

# Optimierung der Beschaffungs- und Distributionslogistik auf Biogasanlagen

*Stürmer Bernhard, Eder Michael, Hopfner-Sixt Katharina, Bauer Alexander*  
*Universität für Bodenkultur Wien*  
*Institut für Agrar- und Forstökonomie*  
*Institut für Landtechnik*  
*Gregor Mendelstraße 33, 1180 Wien, Österreich*  
[bernhard.stuermer@boku.ac.at](mailto:bernhard.stuermer@boku.ac.at)  
[www.boku.ac.at](http://www.boku.ac.at)

## Einleitung

Der Energiepflanzenbedarf von großen Biogasanlagen ist beträchtlich. Biogasanlagen mit einer Leistung von 500 kW<sub>el.</sub>, die ausschließlich Energiepflanzen vergären, weisen einen täglichen Substratdurchsatz bis zu 38 t FM auf. Für die Produktion der Gärrohstoffe bedeutet dies einen jährlichen Anbauflächenbedarf von rund 260 ha. Die Bewirtschaftung dieser Flächen, die je nach Angebotsdichte einen Transportradius von bis zu 20 km bedingen, stellen hohe Anforderungen an die Logistik. Auf Grund des in der Regel hohen Wassergehaltes der verwerteten Rohstoffe müssen pro kWh erzeugte Energie verhältnismäßig große Massen antransportiert und auch als Gärrest wieder abtransportiert werden.

## Ziele

Das Projekt „Optimierung der Beschaffungs- und Distributionslogistik bei großen Biogasanlagen“ wurde im Rahmen der 2. Ausschreibung der Programmlinie „Energiesysteme der Zukunft“ genehmigt. Im Rahmen dieses Projektes wurden die der Biogastechnologie vorgelagerten Bereiche Rohstoffbeschaffung und Rohstofflagerung sowie die nachgelagerten Bereiche Gärrestaufbereitung und Gärrestausbringung erfasst, bewertet und Optimierungspotentiale aufgezeigt. Ziel war es, die Wertschöpfung der Biogasproduktion aus agrarischen Rohstoffen durch logistische Maßnahmen sowohl auf der Eingangs- als auch auf der Ausgangsseite der Biogasanlage zu erhöhen und Möglichkeiten zur Systemoptimierung entlang der logistischen Kette aufzuzeigen. Durch die Tendenz zu größeren Biogasanlagen, die die Energie aus nachwachsenden Rohstoffen gewinnen, kommt dem Bereich der Logistik immer mehr Bedeutung zu.

## Methoden

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Datengrundlage durch Messprogramme auf Biogasanlagen während der Ernte, der Lagerung, dem Betrieb, der Separierung und der Ausbringung bzw. Düngung geschaffen. Für die Datenaufnahme wurden elf österreichische Biogasanlagen ausgewählt, an denen unter praktischen Bedingungen die verschiedenen Kennwerte erhoben und gemessen wurden.

Zusätzlich wurden die erhobenen Daten mit Kennzahlen aus der Literatur verglichen und falls erforderlich ergänzt.

Nach Sondierung und Auswertung der Ergebnisse flossen diese in ein Optimierungsmodell mit dem Programm GAMS (General Algebraic Modeling System) ein. Einflussgrößen waren Ertrag (Frischmasseertrag bzw. Methanertrag je Hektar), Feld-Hof-Entfernung, Ernte- und Transportkombinationen und Gülleausbringungsverfahren. Diese werden im Modell monetär bewertet. Hinzu kamen noch die Anbau- und Kulturführungskosten der Energiepflanzen sowie die Nutzungskosten der Fläche. Zusätzlich erfolgte eine Wirtschaftlichkeitsanalyse verschiedener Systeme der Substrateinbringung und -lagerung sowie der Gärrestaufbereitung und -lagerung.

## **Ergebnisse**

Nachfolgende wird auf die Ergebnisse für die Substratbereitstellung, für die untersuchten Silosysteme, Einbringtechniken, Gülleseparation und Gülleendlager sowie für die Verfahren der Gülleausbringung eingegangen. Generell wurden Nettopreise (ohne MwSt.) veranschlagt. Bei den errechneten Erntekosten wurden keine Anfahrtspauschalen und Kosten für das Umsetzen von einem Feld zum anderen berücksichtigt. Die Maschinenkosten wurden auf Basis aktueller Maschinenringsätzen bzw. Tarifen von Lohnunternehmen erstellt. Somit sind in den Kalkulationen die Gesamtkosten der eingesetzten Maschinen und Geräte enthalten und die damit verbundenen Arbeitskosten entlohnt.

### **Substratbereitstellung**

Der Zeitaufwand für die Ernte der Energiepflanzen wurde mittels Zeitmessungen durch die BLT Wieselburg für Feldhäcksler mit einer Leistung von 232 bzw. 458 kW kombiniert mit unterschiedlichen Transporteinheiten (16, 25, 33,8 und 40 m<sup>3</sup>) erfasst. Die gemessenen Daten bei der Ernte ergaben einen stufenförmigen Verlauf des Arbeitszeitbedarfes für die unterschiedlichen Kombinationen von Feldhäcksler und Transporteinheiten. Die stufenförmigen Verläufe kommen durch die Annahme zustande, dass der Feldhäcksler keine Wartezeit aufweisen soll. Die Stufen werden durch die Wartezeit der zusätzlich benötigten Transporteinheit verursacht. Bei leistungsfähigeren Feldhäckslern ergibt sich ein geringerer Arbeitszeitbedarf, der jedoch mit einer entsprechend höheren Anzahl an Transporteinheiten einhergeht. In Abbildung 1 ist der stufenförmige Verlauf des Arbeitszeitbedarfes (Häckseln und Transport) für die Ernte von Silomais in Abhängigkeit von der Feld-Hofentfernung für ausgewählte Kombinationen dargestellt.

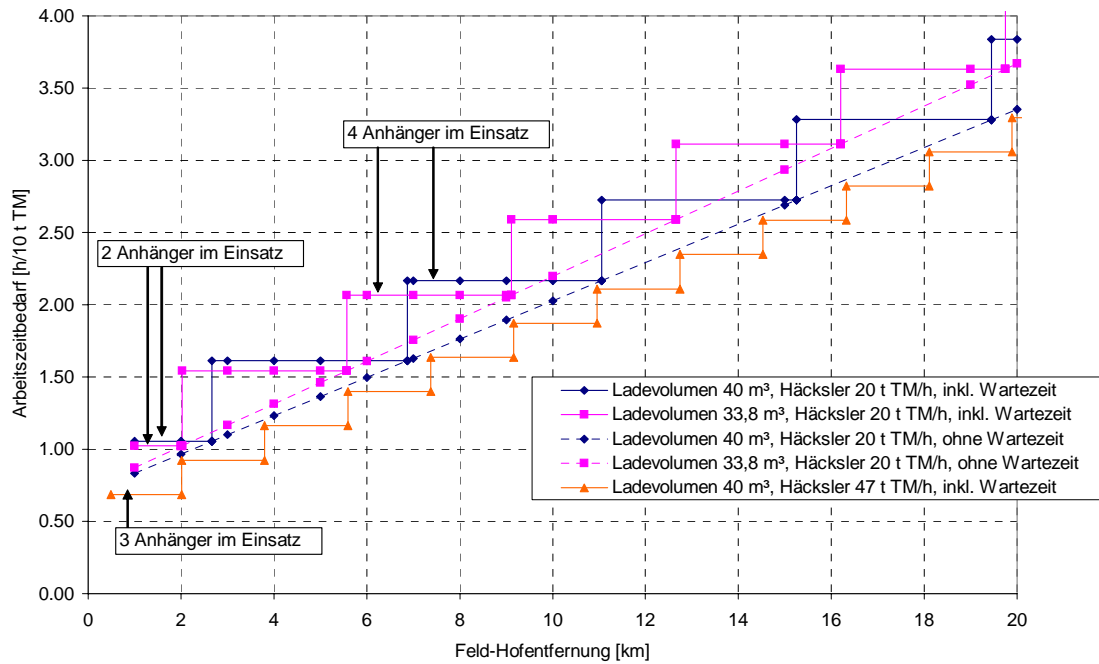


Abbildung 1: Arbeitszeitbedarf für die Silomaisernte in Abhängigkeit von der Feld-Hofentfernung für unterschiedliche Kombinationen

Für die Berechnung der Erntekosten wurden, neben den Zeiterhebungen, Tarife von Lohnunternehmern und Maschinenringsätze herangezogen. Bei den Erntekosten von Ackerfutter und Grünroggen kamen zusätzlich die Maschinenkosten für Mähen und Schwaden hinzu. Die Walzarbeit im Flachsilo wurde von einem Radlader und/oder Allradtraktoren erledigt. Das benötigte Walzgewicht richtet sich nach dem Frischmassedurchsatz des Feldhäckslers.

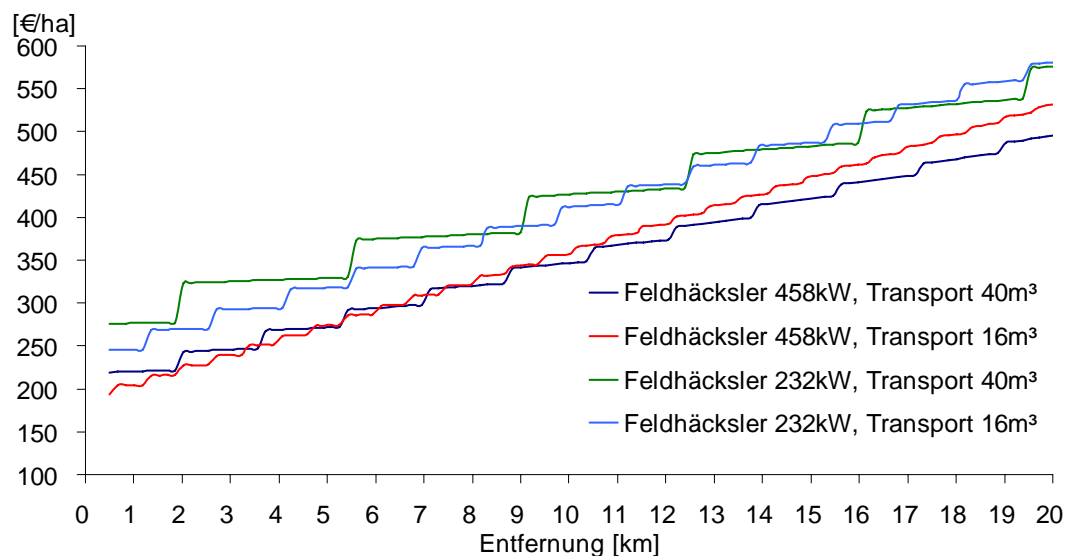


Abbildung 2: Kosten für die Silomaisernte in Abhängigkeit von der Feld-Hofentfernung für unterschiedliche Kombinationen

Wie in Abbildung 2 ersichtlich, ergibt sich nach der monetären Bewertung ebenfalls ein stufenförmiger Verlauf. Aus den Ergebnissen der Erntekostenberechnung wurden Regressionsgeraden in Abhängigkeit des Ertrages, des Trockenmassegehaltes und der Feld-Hof-Entfernung abgeleitet, die in das lineare Optimierungsmodell eingingen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die Anzahl der unterschiedlichen Transportgrößen auf zwei reduziert (klein = 16 m<sup>3</sup> bzw. groß = 40 m<sup>3</sup>).

Aufgrund der Regressionsgeraden kann die optimale Kombination der untersuchten Feldhäckslerleistung und Transporteinheiten in Abhängigkeit der Feld-Hof-Entfernung für die ausgewählten Energiepflanzen abgeleitet werden (Tabelle 1). So kommt z.B. bei der Ernte von Silomais ausschließlich ein großer Feldhäcksler (458 kW) zum Einsatz. Kleine Transporteinheiten (16 m<sup>3</sup>) übernehmen den Abtransport bis zu einer Entfernung von 7 km. Müssen weitere Strecken zurückgelegt werden, werden große Transporteinheiten (40 m<sup>3</sup>) eingesetzt.

Tabelle 1: Optimale Kombination der untersuchten Feldhäckslerleistung und Transporteinheiten in Abhängigkeit der Feld-Hof-Entfernung

Kultur/Kulturkombination	Kultur	Feldhäcksler		Transport	
		klein	groß	klein	groß
Ackerfutter, 2 Nutzungen	1.Schnitt		x	- 6,5	> 6,5
	2.Schnitt		x	- 9,0	> 9,0
Ackerfutter, 3 Nutzungen	1.Schnitt		x	- 6,5	> 6,5
	2.Schnitt		x	- 9,5	> 9,5
	3.Schnitt		x	- 11,0	> 11,0
GPS	GPS	- 2,0	> 2,0	- 2,0	> 2,0
GPS-Hirse	GPS	- 3,0	> 3,0	- 3,0	> 3,0
	Hirse		x	- 6,5	> 6,5
GPS-Sonnenblumen	GPS	- 3,0	> 3,0	- 3,0	> 3,0
	Sonnenblumen		x	- 8,0	> 8,0
Grünroggen	Grünroggen		x		x
Grünroggen-Hirse	Grünroggen		x	- 6,5	> 6,5
	Hirse		x	- 6,5	> 6,5
Grünroggen-Sonnenblumen	Grünroggen		x	- 6,5	> 6,5
	Sonnenblumen		x	- 8,0	> 8,0
Hirse	Hirse		x	- 5,5	> 5,5
Silomais	Silomais		x	- 7,0	> 7,0
Sonnenblumen	Sonnenblumen		x	- 9,5	> 9,5

GPS = Ganzpflanzensilage; - 7,0 = bis 7 km; > 7,0 = über 7 km; x = Entfernungsunabhängig

Weiters wurde die Frage geklärt, bis zu welcher Wartezeit des Feldhäckslers es ökonomisch sinnvoll ist, dass nicht die Transporteinheit auf den Feldhäcksler wartet sondern umgekehrt. Dazu wurden die Berechnungen der Erntekosten mit einer optimalen Anzahl an Transporteinheiten mit jenen verglichen, bei denen eine Transporteinheit weniger zur Verfügung steht. Durch die Gegenüberstellung der Kalkulationen konnte die maximale, sinnvolle Wartezeit des Feldhäckslers je nach Energiepflanze abgeleitet werden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Ökonomisch sinnvolle, maximale Wartezeit<sup>1)</sup> des Feldhäckslers [min] bei verschiedenen Erntekulturen in Abhängigkeit der Feldhäckslleistung und der Größe der Transporteinheit

Feldhäcksler	Transport	Ackerfutter	GPS Getreide	Grünroggen	Hirse	Silomais	Sonnenblume
232 kW	40 m <sup>3</sup>	1,0	2,5	2,0	2,5	3,0	4,0
232 kW	33,8 m <sup>3</sup>	1,0	2,5	2,0	2,0	1,5	2,5
232 kW	25 m <sup>3</sup>		1,5			1,5	1,5
232 kW	16 m <sup>3</sup>		1,0			1,0	1,0
458 kW	40 m <sup>3</sup>	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	2,0
458 kW	33,8 m <sup>3</sup>	1,0		1,0	1,0	1,0	2,0
458 kW	25 m <sup>3</sup>				1,0		
458 kW	16 m <sup>3</sup>						

<sup>1)</sup> Wartezeiten unter einer Minute werden nicht ausgewiesen

## Silosysteme und Einbringtechnik

Vier Silosysteme (Traunsteinsilo, Siloplatte, Hochsilo und Schlauchsilo) wurden ökonomisch bewertet und gegenübergestellt. In den Kalkulationen wurden die Investitionskosten, die jährlichen Befüllkosten, Kosten für die Abdeckung und die Entnahmekosten berücksichtigt. Die geringsten jährlichen Kosten der untersuchten Silosysteme weist die Siloplatte aufgrund der geringsten Investitionskosten auf. Die Silierung in einem Schlauchsilo ist zwar noch günstiger, wird allerdings ein befestigter Untergrund mit eingerechnet, liegen die jährlichen Kosten im Bereich des Traunsteinsilos. Die Kostenvorteile bei der Einbringung und Entnahme in einem Hochsilosystem (je 1.200 m<sup>3</sup>) können die hohen Investitionskosten nicht kompensieren. Die jährlichen Kosten einer Hochsiloanlage liegen um 10 bis 20 % über jenen des Traunsteinsilos.

Bei den Einbringssystemen wurden für vier Systeme (Futtermischanlage mit Hochförderschnecke, Schubboden mit Hochförderschnecke, Schubboden mit hydraulischer Einbringung, Intervallförderer mit hydraulischer Einbringung) für 250 und 500 kW<sub>el</sub> Biogasanlagen die jährlichen Kosten ermittelt. Einbringssysteme mit Hochförderschnecken weisen beträchtliche Kostenvorteile gegenüber Einbringssystemen mit Hydraulikzylindern auf. Das System Futtermischanlage mit Hochförderschnecke ist bei einer Biogasanlage mit 250 kW<sub>el</sub> die kostengünstigste Variante, bei 500 kW<sub>el</sub> ist dies der Schubboden mit Hochförderschnecke.

## Exkurs: Messungen zur Gülleseparierung

Um die Einsatzfähigkeit von Separatoren auf Biogasanlagen und die veränderten Nährstoffflüsse abbilden zu können, wurde im Rahmen des Projekts an zwei Biogasanlagen ein verfahrenstechnischer Vergleich zweier Separatorbauarten durchgeführt. Über einen Zeitraum von je sieben Wochen erfolgten intensive Messungen zu Stoff- und Energieströmen mit einem Pressschnecken- und einem Siebtrommelseparator an beiden Anlagen. Dabei wurden Stoffproben aus dem Inputstrom, dem Gärsubstrat und aus den beiden Outputströmen (feste und flüssige Phase) gezogen. Anhand von Nährstoffanalysen, entlang der gesamten Prozesskette, konnte die Massenverteilung und die Anreicherung der düngerelevanten Nährstoffe in der flüssigen und festen Phase ermittelt werden.

Im Querschnitt über die beiden Biogasanlagen lag der Trockensubstanzgehalt im vergorenen Substrat bei durchschnittlich 7,31 % FM. Die Separierung bewirkte eine Akkumulation der vorhandenen Trockensubstanz in der festen Phase (61,8 %), wodurch nach der Separierung der Trockensubstanzgehalt 19,3 % in der festen Phase und 4,5 % in der flüssigen Phase betrug. Die gleichen Veränderungen konnten beim oTS-Gehalt sowie bei den Inhaltsstoffen Asche und den Kohlenstoff beobachtet werden.

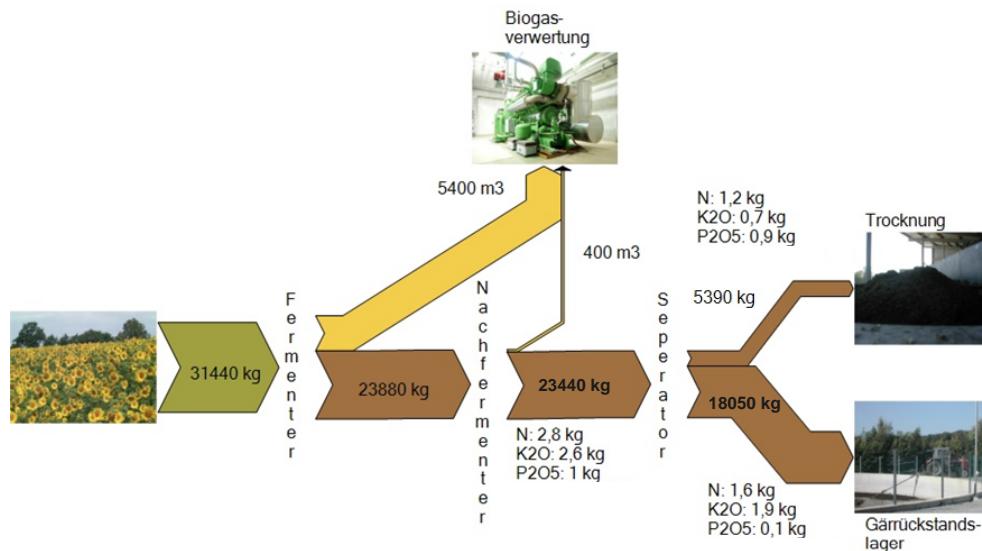


Abbildung 3: Massenstrom einer Biogasanlage (500 kW<sub>el</sub>) mit Gülleseparierung

Aus Abbildung 3 wird der Massenstrom einer der beiden Biogasanlage (500 kW<sub>el</sub>) ersichtlich. Bei einer täglichen Inputmenge von 31.440 kg FM wurden aus der Biomasse 5.800 m<sup>3</sup> Biogas im Fermenter und Nachfermenter gebildet, was einer Masse von ca. 8.000 kg entspricht. Die verbleibende Masse von 23.440 kg wurde durch die Separierung in 5.390 kg feste und 18.050 kg flüssige Phase aufgeteilt. Entscheidend für den Abscheidegrad ist der Trockensubstanzgehalt des zugeführten Gärrückstandes. Der Gehalt an Nährstoffen (N, K) blieb bis auf Phosphor, welcher sich in der festen Phase stark aufkonzentriert, anteilmäßig unverändert. Die Untersuchungen zeigten, dass durch die Separierung eine gezielte Nährstoffausbringung und Düngung möglich wird.

### Gülleseparation und Gülleendlager

Die vom Institut für Landtechnik erhobenen Daten bildeten die Grundlage für die ökonomische Bewertung des Pressschneckenseparators und des Siebtrommelseparators. Den jährlichen Gesamtkosten der Separierung wurden die Kosteneinsparungen durch den geringeren Gülleraumbedarf gegenübergestellt. Zusätzlich wurden die Ausbringungskosten der flüssigen und festen Phase errechnet und mit den Ausbringungskosten der Biogasgülle verglichen.

Ein Pressschneckenseparator weist deutliche Vorteile gegenüber einem Siebtrommelseparator auf. Dies schlägt sich bei den jährlichen Kosten mit dem Faktor 2,5 bis 2,6 nieder. Einem Kostenvorteil, aus der Einsparung beim Gülleendlager - je nach Anlagengröße, Substrateinsatz und Abdeckung des

Gülleendlagers - von 1.400 bis 6.300 €/Jahr stehen Kosten für die Separierung von 10.400 bis 48.400 €/Jahr gegenüber.

Die Ausbringungskosten nach der Separierung (feste Phase mit Kompoststreuer, flüssige Phase mit Güllefass) unterschreiten erst bei großen Distanzen die Kosten der Ausbringung ohne Separierung.

Bei der Kalkulation der Kosten für das Gülleendlager wurde aus pflanzenbaulichen Überlegungen zwischen ausschließlichem Silomaiseinsatz und dem Einsatz mehrerer Kulturen hinsichtlich der Lagerungsdauer unterschieden (Silomais 9 Monate; mehrere Kulturen 6 Monate). Trotz höherem Gülleanfall bei mehreren Kulturen errechnen sich für Silomais - bedingt durch die längere Lagerungsdauer der Gülle - um rund 23 % höhere jährliche Kosten. Das Güllelager mit Abdeckung verursacht um rund 80 % höhere jährliche Kosten.

### Gülleausbringung

Für die Berechnung der Gülleausbringungskosten wurden Daten von Güllefässern (Vakuumfass mit Prallkopfverteiler bzw. Pumpfass mit Schleppschauch) mit 8 und 18 m<sup>3</sup> Fassinhalt aus den Zeiterhebungen der BLT Wieselburg übernommen. In Abbildung 4 sind die Kosten der Gülleausbringung in Abhängigkeit von der Hof-Feldentfernung ersichtlich. Demnach sollte die Gülleausbringung bis zu einer Distanz von 9,5 km mit einem 8 m<sup>3</sup> großen Vakuumfass erfolgen. Liegen die Felder weiter von der Biogasanlage entfernt, ist die Ausbringung mit einem 18 m<sup>3</sup> großen Vakuumfass günstiger.

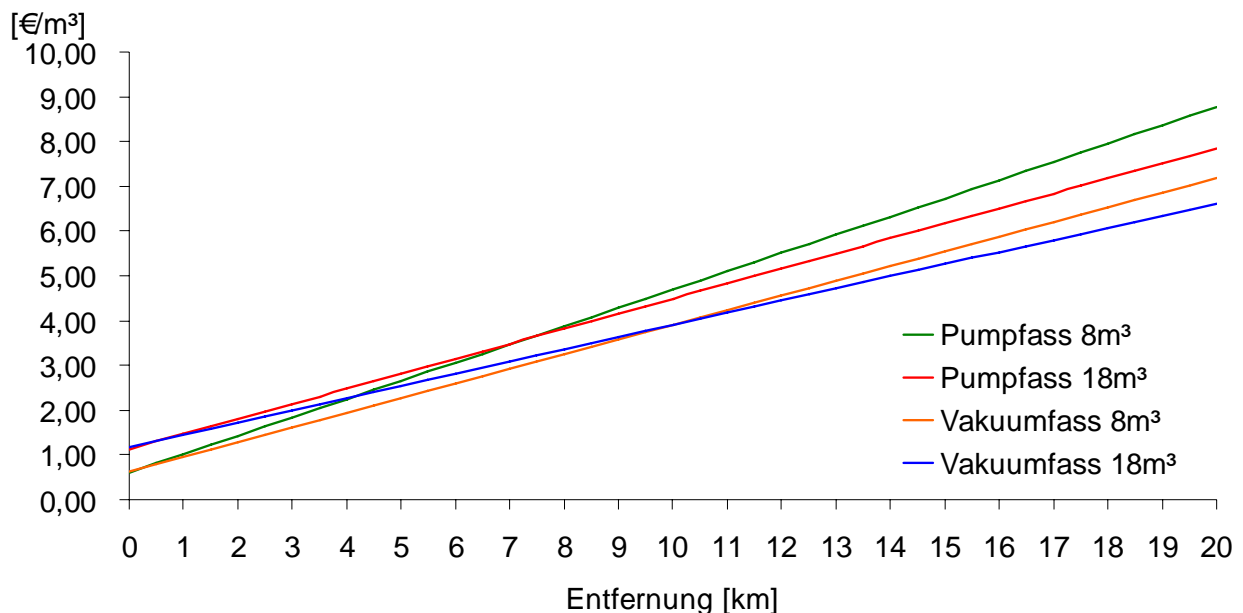


Abbildung 4: Kosten der Gülleausbringung [€/m<sup>3</sup>] in Abhängigkeit der Hof-Feldentfernung

## Modellergebnisse

Die Berechnungen zu den Kosten der Ernte der Energiepflanzen sowie der Gülleausbringung flossen in ein Optimierungsmodell mit dem Programm GAMS (General Algebraic Modeling System) ein. Einflussgrößen waren Ertrag (Frischmasseertrag bzw. Methanertrag je Hektar), Feld-Hof-Entfernung, Ernte- und Transportkombinationen und Gülleausbringungsverfahren. Zusätzlich wurden noch die Anbau- und Kulturführungskosten der Energiepflanzen sowie die Nutzungskosten der Fläche berücksichtigt.

Zur Ermittlung der relativen Vorzüglichkeit der Energiepflanzen wurde aufgrund der Ergebnisse der Optimierung einer Biogasanlage mit 500 kW<sub>el</sub> eine Rangreihung der Kulturen erstellt. Die Fläche um die Biogasanlage wurde in Kreisringe mit Abständen von 200 bzw. 500 m unterteilt. In jedem dieser Kreisringe liegt ein Schlag mit einem Flächenausmaß von 15,3 ha. Für jede Kultur bzw. Kulturkombination wurde eine Simulation durchgeführt. Die Summe der Kosten für Anbau, Pflege, Ernte, Gülleausbringung und Nutzung waren Grundlage für die Reihung der Kulturen. Im Folgenden werden die Energiepflanzen nach ihrer relativen Vorzüglichkeit gereiht aufgelistet: Silomais, Hirse, Grünroggen/Hirse, Getreideganzpflanzensilage/Hirse, Ackerfutter (3 Nutzungen), Ackerfutter (2 Nutzungen), Getreideganzpflanzensilage, Getreideganzpflanzensilage/Sonnenblumen, Grünroggen/Sonnenblumen, Sonnenblumen, Grünroggen. Diese Reihung wird stark vom angenommenen Ertragsniveau der einzelnen Kulturen bzw. den Ertragsrelationen zwischen den Kulturen beeinflusst. Standortbedingt können dadurch Unterschiede in der Rangreihung auftreten.

Wird unterstellt, dass mehr als eine Kultur bzw. Kulturkombination in der Biogasanlage zum Einsatz kommen, stellt sich zusätzlich die Frage, in welcher räumlichen Anordnung die Kulturen im Optimum angebaut werden sollen. Dazu wurde im Modell unterstellt, dass alle möglichen Kulturen bzw. Kulturkombination zu gleichen Teilen zum Einsatz kommen. Die daraus resultierende Rangreihung des Anbaus vom am nächst gelegenen zum entferntesten Schlag sieht wie folgt aus: Getreideganzpflanzensilage/Hirse, Getreideganzpflanzensilage/Sonnenblumen, Grünroggen/Hirse, Silomais, Grünroggen/Sonnenblumen, Hirse, Ackerfutter (3 Nutzungen), Sonnenblumen, Getreideganzpflanzensilage, Ackerfutter (2 Nutzungen), Grünroggen. Werden mehrere Kulturen angebaut, so geschieht dies in der Regel in einer Fruchtfolge. Die hier genannte Rangreihung spiegelt das kostengünstigste Anbaujahr innerhalb der Fruchtfolge wider.