

Exposé zukunftsweisender Einkommensoptionen für Biogasanlagenbetreiber

Faserstoffgewinnung zur stofflichen Nutzung aus Gärresten



© C. Heitmann | BENAS Power Group

Dr. Verena Wilken, Landwirtschaftskammer Niedersachsen |
Benedikt Hülsemann, Universität Hohenheim

Erstellt: September 2021

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Projektes „Biogas Progressiv: Zukunftsweisende Strategien für landwirtschaftliche Biogasanlagen“ (ProBiogas), finanziert mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) aus dem Sondervermögen Energie- und Klimafond (FKZ: 22405416; 22407617; 22408117).

Einleitung

Für zahlreiche Biogasanlagenbetreiber stellt sich mit Ablauf der 1. EEG-Förderperiode nach 20 Jahren die Frage, wie ihre Anlage weiterhin rentabel regenerative Energie produzieren kann. Die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2021) vorgesehene Verlängerung der Vergütung über die Ausschreibungen für Biomasseanlagen bietet grundsätzlich die Möglichkeit eines Weiterbetriebs, allerdings sind dafür technisch sowie ökonomisch optimierte Anlagenkonzepte notwendig.

Mit dem Projekt „Biogas Progressiv – zukunftsweisende Strategien für landwirtschaftliche Biogasanlagen“ (ProBiogas) verfolgen die Projektpartner das Ziel, praxistaugliche Verfahrensoptionen für den Weiterbetrieb von Biogasanlagen zu evaluieren. Alle potenziellen Nutzungsoptionen, die im Projekt nicht techno-ökonomisch detailliert dargestellt werden konnten, werden in Form einer Konzeptbeschreibung vorgestellt.

Bei den hier beschriebenen Verfahrensoptionen handelt es sich um Konzepte, die derzeit zum Beispiel nur über einen eingeschränkten Absatzmarkt verfügen, sich noch in der Entwicklung befinden, nicht die Marktreife erlangt haben oder nur unter sehr speziellen Bedingungen realisiert werden können. Sie alle eint jedoch, dass sie in Zukunft eine mögliche Einkommensquelle für landwirtschaftliche Biogasanlagen darstellen können.

Vorliegendes Exposé soll als fundierte Entscheidungshilfe dienen, ob sich mit der Gewinnung und der Vermarktung von Fasern aus Gärresten für den Biogasbetrieb eine Erlössituation realisieren lässt.

1. Allgemeine Beschreibung

Die Nutzung der Gärprodukte aus Biogasanlagen zielt in den meisten Fällen auf die Verwertung der enthaltenen Pflanzennährstoffe ab (Wilken et al. 2019). Es können darüber hinaus aber auch andere wertgebende Inhaltsstoffe genutzt werden. Je nach verwendeten Substraten und Beschaffenheit des Gärproduktes bietet sich z. B. die Nutzung der enthaltenen Faserstoffe an.

Die extrahierten Faserstoffe können für verschiedene Zwecke genutzt werden. Bisher gibt es pflanzenbauliche Ansätze z. B. zur Nutzung als Torfersatz in Gartenerden (Rigby und Smith 2011), als stoffliche Verwertungswege wie z. B. zur Substitution von Holzfasern bei der Herstellung von Spanplatten sowie von HDF- und MDF-Platten (high-density bzw. medium-density fiberboards) (Winandy und Cai 2008, Essel et al. 2015), zur Verwertung in der Papier- und Zellstoffindustrie (Heitmann 2020) oder als Ausgangsmaterial für Verbundwerkstoffe (Folke Andersen und Kaltschmitt 2018, Lütz und Helle 2019). Denkbar wäre auch der Einsatz als Dämmmaterial oder als Einstreumaterial (Winandy und Cai 2008).

In diesem Steckbrief werden ausschließlich die stofflichen Verwertungswege behandelt, die Nutzung der festen und faserreichen Anteile der Gärprodukte als Substrat für den Pflanzenbau werden nicht betrachtet.



Fasergewinnung

Voraussetzung für eine stoffliche Nutzung der in den Gärprodukten enthaltenen Fasern ist ein hoher Anteil an Lignocellulose. Pflanzenfasern können aus Hemicellulose, Cellulose und Lignin bestehen. Lignocellulose bezeichnet die Gerüstsubstanz verholzter Pflanzen. In ein Gerüst aus Hemicellulose und Cellulose einer jungen Pflanze wird im Laufe der Zeit durch den Verholungsprozess (Lignifizierung) Lignin eingelagert, welches dem Gerüst eine hohe Stabilität verleiht. Das Geflecht ist durch die hohe Dichte für Mikroorganismen und Pilze schlecht angreifbar und im anaeroben Prozess, wie es der Biogasprozess ist, nicht abbaubar (Schimpf 2014). Voraussetzung für die Herstellung von faserreichen Gärprodukten ist der Einsatz faserreicher Substrate, wie z. B. Stroh, Gras, ein- und mehrjährige Pflanzen oder auch Stallmist. Diese Substrate werden vielfach in landwirtschaftlichen Biogasanlagen verwendet.

Ein Vorteil von Fasern, die einen Fermentationsprozess durchlaufen haben, gegenüber der Verwendung von unvergorenen Pflanzen, wie Stroh und Gras, als Fasermaterial ist, dass leicht abbaubare Faseranteile abgebaut sind und sich die Faserzusammensetzung mit zunehmender Verweildauer des Substrats im Fermentationsprozess der von Holz annähert. Zudem werden störende Wachsschichten im Biogasprozess abgebaut (Spindler et al. 2009).

Die Extraktion/Gewinnung einer faserstoffreichen Fraktion aus den lignocellulosehaltigen Gärprodukten erfolgt über eine Fest-Flüssig-Trennung. Je nach geforderter Reinheit der Fasern kann vorher eine Ammoniakstrippung stattfinden, um durch die Stickstoffentfernung eine Geruchsneutralität zu erreichen (siehe Kapitel 3).

Faserverwertung

Die Möglichkeiten der Verwertung der Fasern sind vielfältig. Wird auf die Ammoniakstrippung verzichtet, sind die Weiterverwertungsmöglichkeiten eingeschränkt, möglich ist z. B. die Nutzung als Einstreumaterial oder als Torfersatz im Pflanzenbau.

Die einfachste Weiterverwendung der Fasern besteht darin, die feste Phase der separierten Gärprodukte ohne weitere Aufbereitung als **Einstreumaterial** zu verwenden. In einigen Ländern wird dies praktiziert, in Deutschland ist die Nutzung separierter Rindergülle und von Gärprodukten jedoch aufgrund der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EU) Nr. 142/2011 nicht rechtskonform, da die Nutzung von Gülleprodukten als Einstreumaterial darin nicht vorgesehen und damit rechtlich nicht geklärt ist. Zudem bietet dieser Verwertungsweg eine geringe Wertschöpfung (Winandy und Cai 2008).

Eine Alternative dazu bietet die Nutzung der Fasern als **Dämmstoff**. Die Firma Biowert produziert nachwachsende Dämmstoffe aus unfermentierter Grassilage, die unter dem Markennamen „AgriCell“ vermarktet werden. Spindler et al. (2009) nennen in ihrem Patent die Herstellung von Vlies- und Dämmmaterialien als mögliche Verwertungsform für stickstoffbereinigte Fasern. Auch Fenz et al. (2001) geben an, dass feuerhemmendes Brennmaterial unter der Verwendung eines cellulosehaltigen Fasermaterials, welches bei



der Separierung von Rindergülle gewonnen wurde, hergestellt werden kann. Weitere Umsetzungen in der Praxis der Nutzung von Gärrestfasern als Dämmstoff sind jedoch bisher nicht bekannt.

Verschiedene Projekte beschäftigten sich mit der Verwertung der Fasern zur Substitution von Holzspänen zur Herstellung von Holzfaserplatten. Eine amerikanische Studie aus dem Jahr 2008 beschäftigt sich mit der Herstellung von MDF- und Spanplatten mit Anteilen von extrahierten Gärproduktfasern. Der Fokus der Veröffentlichung liegt auf der Herstellung von vermarktungsfähigen Holzfaserplatten. Es konnte gezeigt werden, dass die Eigenschaften der produzierten Holzplatten bis zu einem Anteil von 50 % Gärrestfasern in den meisten Fällen die Vorgaben für vermarktungsfähige Erzeugnisse einhielten (Winandy und Cai 2008).

Auch zwei deutsche Projekte beschäftigten sich mit der Substitution von Holzspänen durch den Einsatz von Gärrestfasern bei der Herstellung von Holzfaserplatten. Das erste Projekt „Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte aus Biogasanlagen für Holzwerkstoffe“ wurde von 2012 bis 2014 durchgeführt und das zweite Projekt „BiogasFaserPlus“ von 2015 bis 2017. In beiden Projekten wurde der Fest-Flüssig-Trennung eine Ammoniakstrippung vorgeschaltet. Hierfür kam das von der Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH (GNS) patentierte Verfahren „ANAStrip®“ zum Einsatz und wurde im Verlauf der beiden Projekte zum „FaserPlus-Verfahren“ weiterentwickelt (Essel et al. 2015). Es wurden verschiedene Zusammensetzungen aus stickstoffangereicherten Lignocellulosefasern und Holzspänen getestet, um Produkte mit ausreichender Qualität für eine Vermarktung herzustellen. Im Ergebnis konnten bei der Herstellung von MDF- und Spanplatten bis zu 20 % der Holzfasern durch Gärproduktfasern ersetzt werden. Mit zunehmendem Anteil verdunkelten sich die hergestellten Holzplatten, was als Vermarktungshindernis gewertet wurde. Der Einsatz als HDF-Platten mit Weiterverarbeitung zu Laminat war aber trotzdem möglich, da hier die Farbe aufgrund der Oberflächenbeschichtung keine Rolle spielt (Bauermeister 2017).

Aus den beiden genannten deutschen Projekten heraus hat das Verfahren der Faserextraktion Marktreife erlangt. Im Februar 2021 ist die Produktionsanlage an einer Biogasanlage in Ottersberg (Landkreis Rotenburg/Wümme) in Betrieb gegangen (Heitmann 2020). Die Fasern sollen aber nicht, wie in den Projekten, für die Holzwerkstoffindustrie extrahiert werden, sondern für die **Zellstoffproduktion**. Pro Jahr sollen vorerst 8.000 t Gärprodukte mit einem TS-Gehalt von 10 bis 12 % verarbeitet werden. Eine Erweiterung der Kapazität bis zu 30.000 t/a ist ohne Umbau möglich. Ein für die Zellstoffproduktion ungeeigneter Anteil an feinen Fasern kann aufgrund des hohen Nährstoffgehalts in Form eines Biogranulats als Unterfußdünger vermarktet/verwendet werden. Die Fasern werden unter dem Markennamen „Magaverde Lignocellulosefasern“ vermarktet. Zusätzlich zur Gärproduktaufbereitungsanlage („FaserPlus“) wird zum jetzigen Zeitpunkt (Januar 2021) am Standort eine Halle/Anlage zur Papierherstellung sowie eine Fasergussanlage errichtet (Heitmann 2020).



Das Projekt „Verwertung von hopfenhaltigen Gärresten als Rohstoff für Faserverbundwerkstoffe als Möbelmaterial“ (Laufzeit Mai 2019 bis Februar 2021) forscht an der **Herstellung eines Verbundwerkstoffs** aus einem biobasierten Epoxidharz zusammen mit Gärprodukten mit einem hohen Anteil an Hopfenreben. Die Faseraufbereitung aus dem Gärprodukt erfolgt über Trocknung, Hygienisierung, Klassierung und Zerkleinerung, wobei verschiedene Zerkleinerungsverfahren getestet werden, z. B. mittels Holländer. Aus den Fasern erfolgt eine Nassvliesherstellung und der Verbundwerkstoff wird dann mittels Vakuuminfusionsverfahren und Handlaminierung hergestellt (Lütz und Helle 2019).

2. Verfahrenstechnische Beschreibung

Die Extraktion/Gewinnung einer faserstoffreichen Fraktion aus Gärprodukten kann mittels unterschiedlicher Aufbereitungsverfahren und in unterschiedlicher Reinheit erfolgen und richtet sich danach, wofür die Fasern anschließend verwendet werden sollen. In einigen Forschungsberichten und Veröffentlichungen ist von der Verwertung der Fasern aus Gärprodukten zu lesen, gemeint ist die feste Phase von Gärprodukten nach einer Fest-Flüssig-Trennung z. B. mittels Pressschneckenseparator. Die Nachteile dieses einfach gehaltenen Verfahrens zur Gewinnung von Fasern aus Gärprodukten ist die starke Geruchsemission des Produktes sowie der hohe Stickstoffgehalt. Bei einer stofflichen Nutzung der so gewonnenen Fasern außerhalb des Pflanzenbaus werden der Stickstoff und andere Pflanzennährstoffe dem Kreislauf entzogen, was in Überschussregionen ein gewollter Effekt sein kann, aber in anderen Regionen ökologisch ebenfalls als negativ zu bewerten ist.

Verlangt das Zielprodukt eine höhere Reinheit der Fasern und eine Geruchsneutralität, so sollten die Gärprodukte vor der Fest-Flüssig-Trennung von mineralischem Stickstoff befreit werden, was durch eine Ammoniakstrippung erreicht werden kann. Nach der Fest-Flüssig-Trennung können die in der festen Phase enthaltenen Fasern dann in einem dritten Schritt für eine Vermarktung/Nutzung ggf. weiter aufgereinigt werden. Optional kann je nach Gärproduktbeschaffenheit und Verfahren vor der Strippung eine Faserzerkleinerung und/oder eine erste grobe Separation erforderlich sein.

Das Grundprinzip der Ammoniakstrippung ist, dass das $\text{NH}_4^-/\text{NH}_3$ -Gleichgewicht der flüssigen Phase von separierter Gülle/separierten Gärprodukten in einem ersten Schritt durch die Anhebung der Temperatur oder die Erzeugung eines Unterdrucks sowie einer pH-Wert-Anhebung durch Zugabe von Lauge zugunsten des gasförmigen Ammoniaks verschoben wird. Mithilfe einer Kolonne wird das Ammoniak mit einem im Gegenstrom zugeführten Gas (Luft oder Wasserdampf) ausgetrieben. Das im Gas enthaltene Ammoniak reagiert anschließend in einem Gaswäscher unter Zugabe von Schwefelsäure zu Ammoniumsulfatlösung (ASL) (Wilken et al. 2019).

Bei dem von der Firma GNS mbH patentierten Ammoniakstrippungsverfahren ANAStrip® wird die flüssige Phase des separierten Gärprodukts ohne Zugabe von Lauge durch Anhebung der Temperatur auf 40 bis 90 °C und des Drucks auf zunächst 10 bis 30 kPa und



anschließend bei 40 bis 80 kPa behandelt (Spindler et al. 2009). Dabei entweicht mit Kohlenstoffdioxid und Ammoniak angereichertes Gas (und ein geringer Teil an Wasser). Im Gegensatz zur herkömmlichen Ammoniakstrippung benutzt das Verfahren zur Gasbehandlung REA-Gips anstelle von Schwefelsäure, welches bei der Rauchgasentschwefelung anfällt. In diesem Fall entsteht neben ASL auch stickstoffhaltiger Kalkdünger. Druck und Temperatur können im Prozess autogen aufrechterhalten werden. Der Ammoniumstickstoff wird zu 85 bis 90 % entfernt.

Dieses Verfahren wurde in den beiden oben beschriebenen Projekten „Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte aus Biogasanlagen für Holzwerkstoffe“ und „BiogasFaserPlus“ für die Aufbereitung der Gärprodukte zu Faserstoffen dahingehend modifiziert, dass der Ammoniumstickstoffanteil auch bei nicht separierten oder nur grob vorseparierten Gärprodukten um 80 % (bis 95 %) gesenkt werden kann. Das somit entstandene FaserPlus-Verfahren wird von der GNS mbH vermarktet und ist in der Patentschrift von Bauermeister et al. (2020) näher beschrieben.

Die bei der Strippung anfallenden Produkte ASL und Düngerkalk können als handelsübliche Dünger vermarktet werden, was die Wertschöpfung des Verfahrens weiter steigert.

3. Anknüpfungspunkte zur Biogasanlage

Die Anknüpfungspunkte zur Biogasanlage bestehen zum einen darin, das Gärsubstrat zu produzieren und zum anderen darin, die im Substrat enthaltenen Fasern von den restlichen Bestandteilen zu trennen. Die abschließende Faseraufbereitung und -verarbeitung wird bei zukünftigen Umsetzungen extern in den meisten Fällen außerhalb des Verantwortungsbereiches einer Biogasanlage durchgeführt werden. Zum Beispiel wird Cellulose, die einen hohen Methanertrag bringt, während des Biogasprozesses abgetrennt, in dem diese zu Biogas umgesetzt wird. Auch die enthaltenen Nährstoffe sollten abgetrennt werden, da diese im geschlossenen Kreislauf zwischen Biogasanlage und landwirtschaftlich genutzter Fläche verbleiben sollen. Das Ziel ist es daher, die Nährstoffe bei reiner Fest-Flüssig-Trennung in der flüssigen Phase oder unter Verwendung einer Ammoniakstrippung zusätzlich in ASL und Düngerkalk zu halten. Für den Biogasanlagenbetreiber könnten diese Produkte zur Vermarktung wirtschaftlich interessant sein.

Zu den notwendigen Anschaffungen zur Durchführung des Verfahrens zählt in erster Linie eine Anlage zur Fest-Flüssig-Trennung der Gärprodukte, z. B. ein Pressschneckenseparator, wie er schon vielfach auf Biogasanlagen verbaut ist. Für die Variante zur Herstellung stickstoffarmer Fasern ist darüber hinaus die Anlage zur Ammoniakstrippung anzuschaffen, deren Praxistauglichkeit bereits auf einigen Biogasanlagen nachgewiesen wurde. Für die Lagerung der bei den Prozessen anfallenden Produkte sind zudem Lagerbehälter notwendig. Besondere Anforderungen gibt es hier insbesondere bei der Lagerung von Ammoniumsulfatlösung.



Neben der oben genannten Technik werden für eine reine Fest-Flüssig-Trennung keine Einsatzstoffe benötigt. Für die Ammoniakstrippung mit dem oben genannten FaserPlus-Verfahren wird REA-Gips benötigt, welches bei der Rauchgasentschwefelung entsteht. Im Projektabschlussbericht „BiogasFaserPlus“ wird die benötigte Menge mit 22 kg/t aufzubereitendes Gärprodukt bzw. mit 6,1 kg je kg entferntem Stickstoff angegeben (Essel et al. 2015).

Da das Verfahren inklusive Stickstoffentfernung technisch sehr aufwendig ist, kommt es insbesondere für größere Anlagen bzw. für einen Zusammenschluss kleinerer Anlagen, zum Beispiel in viehstarken Regionen, in Frage. Eine genau Aussage darüber, ab welcher Biogasanlagengröße eine solche Anlage interessant wird, ist allerdings nicht zu treffen.

Berechnet man den Gärrestanfall der im Projekt ProBiogas berechneten Musteranlagen über die Fugatfaktoren (KTBL 2013), so ergibt sich für die 1-MW-Anlage (Anlage 3) mit 1.100 t/a Maissilage (44 %), 5.300 t/a Grassilage (21 %) sowie 8.700 t/a Rindergülle (35 %) eine Gärproduktmenge von 20.861 t/a.

Im Projekt „BiogasFaserPlus“ werden Anlagen mit einem Gärproduktanfall von 20.000, 40.000, 80.000 und 120.000 t/a ökonomisch bewertet, wobei davon ausgegangen wird, dass eine 1-MW-Anlage je nach eingesetzten Substraten zwischen 20.000 und 40.000 t Gärprodukte pro Jahr produziert. Für eine Anlage mit einem Gärproduktanfall von 20.000 t/a, welches der 1-MW-Modellanlage am nächsten kommt, wurde im Projektabschlussbericht „BiogasFaserPlus“ mit einer Aufbereitungsanlage mit einem Durchsatz von 2,5 t/h (entspricht 8.000 h für 20.000 t Gärprodukt) kalkuliert. Hiermit entstände pro Jahr ein Bedarf an Wärme von 250 kW sowie von 440 t REA-Gips. Eine solche Anlage könnte pro Jahr 500 t trockene Fasern sowie als Nebenprodukte 325 t Kalk und 1.110 t ASL produzieren. Daten für kleinere Biogasanlagen sind nicht verfügbar.

Aufgrund der stofflichen Verwertung der Fasern der Gärprodukte werden diese nicht im Zuge der Düngung auf den Acker zurückgeführt. Eine solche Verwertung steht somit in Konkurrenz zur Nutzung der Fasern auf dem Acker, wo sie als organische Dünger zur Steigerung der Humusreproduktion des Bodens dienen.

4. Ökonomische Angaben

Detaillierte ökonomischen Angaben zur Umsetzung der Fasergewinnung sind bisher nur im Projekt „Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte aus Biogasanlagen für Holzwerkstoffe“ (Essel et al. 2015) erfolgt und daher dienen die Daten aus diesem Projekt im Folgenden als Basis. Die Daten beziehen sich auf die Herstellung von Fasern mittels Ammoniakstrippung und nicht auf eine reine Fest-Flüssig-Trennung. Die techno-ökonomische Evaluierung dieser Gärrestverwertung wurde im oben genannten Projekt unter verschiedenen Aspekten vorgenommen. Neben der Wirtschaftlichkeitsberechnung für eine Biogasanlage wurde auch eine Kostenberechnung für aufbereitete Gärprodukte durchgeführt sowie die Transport- und Logistikwege kalkuliert.



Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden zwei Biogasanlagen (je 3 MW entsprechend der im Projekt integrierten Biogasanlage) gegenübergestellt, je eine mit und ohne ANAStrip®-Anlage. Dabei kamen drei Szenarien den Standort der Biogasanlage betreffend zum Einsatz: Ackerbauregion (Gärprodukte teuer), Veredlungsregion (Entsorgung der Gärprodukte kostenpflichtig) sowie Mischregion (Kosten vs. Entsorgung etwa gleich hoch, Preis wird vernachlässigt). Für jede Region wird für beide Anlagen mit und ohne ANAStrip-Verfahren von der gleichen Gewinnhöhe (fixe Zielgröße) ausgegangen und somit der Preis für die festen separierten Gärprodukte als Variable für die drei Regionen entsprechend angepasst, da ein Marktpreis nicht verfügbar ist (Grenzkostenrechnung).

Die folgende Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Grundannahmen für die beiden verglichenen Biogasanlagen.

Es wurde mit einem unterschiedlichen Verhältnis der Substrate Maissilage und Hühnermist gerechnet, da der kostengünstige Hühnermist zu einem maximal möglichen Anteil angerechnet wurde. Durch den hohen Stickstoffgehalt, der hemmend auf die Prozessmikroorganismen wirken kann, ist der Einsatz des Substrats begrenzt (empfohlen ist nach KTBL (2006) ein $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt von $< 4 \text{ mg/l}$). Die Ammoniakstrippung und die Rückführung von 40.000 t des N-armen Rezyklats in der Anlage mit ANAStrip®-Verfahren sorgen für einen höheren möglichen Einsatz des Substrats in dieser Anlage.

Tabelle 1: Grundannahmen für zwei Biogasanlagen zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit mit und ohne ANAStrip®-Anlage (nach Essel et al. 2015)

Parameter	Einheit	Biogasanlage mit ANAStrip®	Biogasanlage ohne ANAStrip®
Gesamtleistung BHKW	kW_{el}	3.088	3.088
Substrate			
Maissilage	t/a	45.771	55.006
Hühnermist	t/a	14.454	3.667
Gesamt	t/a	60.225	58.673
Output			
Biogas	t/a	16.140	16.335
Methan	Nm^3/a	6.484.276	6.484.323
Stromeinspeisung	kWh/a	27.233.960	27.234.158
Gärprodukte			
feste Phase	t/a	10.527	-
flüssige Phase	t/a	27.268	-
unbehandelt	t/a	-	42.337
Ammoniumsulfatlösung	t/a	5.857	-
Düngeralkali	t/a	1.744	-



Kosten

Die Kosten für die Biogasanlagen teilen sich in variable, fixe und Gemeinkosten auf und sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Für die genauen getroffenen Annahmen sei auf den Projektabschlussbericht von Essel et al. (2015) verwiesen.

Unter die variablen Kosten fallen die Substratkosten (inklusive REA-Gips für Ammoniakstrippung), Betriebsmittel (wie Strom- und Wärme(-eigenbedarf), Wasser und Schmieröl), Reparatur- und Wartungskosten, Laboranalysekosten sowie Maschinenkosten. Die Biogasanlage mit ANAStrip®-Verfahren weist hier jährliche Mehrkosten von etwa 3.600 € gegenüber der Anlage ohne Aufbereitung auf. Die zusätzlichen Kosten resultieren aus dem Einsatz von REA-Gips, aus einem höheren Eigenstromverbrauch für den Separator und die Strip-Anlage, aus zusätzlichen Reparatur- und Wartungskosten sowie aus einem geringfügig höheren Maschineneinsatz. Demgegenüber kann die Anlage mit ANAStrip®-Verfahren Substratkosten einsparen, da der kostengünstige landwirtschaftliche Reststoff Hühnermist die deutlich wertigere Maissilage substituiert.

Unter die fixen Kosten fallen Abschreibungen, Zinskosten, Versicherungen sowie Lohnkosten. Die um rund 408.000 € höheren jährlichen Ausgaben bei der Anlage mit ANAStrip®-Verfahren resultieren aus den zusätzlichen Abschreibungen, Zinsen und Versicherungskosten für die Aufbereitungsanlage. Darüber hinaus wird durch einen höheren Arbeitseinsatz auch mit höheren Lohnkosten kalkuliert.

Tabelle 2: Kosten der Biogasanlagen mit und ohne ANAStrip®-Verfahren im Vergleich (nach Essel et al. 2015)

Kostenpositionen	Einheit	Biogasanlage mit ANAStrip®	Biogasanlage ohne ANAStrip®
Summe variable Kosten	€	3.004.577	3.000.973
Summe fixe Kosten	€	903.747	495.708
Summe Gemeinkosten	€	30.877	30.877
Summe Kosten	€	3.939.201	3.527.559

Die Gemeinkosten bleiben für beide Anlagen gleich. Insgesamt sind die jährlichen Kosten der Anlage mit Gärrestaufbereitung um 411.642 € höher als für die Anlage ohne Aufbereitung. Den jährlichen Kosten können die Leistungen gegenüber gestellt werden.

Leistungen

Die Leistungen der beiden Biogasanlagen bestehen aus der Stromvergütung nach dem EEG 2009, aus den Wärmeerlösen sowie aus den Erlösen aus dem Verkauf der Gärprodukte und sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Die Stromproduktion ist bei beiden Anlagen etwa gleich hoch (27.233.960 kWh/a für die Anlage mit Aufbereitung und 27.234.158 kWh/a für die Anlage ohne Aufbereitung),



allerdings ist die EEG-Vergütung bei der Anlage mit Aufbereitung durch einen höheren KWK-Bonus mit insgesamt 16,4 Cent/kWh etwas höher (16,0 Cent/kWh für die Anlage ohne Aufbereitung).

Die Wärmeerlöse setzen sich aus der Nutzung der BHKW-Abwärme (15 % angenommen, Vergütung mit 2 Cent/kWh) sowie einer Heizöleinsparung für Wohn- und Wirtschaftsgebäuden zusammen und sind für beide Anlagen gleich. Bei der Anlage mit Aufbereitung wird darüber hinaus Wärme für die Entstrippung aufgewendet, wodurch der KWK-Anteil steigt (s.o.), was in der ersten Förderperiode des EEG einen positiven finanziellen Anreiz darstellt. Dieser wird allerdings in einer zweiten Förderperiode oder in einem anderen Vergütungskonzept nicht mehr honoriert, weshalb zu erwähnen ist, dass für Biogasanlagen, die die Möglichkeit haben eine hohe externe Wärmeabnahme zu realisieren, finanzielle Einbußen aufgrund der benötigten Wärme für die Entstrippung nicht auszuschließen sind.

Tabelle 3: Leistungen der Biogasanlagen mit und ohne ANAStrip®-Verfahren im Vergleich; Vergütung gemäß EEG 2009 (nach Essel et al. 2015)

Kostenpositionen	Einheit	Biogasanlage mit ANAStrip®	Biogasanlage ohne ANAStrip®
Strom	€	4.458.199	4.368.359
Wärme	€	83.529	83.530
Summe Leistungen ohne Dünger	€	4.541.728	4.451.889
Dünger Szenario Gemischtregion			
Dünger Gemischtregion	€	321.802	0,00
Summe Leistungen Gemischtregion	€	4.863.531	4.451.889
Summe Kosten (aus Tab. 2)	€	3.939.201	3.527.559
Gewinn Gemischtregion	€	924.330	924.330
Dünger Szenario Veredlungsregion			
Dünger Gemischtregion	€	-165.076	-486.879
Summe Leistungen Gemischtregion	€	4.376.652	3.965.010
Summe Kosten (aus Tab. 2)	€	3.939.201	3.527.559
Gewinn Gemischtregion	€	437.451	437.451
Dünger Szenario Ackerbauregion			
Dünger Gemischtregion	€	808.681	486.879
Summe Leistungen Gemischtregion	€	5.350.410	4.938.768
Summe Kosten (aus Tab. 2)	€	3.939.201	3.527.559
Gewinn Gemischtregion	€	1.411.209	1.411.209

Für die Berechnung der Einnahmen/Ausgaben für die Düngeprodukte kommen die erwähnten unterschiedlichen Standortszenarien zum Einsatz: Bei der Anlage ohne Gärproduktaufbereitung fallen pro Jahr 42.337 t unseparierte und bei der Anlage mit Aufbereitung 27.268 t flüssige separierte Gärprodukte an. In der Ackerbauregion werden dafür Einnahmen von 11,50 €/t angenommen (Transport- und Ausbringungskosten werden



vom Abnehmer getragen), in der Veredlungsregion ist die Abgabe/Entsorgung kostenpflichtig und schlägt mit Transport- und Ausbringungskosten von 11,50 €/t zu Buche (kein Wert für die Nährstoffe angenommen; gleicher Betrag zu den Einnahmen in Ackerbauregion ist zufällig) und in der Gemischtregion wiegen sich Einnahmen und Ausbringungskosten auf und werden nicht berücksichtigt. Für die zusätzlich bei der Anlage mit Aufbereitung anfallenden Produkte wird angenommen, dass 5.857 t ASL (trocken) mit einem Wert von 30 €/t sowie 1.744 t Düngerkalk mit einem Wert von 25 € anfallen. Einen Preis für das Zielprodukt „feste, separierte Gärprodukte“ gibt es bisher nicht und wird hier über Grenzkostenberechnung ermittelt. Grenzkosten sind dabei so definiert, dass mit dem angenommenen Faserpreis der gleiche Erlös wie bei der Referenzanlage in der gleichen Region erzielt werden kann.

Ergebnis

Aus den Berechnungen wurden folgende Grenzwerte für die festen separierten Gärprodukte ermittelt (die Preise, die erzielt werden müssten, um den gleichen Gewinn wie bei der Referenzanlage in der gleichen Region zu erzielen; siehe Tab. 3):

- -25,87 €/t TM in Veredlungsregionen
- 37,45 €/t TM in Gemischtregionen
- 100,76 €/t TM in Ackerbauregionen.

Daraus folgt, dass das Konzept insbesondere in Veredlungsregionen, aber auch in Gemischtregionen wirtschaftlich sein kann. Laut Projektabschlussbericht ist die Aufbereitung für große Biogasanlagen oder für einen Zusammenschluss mehrerer Anlagen wirtschaftlich, solange die festen und gestripten Gärprodukte für unter 75 €/t TM (wird hier als Rohstoffpreis für Holzfasern angegeben) und in ausreichender Menge kontinuierlich hergestellt werden können. Darüber hinaus spielen aber auch die Transportkosten eine große Rolle. Beispielsweise wird laut den Berechnungen das Verfahren unwirtschaftlich, wenn die für 40 €/t hergestellten Fasern über 300 km hinaus zum Abnehmer transportiert werden müssten, sofern man unter dem Rohstoffpreis für Holzfasern von 75 €/t TM bleiben möchte. Die Entfernungen zu potenziellen Abnehmern für die Vermarktung müssen also bei der Planung unbedingt berücksichtigt werden.

5. Marktrelevanz und Absatzmärkte

Mögliche Absatzwege für Lignocellulosefasern aus Gärprodukten bestehen in der Holzwerkstoff-, Dämmstoff- sowie der Papier- und Verpackungsindustrie. Die Nebenprodukte ASL und Düngerkalk finden Absatz in der Agrarindustrie.

Der ursprüngliche Projektgedanke der Projekte „Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte aus Biogasanlagen für Holzwerkstoffe“ sowie „BiogasFaserPlus“ bestand darin, einen Anteil der Holzfasern bei der Herstellung von **Holzfasernplatten** (HDF-, MDF- und Spanplatten) zu ersetzen. Es wurden erfolgreich etwa 20 % der Holzfasern bei der Herstellung der verschiedenen Platten ersetzt. Im Projekt wurden allerdings im größer



angelegten Versuch, ohne Nennung von Gründen, Laminatfußbodenplatten mit nur 2 % Gärproduktfasern hergestellt (Essel et al. 2015). Sollten die im Kapitel 4 genannten Anforderungen bezüglich Herstellungspreis und Transportwege für den Absatz realisiert werden können, so sollte ein Absatz an die Holzwerkstoffindustrie gut möglich sein.

Ein weiterer Absatzmarkt ist die Produktion von **nachhaltigen Verpackungsmaterialien**, die vor allem Plastik ersetzen sollen. Dieser Idee geht die Heitmann-Gruppe nach, indem sie „Magaverde Lignocellulosefasern“ aus Gärprodukten herstellen (Heitmann 2020). Sie geben an, dass in Deutschland jährlich 22,7 Mio. t Papier hergestellt werden, wovon 53 % Verpackungen sind. Die Recyclingquote liegt dabei bei 76 %, der Anteil alternativer Fasern aktuell nur bei unter 1 %. Laut Heitmann (2020) besteht das Potenzial, die Holzfasern für die Papierherstellung in den kommenden Jahren bis zu 20 % durch nachhaltige Materialien zu ersetzen. Der Vorteil der „Magaverde Biofasern“ sei, dass die Produkte zu 70 bis 100 % aus den Fasern hergestellt werden können. Bei dem Konkurrenzprodukt „Graspapier“ seien dies nur etwa 40 % (Heitmann 2020). Für die Vermarktung von Gärproduktfasern an nahegelegene Papierindustriestandorte gelten bisher vergleichbare ökonomische Bedingungen wie für die Holzwerkstoffindustrie (siehe Kapitel 4). Der Vorteil einer eigenen Vermarktung, wie sie zurzeit von der Heitmann-Gruppe in der Nähe von Bremen realisiert wird, ist die mögliche Werbung unter dem Nachhaltigkeitsaspekt. Möglicherweise liegt der erzielbare Preis für die Faserrohstoffe deutlich höher als bei einer Vermarktung über die herkömmliche Papierindustrie. Genauere Zahlen dazu sind allerdings bisher nicht veröffentlicht.

Ein weiterer potenzieller Markt ist die Vermarktung von Gärproduktfasern als **Dämmstoff**. Die Fasern müssten getrocknet werden und könnten dann zum Beispiel als Einblasdämmung vermarktet werden. Der Vorteil von Holz- und Gärproduktfasern als Dämmung ist ihre Nachhaltigkeit, ein Nachteil ihre Brennbarkeit. Ein Rohstoffpreis für solche Materialien ist momentan nicht zu beziffern. Der Endverbraucherpreis für Einblasdämmung aus Holz liegt bei ca. 1.039 bis 1.110 €/t (Steico Einblasdämmung unter www.bausep.de).

6. Rechtliche Belange und Förderungen

Für die Anschaffung der notwendigen Technik und die Durchführung des Konzeptes der Faserstoffgewinnung und -nutzung gibt es, soweit bekannt, keine speziellen Fördermöglichkeiten.

Die im Aufbereitungsprozess entstehenden Düngeprodukte Ammoniumsulfatlösung (ASL) und Düngerkalk (Kalziumkarbonat) sind zugelassene und transportwürdige Düngemittel, die für eine Vermarktung die Vorgaben der Düngemittelverordnung (DüMV 2012) einhalten müssen.

7. Chancen und Hürden

Gute Chancen für eine ökonomische Umsetzung dieses alternativen Vermarktungskonzeptes bestehen insbesondere für große Anlagen mit faserreichen



Gärprodukten, welche in Veredlungsregionen liegen und für welche nahegelegene Absatzmöglichkeiten der Fasern bestehen.

Die Chancen des Verfahrens liegen in einer hohen Wertschöpfung der Gärproduktnutzung, da alle entstehenden Phasen/Produkte genutzt werden können. Produkte, die aus den Gärrestfasern entstehen, können unter dem Nachhaltigkeitsaspekt gut vermarktet werden, wie es mit den Magaverde Biofasern[®] oder mit dem Dämmstoff aus Gras AgriCell[®] gemacht wird. Das Verfahren kann außerdem sehr interessant werden, sollte der Preis für Holzfasern deutlich steigen.

Bisher sind allerdings nur wenige Produkte schon in der Marktreife, sodass noch weiterer Forschungsbedarf besteht und es offen ist, welche Preise für die Rohstoffe erzielt werden können. Ein langfristiger Vertrag zwischen einem Biogasbetreiber und dem Abnehmer der Fasern erscheint notwendig und sinnvoll.

Eine Gefahr bei der Umsetzung des Verfahrens besteht darin, dass die geforderten Qualitätskriterien für die Fasern nicht eingehalten werden können. Dies kann die erzielte Trockensubstanz oder Faserlängen betreffen, was sich durch eine Nachtrocknung bzw. Faserzerkleinerung beheben lassen würde. Es kann aber auch Probleme mit Inhaltsstoffen wie Sand, Chlorid und Schwermetallen oder anderen Schadstoffen geben, welche auch in der Biogasanlage ungewollte Störstoffe darstellen. Des Weiteren sind die Verwendungsmöglichkeiten der aus Gärrestfasern hergestellten Platten durch die dunklere Farbe im Vergleich zu reinen Holzfasern eingeschränkt.

Laut Projektergebnissen der Projekte „Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte aus Biogasanlagen für Holzwerkstoffe“ sowie „BiogasFaserPlus“ können die Treibhausgasemissionen mit dem entwickelten Verfahren (Ammoniakstrippung und Separierung in feste und flüssige Phase) gegenüber einer herkömmlichen Gärproduktverwertung deutlich gesenkt werden. Dazu verglichen Essel et al. (2015) die THG-Bilanz der bereits vorgestellten Anlagenkonfigurationen (siehe Kap. 4 und Tabelle 1). Die Aufbereitung der Gärreste sorgte für eine verbesserte THG-Bilanz durch die Möglichkeit den Einsatz von Hühnermist zu erhöhen, durch die Steigerung der Methanausbeute durch die Rückführung des Rezyklats sowie durch die zusätzliche Substitution von zugekauften Mineraldüngern, da insbesondere ASL als mineralischer Dünger eine bessere Pflanzenverfügbarkeit besitzen als die unaufbereiteten Gärprodukte (70 % pflanzenverfügbar, Berücksichtigung des Mineraldüngeräquivalents). Im Ergebnis ergibt sich eine Einsparung von 386 t CO₂-Äquivalent/a für die Anlage mit Aufbereitung im Vergleich zur Anlage ohne Aufbereitung, was umgerechnet 0,0142 kg CO₂-Äquivalente je kW erzeugtem Strom entspricht.

8. Weiterführende Informationen

Neben der Verwertung des Gärprodukte ist auch die Separierung der Fasern vor dem Biogasprozess zunehmend im Fokus, da auf Basis dessen kleinere Reaktorvolumen im



Biogasprozess möglich sind und nur die Reststoffe im Biogasprozess verwertet werden müssen.

Am Bioenergiepark Hahnennest im Landkreis Sigmaringen sind in Kooperation mit der Universität Hohenheim zwei Projekte gestartet. In den Projekten wird die Umsetzbarkeit der Fasergewinnung mittels Steam Explosion und Entstipper getestet. Mit diesen verfahrenstechnischen Apparaten sollen die Fasern vor dem Biogasprozess abgetrennt werden. In den Projekten sind dabei unterschiedliche Substrate im Fokus. Während das erste Projekt die Durchwachsene Silphie und deren optimalen Erntezeitpunkt zur Faserproduktion untersucht, werden im zweiten Projekt eine Reihe von anderen Reststoffen untersucht.

Informationen zu den Projekten finden sich auf folgenden Internetseiten:

<https://mlr.baden-wuerttemberg.de/de/unsere-service/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/pressemitteilung/pid/landwirtschaftsminister-peter-hauk-besichtigt-innovative-fasergewinnungsanlage-im-energiepark-hahnen> (Zugriff am 13.04.2021)

<https://mlr.baden-wuerttemberg.de/de/unsere-themen/biooekonomie-und-innovation/biooekonomie/foerderprogramm/geofoerderte-projekte> (am 13.04.2021).



Literatur

Bauermeister, U. (2017): Veröffentlichung der Ergebnisse vom Forschungsvorhaben im BMBF-Programm „Spitzencluster BioEconomy“ TG4, Energetische Nutzung und Optimierung im Gesamtzusammenhang der Kaskadennutzung (VP4.2/BiogasFaserPlus) – Teilprojekt E: Erzeugung und Nutzung hochwertiger Werkstoffe aus Nebenprodukten von Biogasanlagen, FKZ 031A443E

Bauermeister, U.; Heitmann, C.; Meier, T.; Spindler, H. (2020): Gewinnung eines vielfältig als Werkstoff einsetzbaren biologisch abbaubaren Fasermaterials aus aufbereiteten Gärrückständen von Biogasanlagen (Patentnummer DE 10 2018 009 531 A1 2020.06.10). Deutsches Patent- und Markenamt

KTBL (2013): Faustzahlen Biogas. 3. Ausgabe, Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.

Essel, R.; Breitmayer, E.; Carus, M.; Pfemeter, A.; Bauermeister, U. (2015): Endbericht des Projekts: Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte für Holzwerkstoffe aus Biogasanlagen. <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-28691.pdf>, Zugriff am 13.04.2021

Fenz, S.; Fudel, T.; Fudel, A.; Fudel, G. (2001): Feuerhemmendes Brennmaterial (Patentnummer DE 198 13 738 C1). Deutsches Patent- und Markenamt

Folke Andersen, L.; Kaltschmitt, M. (2018): Charakterisierung und mögliche Nutzungsoptionen von Lignin-reichen Gärresten aus Strohvergärungen. Chemie Ingenieur Technik 90(9), S. 1184–1185

Heitmann, C. (2020): Faserproduktion aus Gärresten – neue Wege gehen. Vortrag auf der BiogasConvention 2020

KTBL (2006): Betriebsplanung Landwirtschaft 2006/7. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.

Lütz, M.; Helle, T. (2019): Faserverbundwerkstoffe aus Gärprodukten – Mehrwert aus Gärresten. 4. Bioökonomietag November 2019

Rigby, H.; Smith, S. R. (2011): New Markets for Digestate from Anaerobic Digestion. <https://www.yumpu.com/en/document/view/23054251/new-markets-for-digestate-from-ad-wrap>, Zugriff am 13.04.2021

Schimpf, U. (2014): Enzymatischer Abbau des Lignocellulosekomplexes in Energiepflanzen unter besonderer Berücksichtigung der Silierung und der Biogasproduktion. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, <https://edoc.hu-berlin.de/handle/18452/17581>, Zugriff am 13.04.2021



Spelter, H.; Winandy, J.; Zauche, T. (2008): Anaerobically digested bovine biofiber as a source of fiber for particleboard manufacturing: an economic analysis. *BioResources* 3(4), pp. 1256–1266

Spindler, H.; Bauermeister, U.; Teske, M. (2009): Verfahren und Vorrichtung zur Gewinnung von Stickstoffdünger aus organischen Abfallprodukten (Patentnummer DE 103 54 063 C5 2009.09.24). Deutsches Patent- und Markenamt

Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 (Verordnung über tierische Nebenprodukte). *Abl. L 300* vom 20. Oktober 2010, S. 33

Verordnung (EU) Nr. 142/2011 der Kommission vom 25. Februar 2011 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte sowie zur Durchführung der Richtlinie 97/78/EG des Rates hinsichtlich bestimmter gemäß der genannten Richtlinie von Veterinärkontrollen an der Grenze befreiter Proben und Waren. *Amtsblatt der Europäischen Union L 54/1* vom 26.02.2011

Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV) vom 5.12.2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist

Wilken, D.; Rauh, S.; Weiß, R.; Strippel, F.; Wiesheu, M.; Luyten-Naujoks, K.; Kirsch, A.; Herbes, C.; Kurz, P.; Halbherr, V.; Dahlin, J.; Nelles, M. (2019): Düngen mit Gärprodukten. <https://www.digestate-as-fertilizer.com>, Zugriff am 13.04.2021

Winandy, J.E.; Cai, Z. (2015): Potential of using anaerobically digested bovine biofiber as a fiber source for wood composites. *BioResources* 3(4), pp. 1244–1255

