

Thünensche Ringe der Biogaserzeugung – der Einfluss der Transportwürdigkeit nachwachsender Rohstoffe auf die Rohstoffwahl von Biogasanlagen

Thuenen Rings of Biogas Production – the Effect of Differences in Transport Costs of Energy Crops in the Choice of Renewable Resources by Biogas Plants

Matthias Schulze Steinmann und Karin Holm-Müller
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Zusammenfassung

Dieser Beitrag befasst sich mit dem Einfluss der Transportwürdigkeit nachwachsender Rohstoffe auf die Rohstoffwahl von Biogasanlagen. Dabei wird die Rohstoffversorgung in Abhängigkeit der Transportentfernung der Rohstoffe optimiert. Hierfür wird das Modell der Thünenschen Ringe in einigen Punkten angepasst und auf die Rohstoffversorgung von Biogasanlagen angewendet. Neben den Mengen- und Energieerträgen der nachwachsenden Rohstoffe sowie deren Bereitstellungskosten spielt hierbei auch die Wirtschaftlichkeit der Anlage eine Rolle. Es zeigt sich, dass Silomais auch bei mittleren Transportentfernungen der vorteilhafteste nachwachsende Rohstoff ist. Bei höheren Transportentfernungen ist dagegen der transportwürdigere Winterweizen besser geeignet. Eine Untersuchung der Beschaffungsgebietsgröße der Rohstoffe zeigt, dass auch deutlich größere Biogasanlagen als der heutige Stand der Technik ausschließlich auf Silomais als nachwachsenden Rohstoff zurückgreifen würden.

Schlüsselwörter

Thünensche Ringe; Transportlogistik; nachwachsende Rohstoffe; Biogaserzeugung

Abstract

This paper discusses how differences in transport costs of energy crops affect the choice of feedstock used in biogas production. This is done by optimizing feedstock demand subject to transportation distances of the different crops. For this a von Thunen type model is applied to the feedstock demand of biogas plants. In addition to yields in terms of quantity and energy concerning the different crops and the costs of having them available, the profitability of the fermenta-

tion plant must be considered. It is shown that silage maize is the most profitable crop for medium distances, but gives way to winter wheat as distances increase. Our analysis suggests that even bigger plants than today can be sustained exclusively with silage maize.

Key words

Thuenen Rings; transportation logistics; energy crops; biogas production

1. Einleitung

Begünstigt durch niedrige Preise für Agrarprodukte und die durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz auf 20 Jahre garantierte Mindestvergütung stellte Biogaserzeugung in den vergangenen Jahren für viele Betriebe eine günstige Produktionsalternative zum Marktfruchtanbau und zur Tierhaltung dar. Entsprechend stieg die Zahl der überwiegend in landwirtschaftlicher Hand befindlichen Biogasanlagen – vor allem seit der Novellierung des EEG 2004 – kontinuierlich an. Biogaserzeugung ist heute ein ernst zu nehmender Betriebszweig der deutschen Landwirtschaft, und deutsche Biogasanlagentechnik ist weltweit führend.

Das Spektrum möglicher Rohstoffe für die Biogaserzeugung ist sehr vielfältig. Neben Wirtschaftsdüngern und Abfällen aus der Lebensmittelindustrie können auch nachwachsende Rohstoffe zu Biogas vergoren werden. Vor allem der Einsatz Letzterer ist in den vergangenen Jahren förderungsbedingt stark angestiegen. Die hohen Zuwächse bei der Stromerzeugung aus Biogas (eine mehr als Verdopplung der installierten elektrischen Leistung allein in 2005), sind daher mit einem vermehrten Anbau von „Energiepflanzen“ verbunden.

Die Stoffeigenschaften möglicher Energiepflanzen fallen dabei sehr heterogen aus. Getreidekörner besitzen zwar aufgrund ihres hohen Trockenmasseanteils einen hohen Energiegehalt, erzielen jedoch nur geringe Naturalerträge je Flächeneinheit. Silomais und Getreide-GPS (Ganzpflanzensilage) hingegen weisen einen geringeren Energiegehalt auf, erzielen dafür aber deutlich höhere Naturalerträge je Flächeneinheit. Dementsprechend haben sich Silomais und Getreide-GPS im direkten Umfeld von Biogasanlagen in Deutschland durchgesetzt. Silomais ist heute mit deutlichem Abstand der am meisten für Biogasanlagen produzierte nachwachsende Rohstoff (vgl. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR), 2007: 94).

Da es sich bei Silomais bedingt durch den hohen Wasseranteil um transportunwürdige Biomasse handelt, während es sich bei Getreidekörnern um transportwürdige Biomasse handelt (vgl. DLR & FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE, 2001, und GRUBER, 2006), stellt sich die Frage, bis zu welcher Transportentfernung Silomais noch der optimale Rohstoff ist und ab welcher Entfernung/Anlagengröße andere nachwachsende Rohstoffe den Vorzug erhalten sollten. Transportkosten haben zwar in Folge technischen Fortschritts in den meisten Wirtschaftsbereichen an Bedeutung verloren, im landwirtschaftlichen Sektor und im Speziellen bei Biomasse machen sie jedoch nach wie vor einen erheblichen Anteil der Produktionskosten aus.

Wir wollen mit diesem Beitrag an einem Beispiel zeigen, wie das Konzept der Thünenschen Ringe für diese Frage verwendet werden kann und diskutieren, wie stabil die Ergebnisse bei Änderungen der Rahmenbedingungen sind. Unseres Wissens nach gibt es bisher keine Arbeit, die den Ansatz der Thünenschen Ringe für den Einsatz von Rohstoffen in Biogasanlagen angewendet und empirisch berechnet hat. Es gibt zwar eine Arbeit von LANKOSKI and OLLIKAINEN (2006), die mit Hilfe eines an die Thünensche Argumentation angelehnten Transportkostenmodells die sozial optimale Erntemenge für „red canary grass“ bestimmen, doch ist in der finnischen Arbeit dieses Gras der einzige mögliche Einsatzstoff für die Anlage und der Marktpreis für das Gras ist gegeben, was für Energiemais nicht der Fall ist. Wir dagegen analysieren Konkurrenzverhältnisse zwischen unterschiedlichen Einsatzstoffen, die sich in den Thünenschen Ringen widerspiegeln, und diskutieren auch die Auswirkungen unterschiedlicher Maispreise auf die Breite der Ringe. Dies ist nicht nur vom Ergebnis her

interessant, sondern auch von der Methodik her von Bedeutung, wenn auf Grund von Änderungen in der Agrarpolitik neue Einsatzstoffe, wie z. B. die Zuckerrübe, mit neuen Opportunitätskosten dem Silomais Konkurrenz machen sollten.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut: Der Abschnitt 2 stellt das Modell der Thünenschen Ringe in seinen Grundzügen vor und zeigt, welche zusätzlichen Berechnungen durchgeführt werden müssen, um zu berücksichtigen, dass für Energiemais und Getreide-GPS keine Marktpreise vorhanden sind. Abschnitt 3 erläutert die Verwendung der vorhandenen Datenquellen für die Berechnung der Thünenschen Ringe um die Biogasanlagen. Für die Situation Anfang 2008 werden die Ergebnisse im Abschnitt 4 vorgestellt und im Abschnitt 5 hinsichtlich von Problemen des Ansatzes und der Stabilität des Ergebnisses bei einer Änderung der Rahmenbedingungen diskutiert. Der letzte Abschnitt ist den Schlussfolgerungen gewidmet.

2. Theorie der Thünenschen Ringe

Theoretische Grundlage der durchgeführten Analyse ist das Modell der Thünenschen Ringe. JOHANN HEINRICH VON THÜNEN untersuchte bereits 1826 in seinem Werk „Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie“ die Art und Intensität der landwirtschaftlichen Bodennutzung in Abhängigkeit von den Transportkosten zum Absatzmarkt. Die Bedeutung der Theorie VON THÜNENS liegt vor allem darin, dass sie zeigt, dass die Marktkräfte alleine ausreichen, um räumliche Unterschiede in der Bodennutzung hervorzurufen (vgl. MAIER und TÖDTLING, 2001: 125). Die Form der Darstellung des für die Form der Bodennutzung relevanten Teiles geht in diesem Artikel auf DUNN (1954) zurück.

Um die Bedeutung der Transportkosten herauszustellen, entwickelte VON THÜNEN durch die Methode der isolierten Abstraktion das Gedankenmodell des „isolierten Staates“. Dabei handelt es sich um einen isolierten Wirtschaftsraum mit einer einzigen Stadt inmitten einer homogenen Ebene. Alle landwirtschaftlichen Produkte werden auf dieser Ebene erzeugt und müssen in die Stadt als einzigem Nachfrageort transportiert werden. Da die Verkehrsverbindungen in die Stadt aus allen Richtungen gleich sind, steigen die Transportkosten proportional zur Entfernung von der Stadt. Die Annahme einer homogenen Ebene führt dazu, dass alle Produzenten die gleiche Produktionsfunktion für die verschiedenen Güter haben.

2.1 Die Lagerente

Zentrales Kriterium der Thünenschen Theorie ist die Lagerente. Sie bestimmt, welches Produkt an welchem Standort hergestellt werden sollte und repräsentiert den potentiellen Gewinn, den ein Produzent mit einem bestimmten Gut bei einem bestimmten Marktpreis erzielen kann, wenn ihm der Boden kostenlos zur Verfügung steht (vgl. MAIER und TÖDTLING, 2001: 127). Mathematisch ist die Lagerente nach DUNN definiert als:

$$R = y \cdot (p - a) - y \cdot f \cdot k$$

Mit: R = Lagerente pro Flächeneinheit (€/ha)

y = Ertrag in Produkteinheiten pro Flächeneinheit (t/ha)

p = Marktpreis je Produkteinheit (€/t)

a = durchschnittliche Kosten je Produkteinheit ohne Bodenrentenanteil (€/t)

f = Transportkosten pro Produkt/Distanzeinheit (€/t*km)

k = Entfernung vom Markt (km)

(vgl. STEINHAUSER, LANGBEHN und PETERS, 1992: 33f.)

Da die Transportkosten mit der Transportentfernung steigen, sinkt die Lagerente bei zunehmender Entfernung einer Anbaufläche vom Markt. An der Stelle, an der die Transportkosten je Produkteinheit die gleiche Höhe erreichen wie die Differenz aus Marktpreis und durchschnittlichen Kosten, beträgt die Rente $R = 0$. Produzenten in der entsprechenden Entfernung vom Markt werden als Grenzproduzenten bezeichnet. Ein Anbau dieser Frucht in weiterer Marktentfernung ist nicht lohnend, da die steigenden Transportkosten zu Verlusten führen (vgl. STEINHAUSER, LANGBEHN und PETERS, 1992: 33f.).

Diese Betrachtung verdeutlicht den Einfluss der Lage eines Grundstücks auf das erzielbare Wirtschaftsergebnis. „Deswegen besitzen zwei Böden mit sonst gleichen Eigenschaften bei unterschiedlicher Entfernung zum Markt einen verschiedenen Wert als Produktionsmittel“ (vgl. STEINHAUSER, LANGBEHN und PETERS, 1992: 35).

2.2 Räumliche Produktionsstruktur

Unterschiedliche Lagerenten führen dazu, dass an verschiedenen Standorten unterschiedliche Produkte angebaut werden. Da die Produzenten mit dem Ziel handeln, ihren Gewinn zu maximieren, wird an jedem Standort das Produkt hergestellt, das dort die höchste Lagerente erreicht (vgl. MAIER und TÖDTLING, 2001: 131).

Vergleichen wir beispielsweise die Lagerenten von Salat und Weizen. Salat ist verderblicher als Weizen und anspruchsvoller im Transport. Damit weist Salat höhere Transportkosten pro Produkt/Distanzeinheit auf. Hinzu kommt, dass der Mengenertrag pro Flächeneinheit höher ist als der von Weizen. Somit ist die Transportkostenbelastung je Flächeneinheit höher. Entsprechend fällt die Lagerente für Salat steiler ab, als die für Weizen. Darum ist es sinnvoll, Salat (wenn überhaupt) im direkten Umfeld zum Absatzmarkt anzubauen, während Weizen auch noch an peripheren Standorten produziert werden kann.

Da die Annahmen einer homogenen Fläche und einheitlicher Transportmöglichkeiten gemacht wurden, ergibt sich ein kreisförmiges Salatanbaugebiet um die Stadt, das von einer ringförmigen Zone mit Weizenanbau eingeschlossen ist. Diese Zonen werden als „Thünensche Ringe“ bezeichnet (vgl. MAIER und TÖDTLING, 2001: 129).

2.3 Anwendung des Modells auf Rohstoffe für Biogasanlagen

Zielsetzung der durchgeführten Analyse ist es, die Lagerenten für unterschiedliche nachwachsende Rohstoffe zu berechnen, die sich aus dem Vorhandensein einer Biogasanlage ergeben. Durch die Schnittpunkte der Lagerenten ergeben sich dann die Thünenschen Ringe, die besagen, bis zu welcher Entfernung welcher nachwachsende Rohstoff optimal ist. Als Hauptproblem bei der Berechnung der Lagerenten hat sich herausgestellt, dass es für die transportunwürdigen Rohstoffe wie Silomais und Getreide-GPS an Biogasanlagen keinen durch Konkurrenz gebildeten Marktpreis wie im Thünen-Modell gibt.

Daher wird hier die maximale Zahlungsbereitschaft des Betreibers der jeweiligen Anlage für die unterschiedlichen nachwachsenden Rohstoffe verwendet. Dabei handelt es sich um die Bereitstellungskosten der nachwachsenden Rohstoffe, die beim Anlagenbetrieb genau zu einem Deckungsbeitrag von Null führen. Diese maximal tragbaren Bereitstellungskosten der nachwachsenden Rohstoffe sind damit sowohl vom Energiegehalt der Rohstoffe, als auch von der wirtschaftlichen Effizienz der Anlage abhängig. Da die Rohstoffwahl nach dem Marginalprinzip verläuft (vgl. BRANDES und WOERMANN, 1971: 62), sind die Festkosten der Biogasanlage bei der Optimierung der Rohstoffversorgung nicht zu berücksichtigen. Um die Thünenschen Ringe zu ermitteln, müssen von dieser Zahlungsbereitschaft dann die Rohstoffkosten und die kilometerabhängigen Transport-

kosten abgezogen werden. Damit ergeben sich für unterschiedliche Rentabilitäten von Anlagen auch unterschiedliche Lagerentenfunktionen und damit auch spezifische Thünensche Ringe.

3. Berechnung der Ergebnisse

Wir haben unsere Modellergebnisse am Beispiel der Situation Anfang 2008 berechnet. Für die Aussagen zu den Rohstoffkosten, den Zahlungsbereitschaften und den Transportkosten wurde auf Daten des KTBL zurückgegriffen. Die Zahlungsbereitschaften wurden ebenfalls anhand der 2008 geltenden Vergütungssätze des Erneuerbare-Energien-Gesetzes berechnet. Im Abschnitt 5 wird diskutiert, wie sich die Ergebnisse durch die Novellierung des EEG und andere denkbare Änderungen der Ausgangssituation tendenziell verändern.

3.1 Maximale Zahlungsbereitschaft für nachwachsende Rohstoffe

Die maximale Zahlungsbereitschaft für nachwachsende Rohstoffe ist zum einen vom Energiegehalt der Rohstoffe abhängig, zum anderen wird sie auch durch die wirtschaftliche Effizienz der Anlage selbst beeinflusst. Um die maximal tragbaren Bereitstellungskosten für unterschiedliche nachwachsende Rohstoffe zu berechnen, wurde die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen untersucht und Energiewerte des KTBL verwendet (vgl. SCHULZE STEINMANN, 2008: 30-46). Als Referenzanlagen dienen hierbei eine 500-kW-Anlage mit Verstromung des Biogases vor Ort und eine Anlage, die das Biogas auf Erdgasqualität aufbereitet und

in das Erdgasnetz einspeist. Die Anlage mit Gaseinspeisung produziert 600 Normkubikmeter Biogas pro Stunde. Dies entspräche bei Verstromung vor Ort einer installierten elektrischen Leistung von etwa 1,2 Megawatt. Für die 500-kW-Anlage werden außerdem unterschiedliche Wärmenutzungsszenarien betrachtet. Tabelle 1 zeigt die maximal tragbaren Bereitstellungskosten der nachwachsenden Rohstoffe in Abhängigkeit des Anlagenkonzeptes. Die Berechnungen beruhen auf den im Jahr 2008 geltenden Vergütungssätzen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes.

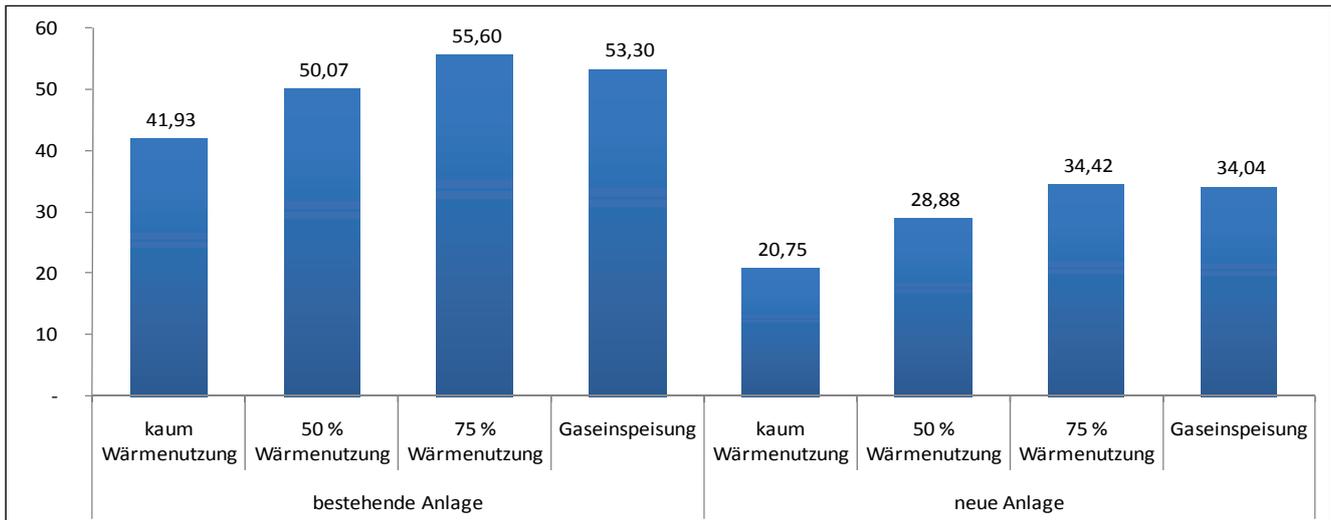
Mit zunehmender Energiedichte steigen die maximal tragbaren Bereitstellungskosten der nachwachsenden Rohstoffe. Für eine Tonne Weizenkorn kann beispielsweise aufgrund des höheren Energiegehaltes mehr bezahlt werden als für eine Tonne Maissilage. Eine Anlage, die die anfallende Wärme nutzt, kann mehr für die Tonne Mais bezahlen als eine Anlage mit unzureichender Wärmenutzung. Die Bedeutung des Anlagenkonzeptes ist noch einmal in Abbildung 1 herausgestellt.

Die 500-kW-Anlage mit hoher Wärmenutzung und die Anlage, die das Biogas aufbereitet und in das Erdgasnetz einspeist, erzielen deutlich höhere Deckungsbeiträge je Tonne Maissilage als die 500-kW-Anlage mit kaum Wärmenutzung. Sie können dementsprechend höhere Maispreise tragen. Die Differenz der maximalen Bereitstellungskosten zwischen bestehenden und neuen Anlagen entsteht durch den hohen Anteil versunkener Kosten beim Anlagenbetrieb. Dieser erklärt, warum viele Biogasanlagen aufgrund der gestiegenen Rohstoffpreise im Jahr 2007 rote Zahlen schrieben, aber dennoch weiter produzierten.

Tabelle 1. Maximal tragbare Bereitstellungskosten frei Anlage in €/t FM

Rohstoff	kaum Wärmenutzung	50 % Wärmenutzung	75 % Wärmenutzung	Gaseinspeisung
Maissilage 35 % TM	41,93	50,07	55,60	53,30
Winterweizen-GPS	40,58	48,46	53,81	51,59
Triticale-GPS	40,58	48,46	53,81	51,59
Winterweizenkorn	126,31	150,82	167,49	160,57
Corn-Cob-Mix	82,51	98,53	109,42	104,89
Futtermühen (Gehaltsrübe 18 %)	22,60	26,98	29,97	28,73

Quelle: SCHULZE STEINMANN (2008): 45

Abbildung 1. Maximal tragbare Maissilage-Bereitstellungskosten frei Anlage in €/t FM

Quelle: SCHULZE STEINMANN (2008): 47

3.2 Rohstoffkosten

Die rohstoffbezogenen Daten: Naturalertrag, Rohstoffkosten und Energieertrag basieren auf Werten des KTBL aus 2007.

Die Rohstoffkosten umfassen die Produktionskosten der Rohstoffe und außerdem Kosten für Ernte, Transport, Lagerung und Beschickung der Anlage, „womit eine vollständige Kostenkalkulation entlang der gesamten Bereitstellungskette möglich wird“ (KTBL, 2007: 3, 14). Prämien (Energiepflanzenprämie, entkoppelte Direktzahlungen) sind in der Leistungs-Kostenrechnung des KTBL nicht berücksichtigt. Die Kosten und Leistungen beziehen sich für alle nachwachsenden Rohstoffe auf konventionelle Anbausysteme mit wendender Bodenbearbeitung, bei einer mittleren Schlaggröße von 2 ha und mittlerem Ertragsniveau.

Die Energieerträge ergeben sich aus der Gasausbeute und dem Methangehalt des entstehenden Biogases. Beispiel: Eine Tonne Maissilage liefert 202 Nm³ (Normkubikmeter) Biogas mit einem Methangehalt von 52 Volumenprozent. Das ergibt 105 Nm³ Methan. Ein Nm³ Methan hat einen Heizwert von 9,97 kWh. Eine Tonne Maissilage liefert dementsprechend 1 047,2 kWh Energie, die durch eine Biogasanlage in Form von elektrischer und thermischer Energie genutzt werden können.

Nach der Vergärung der nachwachsenden Rohstoffe verbleibt ein Gärrest, dessen Ausbringung Kosten verursacht, aber auch Mineraldünger einspart. Der Grund hierfür ist, dass die dem Boden durch die nachwachsenden Rohstoffe entzogenen Nährstoffe

Phosphor und Kali im Gärrest vollständig erhalten bleiben und sich die Masse des Gesamtstickstoffes durch den Gärprozess kaum verändert (vgl. KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001). In der Kalkulation ist unterstellt, dass die entzogenen Nährstoffe durch den Gärrest wieder vollständig zurückgeliefert werden. Im Rahmen der Berechnungen werden daher die vom KTBL angesetzten Düngekosten für Phosphor, Kali und Stickstoff von den Rohstoffkosten abgezogen und stattdessen die Ausbringungskosten der Gärreste hinzugerechnet. Daraus ergeben sich Rohstoffkosten bei Rücknahme des Gärrestes (vgl. Tabelle 2). Schließlich werden noch der seitens des KTBL angesetzte Bodenrentenanteil von 163 Euro und die in den Rohstoffkosten enthaltenen Transportkosten der jeweiligen Rohstoffe herausgerechnet. In Tabelle 3 ist die Umrechnung der Rohstoffkosten für die vorzüglichsten nachwachsenden Rohstoffe dargestellt. Das sind jene nachwachsenden Rohstoffe mit den höchsten Energieerträgen je Euro Rohstoffkosten. Die nachwachsenden Rohstoffe mit einem sehr ungünstigen Verhältnis aus Kosten und Energieerträgen wurden an dieser Stelle aus den weiteren Berechnungen herausgehalten.

Zu beachten ist, dass die so berechneten Rohstoffkosten keine Opportunitätskosten z. B. durch die Verwendung der Fläche für die Nahrungsmittelproduktion berücksichtigen. Dies ist auf die Annahme des isolierten Staats im Thünen-Modell zurückzuführen, in dem keine weiteren Absatzwege berücksichtigt werden. Die Bedeutung dieser Annahme für die Berechnungen und die Ergebnisse wird im Abschnitt 5 diskutiert.

Tabelle 2. Naturalerträge, Rohstoffkosten und Energieerträge

Rohstoff	Naturalertrag [t FM/ha]	Rohstoffkosten [€/ha]	Rohstoffkosten [€/t FM]	Biogasertrag [Nm ³ /t FM]	Methangehalt [Vol.-%]	Energieertrag [kWh/t FM]
Maissilage 35% TM	44	1 856	42,19	202	52	1047,2
Corn-Cob-Mix ¹	12,74	1 271	99,77	390	53	2 061
Zuckerhirse	60	1 882	31,37	108	54	581
Topinamburkrautsilage	42,8	1 795	41,93	143	54	769,9
Sudangrassilage	48,9	2 194	44,86	128	55	701,9
Winterweizen-GPS	35,2	1 457	41,38	195,5	52	1013,6
Winterweizenkorn	7,98	1 121	140,48	597	53	3154,6
Winterroggen-GPS	22	1 156	52,56	195,5	52	1013,6
Triticale-GPS	35,2	1 463	41,57	195,5	52	1013,6
Futtermühen (Gehaltsrübe 18 %)	100	2 798	27,98	111	51	564,4
Dauergrünland	25,1	1 683	67,06	172	54	926,0
Ackergras- und Leguminosengemenge	31,4	1 823	58,06	172	54	926,0

¹ besteht aus den Körnern und einem Großteil der Spindel der Maispflanze

Die Naturalerträge (t FM/ha) sind als Frischmasse angegeben, „bezogen auf die Mengen und Trockenmassegehalte der ausgelagerten Produkte“ (KTBL, 2007: 14). Lagerungsverluste sind daher in den Naturalerträgen berücksichtigt. Die unterstellten 44 t Maissilage entsprechen z.B. 50 t Frischmasse auf dem Feld, abzüglich 12 % Silierverlusten.

Quelle: KTBL (2007), eigene Darstellung

Tabelle 3. Rohstoffkostenumrechnung

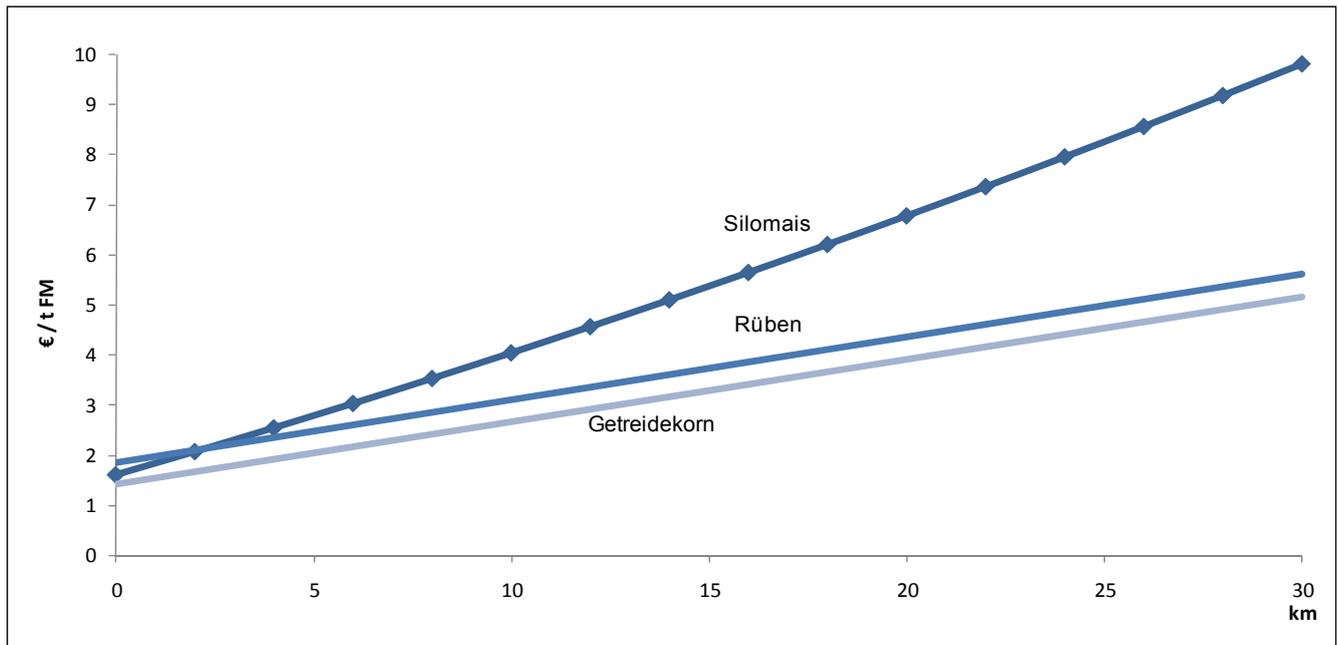
Substrat	Rohstoffkosten nach KTBL [€/ha]	Düngerkosten nach KTBL [€/ha]	Gärrest Ausbringungskosten ¹ [€/ha]	Rohstoffkosten bei Gärrest-rücknahme [€/ha]	Rohstoffkosten bei Gärrest-rücknahme [€/t FM]
Maissilage 35 % TM	1 856	325	142	1 673	38,02
Winterweizen-GPS	1 457	257	115	1 315	37,35
Triticale-GPS	1 463	257	115	1 321	37,54
Winterweizenkorn	1 121	208	10	922	115,57
Corn-Cob-Mix	1 271	168	29	1 132	88,84
Futtermühen	2 798	304	368	2 863	28,63
Substrat	Rohstoffkosten bei Gärrest-rücknahme [€/t FM]	Bodenrenten-anteil [€/ha]	Transportkosten [€/ha]	Rohstoffkosten ohne Bodenrenten-anteil und TK [€/ha]	Rohstoffkosten ohne Bodenrenten-anteil und TK [€/t FM]
Maissilage 35% TM	1 673	163	92	1 418	32,24
Winterweizen-GPS	1 315	163	73	1 078	30,63
Triticale-GPS	1 321	163	73	1 085	30,82
Winterweizenkorn	922	163	13	746	93,47
Corn-Cob-Mix	1 132	163	21	948	74,38
Futtermühen	2 863	163	210	2 490	24,90

¹ unterstellte Ausbringungskosten durchschnittlich 4,25 Euro je Tonne Gärrest

Die Ausbringungskosten der Gärreste sind nicht entfernungsabhängig. In der Modellkalkulation ist angenommen, dass nicht auf 100% der vorhandenen Landwirtschaftsfläche nachwachsende Rohstoffe angebaut werden. Gärreste können somit auch im Umfeld der Biogasanlage ausgebracht werden, wenn ein Teil der Rohstoffe aus weiter entfernten Standorten stammt.

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 2. Transportkosten je Tonne Frischmasse



Quelle: KTBL (2007), eigene Darstellung

3.3 Transportkosten der nachwachsenden Rohstoffe

Die Transportkosten der nachwachsenden Rohstoffe sind in Abbildung 2 dargestellt und in die Gruppen Getreidekorn, Rüben und Silomais eingeteilt. Für Getreide-GPS werden aufgrund der gleichen Transportlogistik und ähnlicher Raumgewichte die Transportkosten von Silomais angesetzt. Für Corn-Cob-Mix werden die Kosten des Getreidekorntransportes unterstellt.

Wie Abbildung 2 zeigt, lassen sich Getreidekörner am günstigsten transportieren, dann folgen Rüben. Silomais und andere Ganzpflanzensilagen verursachen die höchsten Transportkosten je Tonne Frischmasse und Kilometer. Zum einen sind die Schüttgewichte des Erntegutes deutlich geringer als jene von Getreidekörnern und Rüben, zum anderen ist die Transportlogistik anspruchsvoller. Ausschlaggebend hierfür ist, dass der Transport des Erntegutes direkt mit Ernte und Einlagerung verbunden ist. Das Beladen des Transportfahrzeuges durch den Häcksler sowie Transport, Abladen, Verteilen und Verdichten des Grün-gutes sind hier als logistische Kette zu sehen (vgl. HENRICHSMEYER, 1998: 57). Da der Häcksler in dieser Kette das teuerste Glied ist, werden alle übrigen Teilvorgänge auf die Häckslerleistung abgestimmt. Dementsprechend steigt die Anzahl der benötigten Transporteinheiten mit der Transportentfernung an.

Es kann argumentiert werden, dass bei größeren Verfahren eine Orientierung der Silomaisernte an der Zuckerrübenenernte sinnvoll ist. Bei dieser sind der Feld- und Straßentransport voneinander getrennt. Das KTBL rät in diesem Zusammenhang, den Einsatz von LKW mit höheren Motorleistungen (über 200 kW), Fahrgeschwindigkeiten (bis 80 km/h) und Ladevolumina (100 m³) in Erwägung zu ziehen (vgl. KTBL, 2007: 332). BERNHARDT, KEICHER und ENGELHARDT kommen beim Vergleich mehrerer Maistransportverfahren zu dem Schluss, dass Silomais bis zu einer Entfernung von 6 km mit Häckselguttransportwagen transportiert werden sollte. Bei Entfernungen darüber hinaus sei ein System, bei dem der Silomais mittels einer Überladestation am Feldrand auf LKW übergeladen wird, die nachhaltigste Lösung. Es habe klare Vorteile bei der Auslastung der Maschinen, der Anzahl an Arbeitern und der Verfahrenskosten (vgl. BERNHARDT, KEICHER und ENGELHARDT, 2007). In diesem Fall würden die Transportkostenfunktionen für Mais und Rüben Sprungstellen ausweisen, ab derer sich die Steigung der linearen Funktionsabschnitte verringern würde. Dies macht beide Rohstoffe tendenziell auch auf weitere Entfernungen wettbewerbsfähiger. Allerdings ist nicht damit zu rechnen, dass die Transportkosten für Mais und Rüben an irgendeiner Stelle unter die Transportkosten für Winterweizen fallen könnten.

3.4 Berechnung der Lagerenten

Anhand des angepassten Thünen-Modells lassen sich die Lagerenten der nachwachsenden Rohstoffe berechnen:

Die maximale Zahlungsbereitschaft für einen nachwachsenden Rohstoff (siehe Tab. 1) abzüglich der Rohstoffkosten, aus denen der Bodenrentenanteil und die Transportkosten herausgerechnet wurden (siehe Tab. 3), ergibt den erzielbaren Deckungsbeitrag je Tonne Rohstoff unter Abwesenheit von Transportkosten. Multipliziert man diesen mit dem Naturalertrag je Flächeneinheit (siehe Tab. 2), erhält man den erzielbaren Deckungsbeitrag je Flächeneinheit unter Abwesenheit von Transportkosten. Werden hiervon die entfernungsabhängigen Transportkosten für den Naturalertrag je Flächeneinheit (siehe Abb. 2) abgezogen, so ergibt sich der in Abhängigkeit zur Transportentfernung erzielbare Deckungsbeitrag je Flächeneinheit. Dieser stellt bei der hier verwendeten Modellkalkulation die Lagerente da, die sich aus dem Vorhandensein einer Biogasanlage in Abhängigkeit von deren Charakteristika ergibt.

4. Ergebnisse

Für eine 500-kW-Biogasanlage mit 50 % Wärmenutzung stellt Abbildung 3 die Lagerenten dar. Wie erwartet kann mit Silomais im Umfeld der Anlage die höchste Lagerente erzielt werden. Ab einer Transportentfernung von 24 km lässt sich dann mit Winterweizenkorn eine höhere Lagerente erreichen. Daraus

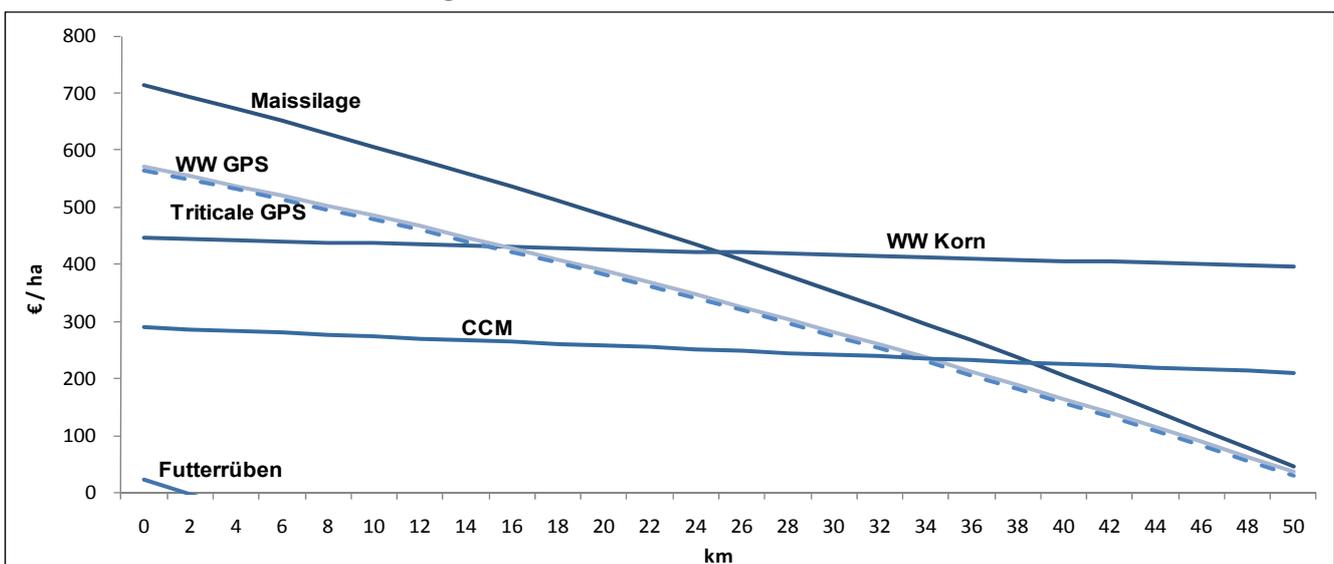
ergibt sich ein Thünenscher Ring mit einem Radius von 24 km mit Maisanbau um die Biogasanlage, gefolgt von einem Ring, in dem Winterweizenkorn der günstigere nachwachsende Rohstoff ist. Die 24 km beziehen sich auf den Transportweg. Daher wird die räumliche Ausdehnung des Gebietes, in dem Silomais der Vorzug vor Winterweizenkorn gegeben werden sollte, geringer ausfallen, da die Luftdistanz je nach Infrastruktur stets kürzer ausfallen wird als der tatsächliche Transportweg.

Die Ergebnisse für die anderen betrachteten Anlagenkonzepte mit mehr und weniger Wärmenutzung, sowie einer Anlage mit Gaseinspeisung belegen ebenfalls eine klare Dominanz des Maisanbaus. Beim Vergleich der Lagerenten fällt hierbei auf, dass sich bei zunehmender Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion der Thünensche Ring mit Silomaisanbau vergrößert: In Abhängigkeit des Deckungsbeitrages je Tonne Rohstoff verändert sich der Schnittpunkt der Lagerentenfunktion mit der Ordinate. Die Steigung der Lagerente bleibt davon unbeeinflusst. Ausschlaggebend für die Steigung sind ausschließlich die Transportkosten je Flächeneinheit (siehe erste Ableitung nach k):

$$R_k = yf$$

Mit der wirtschaftlichen Effizienz verschieben sich die Lagerentenfunktionen demnach parallel zur Abszisse. Dabei verschieben sich Rohstoffe mit hohen Energieerträgen je Hektar (z.B. Silomais) stärker als Rohstoffe mit geringen Energieerträgen (z.B. Winterweizenkorn).

Abbildung 3. Lagerenten der nachwachsenden Rohstoffe für eine 500-kW-Biogasanlage mit 50% Wärmenutzung



Quelle: eigene Darstellung

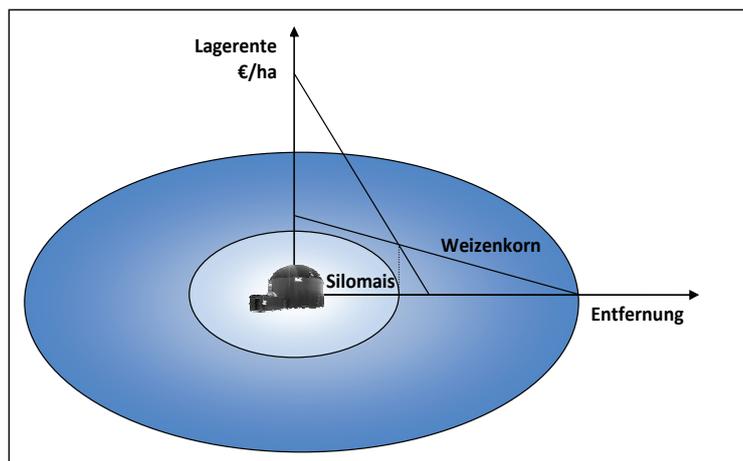
Alle betrachteten Anlagenvarianten haben gemeinsam, dass Silomais auch über mittlere Transportstrecken seine Vorteilhaftigkeit behält. Silomais erzielt – von dem Szenario mit kaum Wärmenutzung abgesehen – auch bei Transportentfernungen von 24 km, teilweise sogar über 30 km (bei der 500-kW-Anlage mit 75 % Wärmenutzung und der Anlage mit Gaseinspeisung) die höchsten Lagerernten. Bei Transportentfernungen, die darüber hinausgehen, ist Winterweizenkorn der vorteilhafteste nachwachsende Rohstoff.

Schränken pflanzenbauliche Restriktionen den Silomaisanteil an der Fruchtfolge ein, so ist Getreide-Ganzpflanzensilage im Umfeld der Biogasanlagen die günstigste Alternative zum Maisanbau: Wie in Abbildung 3 dargestellt, ist die Lagerrente von Winterweizen-GPS im direkten Umfeld der 500-kW-Anlage (50 % Wärmenutzung) höher als die Lagerrente von Silomais in 14 km Transportentfernung. Kann der Rohstoffbedarf einer solchen Anlage aufgrund sehr ungünstiger Standortbedingungen nicht innerhalb eines Transportradius von 14 km gedeckt werden, so sollte der Anbau von Winterweizen-GPS auf den verbleibenden Flächen im direkten Umfeld der Anlage in Erwägung gezogen werden.

Die anderen betrachteten nachwachsenden Rohstoffe stellen unter den zu Grunde gelegten Annahmen keine günstige Alternative als Rohstoff für Biogasanlagen dar. Damit ergibt sich die in Abbildung 4 noch einmal verdeutlichte räumliche Struktur des Rohstoffanbaus mit Silomais im Umfeld der Biogasanlage, gefolgt von Winterweizenkorn

Aufbauend auf den ermittelten Thünenschen Ringen kann der Einfluss der Anlagengröße auf die Rohstoffwahl ermittelt werden. Hierfür wird zunächst die Größe des Beschaffungsgebietes der Rohstoffe berechnet. Dieses ergibt sich neben der Anlagengröße aus den Mengen- und Energieerträgen der Rohstoffe sowie dem Anteil der Energiepflanzen an der Gesamtfläche. Der Energiepflanzenanteil an der Gesamtfläche ergibt sich wiederum aus dem Anteil der Landwirtschaftsfläche, dem Ackerflächenanteil an dieser sowie dem möglichen Fruchtfolgeanteil der Energiepflanze. Für beispielsweise Silomais beträgt die maximale Anbaukonzentration im Sinne der integrierten Pflanzenproduktion bei günstigen Standortbedingungen 40 %, bei ungünstigen 25 % (vgl. LWK NRW: 1). In Anlehnung an Daten zur Landwirtschafts- und Ackerfläche (vgl. I.M.A., 2005: 9ff.) ist in Tabelle 4

Abbildung 4. Thünensche Ringe der Biogaserzeugung



Quelle: eigene Darstellung

der mögliche Energiemaisanteil an der Gesamtfläche je nach Standortbedingungen dargestellt.

Bei einem unterstellten Naturalertrag von 44 Tonnen Maissilage Frischmasse¹ je Hektar und einem unterstellten Energieertrag von 1 047,2 Kilowattstunden je Tonne Maissilage (vgl. KTBL, 2007) ergeben sich die in Tabelle 5 dargestellten installierbaren elektrischen Leistungen. Dabei ist für die installierbaren Biogasanlagen ein elektrischer Gesamtwirkungsgrad von 35 % angesetzt und die ausschließliche Vergärung von Silomais unterstellt.

Um nun zu überprüfen, bis zu welcher Anlagengröße Maissilage als Rohstoff optimal ist, wird der Beschaffungsradius der Rohstoffe mit den ermittelten Lagerrenten verglichen. Hierfür werden zunächst zwei Fälle unterschieden. Im ersten Fall ist der Fruchtfolgeanteil des Silomais der begrenzende Faktor für die verfüg-

Tabelle 4. Möglicher Energiemaisanteil an der Gesamtfläche

Standort für Biogasversorgung	ungünstig	durchschnittlich	gut
Anteil Landwirtschaftsfläche an der Gesamtfläche	45 %	53 %	80 %
Anteil Ackerfläche an der Landwirtschaftsfläche	50 %	75 %	80 %
Möglicher Fruchtfolgeanteil Energiemais an der Ackerfläche	25 %	40 %	40 %
Anteil Energiemais an Gesamtfläche	5,6 %	16,0 %	25,6 %

Quelle: eigene Darstellung

¹ 50 Tonnen Feldertrag unter Berücksichtigung von 12 % Siliverlusten

Tabelle 5. Installierbare elektrische Leistung bei Vergärung von Silomais in Kilowatt

Beschaffungsradius	Energiemaisanteil an der Gesamtfläche				
	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %
5 km	723	1 446	2 169	2 892	3 615
10 km	2 892	5 784	8 675	11 567	14 459
15 km	6 507	13 013	19 520	26 026	32 533
20 km	11 567	23 134	34 701	46 269	57 836
30 km	26 026	52 052	78 078	104 104	130 130

Quelle: eigene Darstellung

bare Energiemaisfläche. Im zweiten Fall ist die Energiepflanzenfläche der begrenzende Faktor, bevor etwaige Fruchtfolgerestriktionen greifen. Begrenzt der Fruchtfolgeanteil des Silomais die Energiemaisfläche, verbleibt noch Ackerfläche, die z. B. durch Getreideanbau für die Versorgung einer Biogasanlage genutzt werden kann. In diesem Fall sind Konstellationen denkbar, in denen innerhalb eines bestimmten Radius um eine Anlage verschiedene nachwachsende Rohstoffe angebaut werden. Wie in Abschnitt 3 beschrieben, ist die Lagerente von Silomais in einer Transportentfernung von 14 Kilometern erstmals niedriger als die Lagerente von Winterweizen GPS im direkten Umfeld der Anlage. Steht Ackerfläche zusätzlich zur bereits voll ausgenutzten Energiemaisfläche für den Rohstoffanbau zur Verfügung, so lohnt es sich, Winterweizen-GPS im direkten Umfeld der Anlage zusätzlich zum Silomais anzubauen, wenn dadurch Silomais aus Transportentfernungen von 14 Kilometern und mehr eingespart werden kann. Im Gegenschluss heißt das: Bis Transportentfernungen von 14 Kilometern notwendig werden, sollte ausschließlich Silomais als Rohstoff angebaut werden. Bei einem unterstellten Fahrwegzuschlag entlang des Wegenetzes vom Faktor 1,4 entspricht ein maximaler Transportweg von 14 Kilometern einem Beschaffungsradius von 10 Kilometern. Wie in Tabelle 5 dargestellt, können selbst bei ungünstigen Standortbedingungen (5,6 % Energiemaisanteil an der Gesamtfläche) Biogasanlagen mit mehr als 2,89 Megawatt installierter elektrischer Leistung ausschließlich auf Silomais zurückgreifen. Bei durchschnittlichen und guten Standortbedingungen können sogar Anlagen mit etwa 8,6 bzw. 14 Megawatt elektrischer Leistung lediglich durch Silomais versorgt werden. Zum Vergleich: Die durchschnittliche elektrische Leistung neu errichteter Biogasanlagen betrug 2005 600 Kilowatt (vgl. KALTSCHMITT und SCHOLWIN, 2007: 50).

Betrachtet man den Fall, dass die Energiepflanzenfläche den begrenzenden Faktor darstellt, bevor etwaige Fruchtfolgerestriktionen greifen, wird inner-

halb eines Radius um die Anlage immer nur der nachwachsende Rohstoff für die Biogasproduktion angebaut, der die höchste Lagerente erzielt. In diesem Fall wird keine Getreide-Ganzpflanzensilage produziert, da sie vom Silomais dominiert wird. Daher kann der Thünensche Ring mit Silomaisanbau mit dem Beschaffungsradius der Rohstoffe verglichen werden. In diesem Fall ergeben sich noch deutlich größere installierbare Anlagen, die ausschließlich auf Silomais zurückgreifen.

5. Diskussion

Das zentrale Element im hier verwendeten Modell ist wie im Modell VON THÜNENS die Lagerente. Sie bestimmt, welcher nachwachsende Rohstoff an welchem Standort produziert wird. Hierfür ist lediglich die Annahme Gewinn maximierenden Verhaltens aller Beteiligten erforderlich. Es ist dabei unerheblich, ob der Anlagenbetreiber die Flächen um die Biogasanlage selber zu den angesetzten Rohstoffkosten bewirtschaftet oder die Rohstoffe zu diesen Kosten zukauf. Es ist stets der Rohstoff optimal, welcher die höchste Lagerente erzielt. Wer die Lagerente, die sich aus dem Vorhandensein der Biogasanlage ergibt, in welcher Höhe abschöpft, kann dabei nicht ohne weiteres beantwortet werden. Dies hängt im Wesentlichen vom Verhandlungsgeschick und vor allem der Verhandlungsposition der Beteiligten ab.

Viele andere getätigten Annahmen vereinfachen die Darstellung des Modells, sind jedoch nicht unverzichtbar. Liegen zum Beispiel unterschiedliche Bodenqualitäten im Umkreis einer Anlage vor, so lässt sich für jeden dieser Standorte wiederum eine Lagerente berechnen, und es wird wieder das Produkt mit der höchsten Lagerente angebaut (vgl. MAIER und TÖDTLING, 2001: 133). Oder wird auf die Annahme gleichförmiger Verkehrsverbindungen um die Anlage verzichtet, so wird an Stelle der Luftdistanz die Entfernung entlang des Wegenetzes betrachtet. Dann

ergeben sich allerdings keine ringförmigen Anbaubiete mehr (vgl. MAIER und TÖDTLING, 2001: 133).

Die Fehler, die bei größeren Entfernungen durch die Annahme linearer Transportkostenfunktionen gemacht werden, wirken tendenziell negativ auf den Einsatz von Silomais. Die Transportkostennachteile von Silomais gegenüber anderen nachwachsenden Rohstoffen würden sich etwa durch den Einsatz der andiskutierten Überladestation verringern. Die Vorzüglichkeit von Silomais gegenüber anderen nachwachsenden Rohstoffen würde sich dadurch also bei größeren Entfernungen verbessern. Tendenzuell könnte sich auch so die Vorzüglichkeit von Getreide-GPS verbessern. Da diese jedoch nur bei niedrigen Entfernungen und auf durch Mais nicht ausgenutzten Flächen zum Zuge kommt, dürfte eine eventuelle Nicht-Linearität der Transportkosten hier in der Praxis nicht zum Tragen kommen.

Anderes als im Thünen-Modell handelt es sich bei der Anlage und ihrem landwirtschaftlich genutzten Umfeld nicht um einen „isolierten Staat“, in dem es nur ein Nachfragezentrum gibt. Alternative Nutzungsmöglichkeiten der Flächen erhöhen im Modell als Flächennutzungskosten die Rohstoffkosten, verringern damit die Lagerenten und verkleinern somit die Thünenschen Ringe mit Rohstoffanbau.

Legt man der Modellkalkulation z.B. einen Weizenpreis von 200 Euro je Tonne zu Grunde, so ergibt sich ceteris paribus gar keine positive Lagerente mehr für Weizen als Rohstoff für Biogasanlagen. Der Thünensche Ring mit Weizen für Biogasanlagen verschwindet somit gänzlich. Im Zuge der hohen Preissteigerungen für Getreide in 2006 und 2007 konnte diese Anpassungsreaktion bei vielen Biogasanlagen beobachtet werden.

Auch der Ring mit Silomaisanbau für Biogasproduktion verkleinert sich bei steigenden Getreidepreisen, da die Fläche ebenfalls für die Nahrungsmittelproduktion verwendet werden kann. Aufgrund der hohen Energieerträge je Flächeneinheit reagiert Silomais jedoch nicht so stark auf Getreidepreisänderungen wie nachwachsende Rohstoffe mit geringen Energieerträgen je Flächeneinheit. Die relative Vorzüglichkeit des Silomais gegenüber anderen nachwachsenden Rohstoffen nimmt durch Preisanstiege bei Agrarrohstoffen folglich noch weiter zu, während die maximale Entfernung, bis zu der Silomais gewinnbringend an die Anlage verkauft werden kann, abnimmt. Das heißt, dass bei hohen Getreidepreisen zwar die Rentabilität der Anlage insgesamt in Frage gestellt werden könnte, nicht jedoch die relative Vorzüglichkeit der Beschickung mit Silomais. Grundsätz-

liche Aussagen darüber, ab welchem Getreidepreis kein Energiemais mehr angeboten werden wird, sind jedoch nicht möglich, da sich die Zahlungsbereitschaften der Anlagen unterscheiden und zudem durch die Vergütung über das EEG bestimmt werden.

Wird eine Vergütung gemäß des ab 2009 geltenden novellierten EEG unterstellt, so profitiert der Silomais hiervon. Das neue EEG sieht höhere Vergütungssätze für den Einsatz nachwachsender Rohstoffe vor, was ceteris paribus die Wirtschaftlichkeit der Anlage erhöht. Wie schon in Abschnitt 4 beschrieben, steigt dadurch die relative Vorzüglichkeit der Beschickung mit Silomais. Denn die Lagerente von Silomais verschiebt sich wegen der höheren Energieerträge je Hektar stärker als z.B. die von Winterweizenkorn. Auch der mit dem neuen EEG eingeführte „Güllebonus“ ändert nichts an der Dominanz des Silomais. Er führt dazu, dass Wirtschaftsdünger als Ergänzung zu nachwachsenden Rohstoffen interessanter werden und kommt vor allem kleineren Biogasanlagen zu Gute.

Bei der Berechnung der möglichen Anlagengrößen, die ausschließlich durch Silomais versorgt werden sollten, wurde die Lagerente der 500-kW-Anlage mit 50 % Wärmenutzung zugrunde gelegt. Damit wurde an dieser Stelle größeren Anlagen stillschweigend die gleiche Wirtschaftlichkeit der Energiegewinnung unterstellt. In der Praxis ist für größere Anlagen jedoch durch Skaleneffekte eine bessere Wirtschaftlichkeit beim Anlagenbetrieb zu erwarten. Positive Skaleneffekte vergrößern den Thünenschen Ring mit Silomaisanbau, da sich der Deckungsbeitrag je Tonne bei nachwachsenden Rohstoffen mit hohen Energieerträgen je Hektar stärker erhöht als bei solchen mit geringen Energieerträgen je Hektar. Dieser Umstand führt dazu, dass tendenziell noch größere Anlagen ausschließlich mit Silomais betrieben werden würden - ein Trend, der durch die in Abschnitt 3.3 genannten möglichen Fortschritte bei der Transportlogistik von Silomais noch verstärkt werden könnte.

6. Schlussfolgerungen

Die mit dem angepassten Thünen-Modell ermittelten Ergebnisse bestätigen die klare Dominanz des Silomais unter den nachwachsenden Rohstoffen, die auch durch dessen, aus der geringen Energiedichte resultierender Transportunwürdigkeit kaum gebremst wird. Zwar senken steigende Rohstoffpreise ceteris paribus die Rentabilität von Biogasanlagen, doch erhöht sich der Vorteil des Silomais gegenüber z.B.

Getreide aufgrund der höheren Erträge je Flächeneinheit sogar.

Schränken pflanzenbauliche Restriktionen den Silomaisanteil an der Fruchtfolge ein, so ist Getreide-Ganzpflanzensilage im Umfeld von Biogasanlagen die günstigste Alternative unter den nachwachsenden Rohstoffen. Müssen nachwachsende Rohstoffe aus weiter entfernten Standorten beschafft werden, bietet sich Winterweizenkorn an.

Die Berechnungen zeigen, dass auch die Beschaffungsgebiete für erheblich größere Biogasanlagen als zum heutigen Stand der Technik möglich, noch im Thünenschen Ring mit Silomaisanbau liegen. Silomais bleibt damit auch für größere Biogasanlagen der ökonomisch vorzüglichste Rohstoff. Die Förderung von Biogaserzeugung durch nachwachsende Rohstoffe ist damit auch weiterhin gleichbedeutend mit einer Subventionierung des Maisanbaus.

Literatur

- BERNHARDT, H., R. KEICHER and D. ENGELHARDT (2007): Analysis of the problems in logistic for biogas plants in Germany. Vortrag im Rahmen von: Advances in labour and machinery management for a profitable agriculture and forestry. 17.-19. September 2007, Slovak University of Agriculture, Nitra, Slovakia.
- BRANDES, W. und E. WOERMANN (1971): Landwirtschaftliche Betriebslehre Band 2: spezieller Teil. Paul Parey Verlag, Göttingen: 62.
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) & FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE (2001): Schlüsseltechnologie Regenerative Energien. Teilbericht im Rahmen des HGF-Projektes „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland“. Stuttgart, Karlsruhe.
- DUNN, E.S. JR. (1954): The Equilibrium of Land-Use Patterns in Agriculture. In: Southern Economic Journal 21 (2).
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR) (2007): Studie Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz. 3. Auflage. Gülzow: 94.
- GRUBER, W. (2006): Auf die Transportkosten achten! In: DMK (Deutsches Maiskomitee) (Hrsg.): Mais. Erfolgreich Biogas erzeugen. Bonn.
- HENRICHSMEYER, F. (1998): Leistungsfähige Verfahren zur Halmguternte in Großbetrieben. Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik, Kiel: 57.
- I.M.A. (Information.medien.agrar e.V.) (2005): Landwirtschaft in Deutschland. URL: http://www.ima-agrar.de/Dateien/Agraratlas_Web_neu.pdf: 9ff. Bonn. Stand: 01/08.
- KALTSCHMITT, M. und F. SCHOLWIN (2007): Biogas als Energieträger – Stand und Perspektiven vor dem Hintergrund der gesetzlichen Rahmenbedingungen. In: Biogas im Wandel. 16. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., 31.01.-22.07.2007, Leipzig: 50
- (2001): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (2007): Energiepflanzen. 13. Auflage, Darmstadt
- LWK NRW (Landwirtschaftskammer NRW): Maximale Anbaukonzentration von Feldfruchtarten bzw. -gruppen, nach Zielen der integrierten Pflanzenproduktion in %. URL: <http://www.landwirtschaftskammer.de>, Stand: 1/08.
- LANKOSKI, J. and M. OLLIKANEN (2006): Bioenergy crop production and climate policies: A von Thunen model and case of reed canary grass in Finland. Helsinki.
- MAIER, G. und F. TÖDTLING (2001): Regional- und Stadtökonomik 1- Standorttheorie und Raumstruktur. 3. Auflage. Springer-Verlag Wien: 127-133.
- SCHULZE STEINMANN, M. (2008): Logistik für Biogaserzeugung – Eine wirtschaftliche Optimierung der Rohstoffversorgung von Biogasanlagen auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen und Wirtschaftsdüngern in Deutschland. Diplomarbeit am Institut für Lebensmittel- und Ressourcenökonomik. Universität Bonn: 30-46.
- STEINHAUSER, H., C. LANGBEHN und U. PETERS (1992): Einführung in die landwirtschaftliche Betriebslehre – Allgemeiner Teil. 5. Auflage. Ulmer, Stuttgart: 33-35.
- THÜNEN, J.H. VON (1826): Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie. Erster Teil. Parthes, Hamburg.

Danksagung

Wir danken den anonymen Gutachtern für wertvolle Hinweise zur Darlegung und Einordnung unseres Vorgehens.

Kontaktautorin:

PROF. DR. KARIN HOLM-MÜLLER

Ressourcen- und Umweltökonomik

Institut für Lebensmittel- und Ressourcenökonomik (ILR)

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität

Nussallee 21, 53115 Bonn

E-Mail: umwelt@uni-bonn.de