	300 kW	16 m ³	131.673	15.388	6.829	0

Literatur

- AMON, T., V. KRYVORUCHKO, K. HOPFNER-SIXT, B. AMON, M. RAMUSCH, D. MILOVANOVIC, V. BODIROZA, R. SAPIK, J. ZIMA, A. MACHMÜLLER, W. ZOLLITSCH, W. KNAUS, J.K. FRIEDEL, R. HRBEK, E. PÖTSCH, L. GRUBER, A. STEINWIDDER, E. PFUNDTNER, H. WAGENTRISTL (2006): Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanergiewertssystem. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 80/2006, BMVIT, Wien.
- BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Hrsg.) (2002): Grundlagen zur Ermittlung der Maschinenkosten, Ergänzungsheft 1 zum Katalog von Standarddeckungsbeiträgen und Daten für die Betriebsberatung 2002/03. Wien, Eigenverlag.
- BMLFUW (2006a): Anlage I, Anhänge zum Agrarumweltprogramm und zur Tierschutzmaßnahme (ÖPUL 2007). Wien, Eigenverlag.
- BMLFUW (2006b): Richtlinien für die sachgerechte Düngung. 6. Aufl., Wien, Eigenverlag.
- BMLFUW (2008): Deckungsbeiträge und Daten für die Betriebsplanung 2008. Wien, Eigenverlag.
- BMWA (Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Hrsg.) (2008): Energiestatus Österreich 2008. Wien, Eigenverlag.
- BÖRJESSON, P.I.I. (1996): Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass and Bioenergy* 1996; 11: 305–318.
- COUNCIL DIRECTIVE 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources.
- DIRECTIVE 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market.
- DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft, Hrsg.) (1997): DLG-Futterwerttabellen-Wiederkäuer. 7. Aufl., DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- DLG (2006): Praxishandbuch Futterkonservierung. 7. Aufl., DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- E-CONTROL (2008): Ökostrombericht 2008. http://www.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL_HOME/OKO/DOWNLOADS/BERICHTE/OEKOSTROMBERICHT/ECG-Oekostrombericht_ENDVERSION_Final%20Document_2008-10-2.pdf
- E-CONTROL (2009): Homepage der Energie-Control Österreichische Gesellschaft für die Regulierung in der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft mit beschränkter Haftung. http://www.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL_HOME/OKO, 7.12.2009.
- EXAA (Energie Exchange Austria) (2009): Spotmarkt Strom 2008 und 2009, http://www.exaa.at/market/historical/austria_germany/index.html, 7.12.2009.
- GUNNARSSON, C., L. VAGSTRÖM, P.-A. HANSSON (2008): Logistics for forage harvest to biogas production—Timeliness, capacities and costs in a Swedish case study. *Biomass and Bioenergy* 2008; 32: 1263–73.
- HOPFNER-SIXT K, T. AMON E. PÖTSCH, C. WALLAM, B. AMON, D. MILOVANOVIC, H. MAYR, W. WEICHELBAUM (2007): Analyse und Optimierung neuer Biogasanlagen. Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG).
- JENKINS, B.M. (1997): A comment on the optimal sizing of a biomass utilization facility under constant and variable cost scaling. *Biomass and Bioenergy* 1997; 13: 1–9.
- KARPENSTEIN-MACHAN, M. (2005): Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber. DLG-Verlag, Frankfurt.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft; Hrsg.) (2005): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 13. Aufl., Darmstadt.
- LEDUC, D., E. SCHMID, M. OBERSTEINER, K. RIAHI (2009): Methanol production by gasification using a geographically explicit model. *Biomass and Bioenergy* 2009; 33: 745–751.
- OVEREND, R.P. (1982): The average haul distance and transportation work factors for biomass delivered to a central plant. *Biomass* 1982; 2: 75–79.
- REINHOLD, G., G. BREITSCHUH, L. HEROLD, W. ZORN, W. (2006): Standpunkt zur Ermittlung der Nährstoffgehalte und zur Nährstoffbilanzierung bei Einsatz von Biogasgülle. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), <http://www.tll.de/ainfo/pdf/biog0106.pdf>, 9.01.2009.
- SOKHANSANJ, S., A. KUMAR, A.F. TURHOLLOW (2006): Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL). *Biomass and Bioenergy* 2006; 30: 838–847.
- SOKHANSANJ, S., M. SUDHAGAR, A. TURHOLLOW, A. KUMAR, D. BRANSBY, L. LYND, M. LASER, M. (2009): Large-scale production, harvest and logistics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) – current technology and envisioning a mature technology. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 2009; 3: 124–141.
- STÜRMER, B., M. EDER, K. HOPFNER-SIXT, A. BAUER, F. HANDLER, T. AMON, A. RITZMANN (2008): Optimierung der Beschaffungs- und Distributionslogistik für Biogasanlagen. In: Österreichischer Biomasseverband, Mittel-

europäische Biomassekonferenz 2008, Tagungsband, 16. bis 19. Jänner 2008, Graz.

WALLA, C., W. SCHNEEBERGER (2006): Ökostromerzeugung aus Energiepflanzen von konventionell wirtschaftenden Betrieben, *Die Bodenkultur* 2006; 57(3): 143–154.

WALLA, C., W. SCHNEEBERGER (2008): The optimal size for biogas plants. *Biomass and Bioenergy* 2008; 32: 551–557.

Anschrift der Autoren

DI Bernhard Stürmer, Institut für nachhaltige Wirtschaftsentwicklung, Department für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien, Österreich
E-Mail: bernhard.stuermer@boku.ac.at

Dr. Michael Eder, Institut für Agrar- und Forstökonomie, Department für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien, Österreich
E-Mail: michael.eder@boku.ac.at

Eingelangt am 16. Juni 2009

Angenommen am 12. März 2010