

Einsatz von Strohpellets in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

Handlungsempfehlungen für die Praxis



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

HAWK Göttingen, Fachgebiet NEUTec

Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften

Prof. Dr.-Ing. Achim Loewen, Dr. agr. Dirk Augustin, Sören Mohrmann, Dr.-Ing. Fabian Gievers, Meike Walz, Kirsten Loewe



IMPRESSUM

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektes „StroPelGas - Nachhaltiger Einsatz von Strohpellets zur Biogaserzeugung“ erstellt.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt.

Projektlaufzeit: 01.08.2019 - 30.03.2023

Förderkennzeichen: Teilvorhaben 1: 22041518, Teilvorhaben 2: 2219NR075, Teilvorhaben 3: 2219NR101

Projektpartner: HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
Hildesheim/Holzminden/Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement, Fachgebiet
Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik NEUTec, (Projektkoordination),
Rudolf-Diesel-Str. 12, 37075 Göttingen

Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften,
Departement für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung,
Management der Agrar- und Ernährungswirtschaft
Platz der Göttinger Sieben 5, 37073 Göttingen

Georg-August-Universität Göttingen, Abteilung Eigenbetriebe,
Carl-Sprengel-Weg 1, 37075 Göttingen

Herausgeber: HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
Hildesheim/Holzminden/Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement, Fachgebiet
NEUTec, Büsgenweg 1a, 37077 Göttingen
Tel.: 0551-5032-257,
<https://neutec.hawk.de/de>

Der vollständige Projektbericht steht zum Download unter folgenden Link zur Verfügung:

https://neutec.hawk.de/sites/default/files/2024-02/230703_Abschlussbericht-StroPelGas-FINAL.pdf

1. Auflage, 2024

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung und Ziele der Handreichung	4
	Warum Strohpellets?	4
	Forschungsprojekt StroPelGas	4
	Zielgruppen.....	4
2.	Praktisch-technische Aspekte der Vergärung von Strohpellets	5
	Erfahrungen aus der Praxis des großtechnischen Einsatzes von Strohpellets	5
	Einfluss der Fütterung von Strohpellets auf ausgewählte Parameter	6
	Prognose des TS-Gehalts bei der Fütterung von Strohpellets	6
3.	Charakterisierung von Strohpellets und deren Einfluss auf die Fermentation	8
	Trockensubstanz (TS) und organische Trockensubstanz (oTS)	8
	Schüttdichte.....	8
	Auflöseverhalten.....	8
	C/N-Verhältnis	9
	Pentosengehalt	9
	Futtermittelanalytik	9
	Gasbildungspotential.....	9
4.	Ökobilanzielle Betrachtungen.....	10
	Einfluss der Substratzusammensetzung.....	10
	Einfluss der Strohpelletbereitstellung.....	11
	Pelletierverfahren	11
	Transportentfernung für die Bereitstellung von Stroh(-pellets) und Gärresten	11
5.	Ökonomische Betrachtungen	12
	Datenerhebung.....	12
	Leistungs- und Verbrauchsdaten der Pelletierung am Beispiel der Krone Premos.....	12
	Arbeitszeitbedarfs bei der Fütterung von Strohpellets	14
	Eigenstromverbrauchs des Feststoff-Eintragssystems.....	14
	Wirtschaftlichkeitsanalyse anhand verschiedener Szenarien	14
	Gleichgewichtspreise	17
6.	Zusammenfassung und Empfehlungen.....	19
	Zusammenfassung	19
	Empfehlung für das Vorgehen bei Einsatz von Strohpellets	19
	Literaturverzeichnis	20

1. Einführung und Ziele der Handreichung

Warum Strohpellets?

Getreidestroh ist ein Reststoff mit großem, ungenutzten Potenzial. Biogasanlagenbetreiber könnten bei Substitution von Maissilage durch Stroh damit theoretisch bis zu 30 % des Substratbedarfs decken. In der Vergangenheit gab es bereits verschiedene Ansätze, Stroh nach einer Vorbehandlung zum Aufschluss der Lignocellulosestruktur wie Mahlen, Extrudieren, Hydrolysieren oder Zerkleinerung mittels Schneidpumpe in Biogasanlagen energetisch zu nutzen. Eine breite Anwendung findet aber bisher nicht statt, da der erzielte Mehrertrag den zusätzlichen Aufwand oft nicht trägt. Ein neuerer Ansatz ist die Verwendung von pelletiertem Stroh. Die vorgeschaltete Zerkleinerung des Strohs und die Pelletierung bedeuten zunächst einen höheren Energieeinsatz und steigende Kosten, bieten aber mehrere Vorteile gegenüber bisherigen Ansätzen zur Nutzung von Stroh in Biogasanlagen.

Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft geförderten und durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) betreuten Projekts StroPelGas wurde an der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) und der Universität Göttingen eine anwendungsorientierte Bewertung des Einsatzes von Strohpellets in Biogasanlagen unter Berücksichtigung der Verfahrenstechnik, der Prozessbiologie und der Nachhaltigkeit durchgeführt. Es wurden Anwendungsszenarien auf Basis des aktuellen Wissensstandes erstellt und zur Anwendungsreife weiterentwickelt.

Aus den Ergebnissen des Forschungsprojektes werden in dieser Handreichung Praxistipps abgeleitet.

Forschungsprojekt StroPelGas

Inhalte des Projekts waren folgende:

- Beurteilung der chemisch-physikalischen Eigenschaften der Pellets,
- praktische Versuche zur Pelletierung und Vergärung im Technikumsmaßstab,
- Großtechnische Versuche an der Biogasanlage der Eigenbetriebe der Universität Göttingen,
- Ökonomische Bewertung des Einsatzes von Strohpellets in Biogasanlagen auf Basis einer Prozesskostenbetrachtung und der Ermittlung von Lagerenten für Strohpellets,
- Ökobilanzierung der Umweltwirkungen bei Nutzung von Strohpellets in Biogasanlagen.



Abbildung 1: Versuchsfermenter im NEUTec-Technikum

Einen ausführlichen Projektbericht mit allen Ergebnissen finden Sie auf der Homepage der FNR oder unter:

https://neutec.hawk.de/sites/default/files/2024-02/230703_Abschlussbericht-StroPelGas-FINAL.pdf

Zielgruppen

Die vorliegende Handreichung richtet sich in erster Linie an Biogasanlagenbetreiber, Landwirte, Unternehmen und Personen, die sich für den Einsatz von Strohpellets als Biogassubstrat interessieren.

2. Praktisch-technische Aspekte der Vergärung von Strohpellets

Erfahrungen aus der Praxis des großtechnischen Einsatzes von Strohpellets

Der Einsatz von Strohpellets in Biogasanlagen hat unterschiedliche Aspekte. So ist es neben den wirtschaftlichen und ökobilanziellen Aspekten wichtig, die Auswirkungen auf den Prozess zu kennen und die substratspezifischen Besonderheiten in der Praxis zu berücksichtigen.

Untersucht wurden diese Aspekte in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage mit einer elektrischen Leistung von 530 kW.

Der bisher geringe Einsatz von Stroh geht u.a. auf das schwierige Handling zurück. Die Pelletierung des Strohs bietet eine Einsatzmöglichkeit, ohne dass zusätzliche Investitionen in die Futterstrecke notwendig werden. Der oft genannte Nachteil des Nährstoffentzugs ist bei Rückführung der Gärreste auf den Acker im Gegensatz zum Einsatz von Stroh für die Kraftstoffherstellung oder in Heizkraftwerken nicht gegeben.

Während des Versuchszeitraums wurden Pellets eingesetzt, die im mobilen Verfahren direkt aus dem Strohschwad und teilmobil aus Quaderballen hergestellt wurden. Hierdurch konnte der Transport mittels Wechselcontainern zur Biogasanlage optimiert werden, da das Lagervolumen aufgrund der hohen Schüttdichte deutlich reduziert wurde. Bereits geringfügige Abweichungen von der optimalen Strohfeuchte (idealerweise um 12 %) sorgten sowohl beim teil-stationären als auch mobilen Pelletieren für deutliche Änderungen des Durchsatzes pro Stunde. Alle Pelletiertechniken verbindet die mit dem Pelletiervorgang einhergehende Erhitzung auf ca. 90 °C und mehr, die zu einem teilweisen Aufschluss führt. Dadurch erhöht sich die Gasausbeute, während sich gleichzeitig das Auflösungsverhalten und die Rührbarkeit im Fermenter verbessern.

Pellets sollten nach Möglichkeit trocken in einer Scheune oder Halle gelagert werden.

Die Lagerung abgedeckt im Freien oder unterhalb von Silage ist ebenfalls möglich.

Bedacht werden muss allerdings, dass Pellets bei Eintritt von Feuchtigkeit in Verbindung mit Wind zu einer Verunreinigung der Lagerflächen führen. Darüber hinaus quellen die unteren Schichten umso stärker, je mehr Feuchtigkeit eintritt. Entsprechend kann es zu Energieverlusten durch Erwärmung bzw. mikrobiellen Abbau kommen.

Die Fütterung von Pellets kann mit herkömmlicher Technik per Laderschaufel erfolgen. Der Zeitaufwand hängt hierbei vor allem davon ab, in welcher Entfernung zum Feststoffeintrag die Pellets gelagert werden.

In großtechnischen Praxisversuchen wurde der Einsatz von 3,6 % (Phase 1) bzw. 6 % Strohpellets (Phase 2) bezogen auf die Frischmasse untersucht. In den Versuchsphasen konnten keinerlei Störungen an der Einbringtechnik beobachtet werden. Im Fermenter sind keine Schwimmschichten entstanden. Der Rührwiderstand stieg insbesondere beim Einsatz von 6 % Pellets bezogen auf die Frischmasse an.

Die Phase 1 dauerte 109 Tage. Im Mittel wurden pro Tag 1,44 Mg Strohpellets eingesetzt und die tägliche Fütterungsmenge sank um 2,6 Mg von 42,8 Mg auf 40,2 Mg. Ersetzt wurden bilanziell 1,62 Mg Maissilage, 0,83 Mg Zuckerrübe, 0,86 Mg Rindermist und 0,68 Mg Gülle. Das Ziel, die Stromproduktion auf dem gleichen Niveau zu halten, wurde erreicht. Der TS-Gehalt stieg geringfügig von 8,9 % auf 9,4 %.

Die 2. Phase dauerte 41 Tage. Im Mittel wurden pro Tag 1,85 Mg Strohpellets bei einer Gesamtmenge von 34,1 Mg Substrat eingesetzt. Ersetzt wurden bilanziell in Summe 2,18 Mg Maissilage, Zuckerrübe und Rindermist zu gleichen Teilen. In dieser Versuchsphase konnte die tägliche Fütterungsmenge nicht dauerhaft gesenkt werden; das heißt, dass der erwartete Methanertrag aus den Substraten nicht erreicht wurde. Im Laufe des Versuchs stieg der TS-Gehalt im Fermenter von 8,8% auf 10,7% an. Der deutliche Anstieg des TS-Gehaltes führte zu einer Verringerung der Rührbarkeit und einem Anstieg der Stromaufnahme der Rührwerke.

Fazit: Der mögliche Anteil von Strohpellets hängt wesentlich vom Substratmix ab. Günstig ist die Kombination mit Substraten mit geringem TS-Gehalt (z.B. Gülle) und einem hohen oTS-Abbaugrad (z.B. Zuckerrübe). Bei einem deutlichen Anstieg des TS-Gehaltes kommt es zu einer erhöhten Stromaufnahme der Rührwerke und einer Verringerung der Abbaubarkeit.

Einfluss der Fütterung von Strohpellets auf ausgewählte Parameter

Durch den Einsatz von Strohpellets werden unterschiedliche Parameter beeinflusst. Anhand von Versuchen im Technikum konnten folgende Effekte beobachtet werden:

Bei Substitution von sehr gut abbaubaren Substraten steigt der oTS-Gehalt im Gärrest an. Dadurch steigt in der Regel auch das C/N-Verhältnis im Fermenter. Der Ersatz von Maissilage durch Strohpellets im Verhältnis 11 zu 5 resultierte in einem Anstieg des C/N Verhältnisses im Gärrest von 11,4 auf 13,8.

Bei langsamer Steigerung des Anteils an Strohpellets unter Einhaltung der Raumbelastung und Aufrechterhaltung der Rührfähigkeit wird die Prozessstabilität nicht negativ beeinflusst, was sich gegenüber Varianten ohne Strohpellets in einem nicht veränderten FOS/TAC-Wert zeigt.

Obwohl der Gehalt an Stickstoff in Stroh im Vergleich zu anderen Substraten gering ist, kann es abhängig von den anderen Substraten zu einem Anstieg des Gehalts an NH₄-N bezogen auf Frischmasse kommen, da der Anteil von Substraten wie Mist und Gülle durch die Reduzierung der Gesamtfütterungsmenge zunimmt.

Der Gehalt an Chlor im Gärrest steigt durch die Fütterung von Strohpellets an, da dieses Substrat vergleichsweise hohe Chlor-Gehalte aufweist.

Für Molybdän, Nickel, Cobalt, Magnesium, Calcium, und Kalium konnten im kontinuierlichen Versuch für die hier beschriebene Variante nach 1,8 Verweilzeiten keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. Lediglich für den Parameter ortho-Phosphat deuten die Ergebnisse auf ein Sinken des Gehalts bei Fütterung von Strohpellets hin.

Fazit: Der TS- und oTS-Gehalt im Gärrest, das C/N-Verhältnis, der Gehalt an NH₄-N und Chlor können steigen, weitere untersuchte Parameter zeigten keine signifikanten Änderungen.

Prognose des TS-Gehalts bei der Fütterung von Strohpellets

Es wurde ein EXCEL Tool erstellt, mit dem abgeschätzt werden kann, wie sich der TS-Gehalt im Fermenter bei Substitution von Substraten durch Strohpellets entwickelt.

Grundlage der Berechnungen ist die Masse des gebildeten Biogases unter Normbedingungen. Als Basis für das Modell dienen für die unterschiedlichen Substrate die Gasertragsdaten nach KTBL (2021)

mit der Bezugsgröße organische Trockensubstanz. Eine Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes ist für die rechnerische Abschätzung obligatorisch, da dieser einen großen Einfluss auf den TS-Gehalt im Fermenter hat. Zurückgehende Methanerträge aufgrund von abnehmender Rührbarkeit und ein damit einhergehender reduzierter Abbau sowie der Eintrag von Oberflächenwasser werden nicht berücksichtigt.

Die Prognose gibt einen Gleichgewichtszustand wieder, der erreicht wird, wenn über einen Zeitraum von 2 bis 3 Verweilzeiten die gleiche Substratmischung gefüttert wird.

Fazit: Das Modell liefert eine erste Einschätzung. Der Einsatz in der Praxis sollte aber stets durch die Überwachung der TS-Gehalte und der Rührfähigkeit des Fermenterinhalt begleitet werden.

So stellt sich laut Prognose zum Beispiel für eine Substratmischung von 20 % Rinderfestmist, 25 % Rindergülle, 30 % Maissilage und 25 % Zuckerrübe ein TS-Gehalt im Gärrest von 9,5 % ein. Ersetzt man in dieser Mischung 11 t Maissilage durch 5 t Strohpellets, stellt sich gemäß Prognose ein TS-Gehalt von 11,5 % ein. Die prognostizierten Ergebnisse ließen sich in Technikumsversuchen für die beschriebene Variante bestätigen.

Wird bei einer Mischung aus Rindergülle und Maissilage die Maissilage komplett durch Strohpellets ersetzt (1 t Strohpellets ersetzen 2,2 t Maissilage), ergibt sich eine Substratmischung von ca. 90 % Rindergülle und 10 % Strohpellets. In diesem Fall steigt der errechnete TS-Gehalt im Fermenter laut Prognose von 7 % auf 10 % an.

Der Einsatz von Zuckerrüben in Kombination mit Strohpellets ist günstig. Diese Kombination bietet die Vorteile, dass Zuckerrübe einen hohen Anteil an Wasser mitbringt, schnell und gut abbaubar ist und wenig Wasser bei der Bildung des Biogases bindet.

Gesamtfazit praktisch-technische Aspekte der Vergärung von Strohpellets

Sowohl die großtechnischen Versuche als auch die kontinuierlichen Versuche im Technikum haben gezeigt, dass Strohpellets ein geeignetes Alternativsubstrat darstellen, um den Substratmix von Biogasanlagen in Deutschland zu ergänzen. Die Fütterung der Pellets ist relativ einfach möglich und bei den untersuchten Konzentrationen und Zeiträumen konnten stabile Betriebszustände hergestellt werden. Der Einsatzanteil von Strohpellets im Gesamtsubstrat-Mix sollte nicht zu hoch gewählt werden und eine Prognose des zu erwartenden TS-Gehalts im Fermenter vorab erfolgen, um sicherzustellen, dass der Fermenterinhalt rührfähig bleibt. Als besonders günstig hat sich die Co-Vergärung mit Substraten wie z.B. Zuckerrübe erwiesen, die sich neben einem hohen Wassergehalt durch einen hohen zu erwartenden oTS-Abbaugrad auszeichnen. Es wurde ein Prognosetool zur Abschätzung des TS-Gehalts im Fermenter entwickelt. Die hieraus berechneten Werte zeigten gute Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der kontinuierlichen Versuche im Technikum. Zieht man allerdings die Auswertungen des Biogasmessprogramms III (FNR, 2021) für einen Vergleich heran, so ergeben sich zum Teil deutliche Abweichungen zu den Praxisdaten. Ein Grund hierfür könnte die Zugabe von Oberflächenwasser in den Fermenter sein. Solche Fälle sollten bei der Anwendung des Tools in der Praxis berücksichtigt werden.

Das Tool wird durch die HAWK Göttingen, Fachgebiet NEUTec, bereitgestellt. Bei Interesse nehmen Sie gerne Kontakt auf: neutec.fr@hawk.de.



Abbildung 2: Strohballen auf einem Feld

3. Charakterisierung von Strohpellets und deren Einfluss auf die Fermentation

In Abbildung 3 sind verschiedene im Rahmen des Projekts untersuchte Strohpellets dargestellt. Je nach Herstellungsverfahren und Matrizengröße wiesen die untersuchten Strohpellets eine sehr unterschiedliche Festigkeit und Struktur auf. Dabei gab es Pellets mit lockerer Struktur und hohem Krümelanteil und andererseits sehr fest gepresste homogene Strukturen ohne Krümelanteil.

Eine Untersuchung der Partikelgrößenverteilung in den Pellets nach DIN EN ISO 17830 ergab je nach Pelletierverfahren deutliche Unterschiede. Generell war der Feinanteil (Partikelgröße < 2mm) in den Pellets mit einer Vorzerkleinerung vor der stationären Pelletierung deutlich höher als bei der mobilen Pelletierung, bei welcher das Stroh ohne Aufbereitung gepresst wurde.

Trockensubstanz (TS) und organische Trockensubstanz (oTS)

Der Trockensubstanzgehalt der Strohpellets, bestimmt nach DIN EN ISO 18134-1, ist ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung und hat Einfluss auf die Energiedichte und die Transportwürdigkeit. Gleiches gilt für die organische Trockensubstanz (oTS), die den für die Vergärung nutzbaren organischen Anteil der Strohpellets darstellt. Der oTS-Gehalt wurde nach DIN EN ISO 18122 bestimmt. Insgesamt lagen die TS-Gehalte zwischen 88,4 % und 96,3 % mit einem Mittelwert von 92,0 %. Der Mittelwert der Strohproben lag mit 90,7 % etwas niedriger. Dies ist durch die Verdampfung von Wasser während der Pressung erklärbar. Die Gehalte an organischer Trockensubstanz sind bei

Strohpellets und bei Stroh mit 94 % sehr hoch und mit dem oTS-Gehalt von Maissilage vergleichbar.

Schüttdichte

Die Schüttdichte ist eine wichtige Kenngröße für die Transportwürdigkeit und den Lagerbedarf. Die mittlere Schüttdichte von Strohpellets mit 15 mm Durchmesser liegt bei 546 kg/m³ und bei Strohpellets mit 8 mm Durchmesser mit 586 kg/m³ etwas höher.

Fazit: Die hohen Schüttdichten der Strohpellets wirken sich vorteilhaft auf den Transport, die Lagerung und die Einbringung in den Fermenter aus. Eine Einbringung in den Fermenter über gängige Fütterungstechnik wie Förderschnecken ist somit im Gegensatz zu Stroh einfach umsetzbar.

Auflöseverhalten

Das Auflöseverhalten von Strohpellets in Wasser ist sehr gut. Sie lösen sich i.d.R. bereits innerhalb der ersten Minuten auf bzw. sind nach 60 Minuten vollständig aufgelöst. In Fermenterinhalt mit einem TS-Gehalt von 7 % sind die Strohpellets allerdings über den gesamten Beobachtungszeitraum an der Oberfläche des Gefäßes verblieben und nur zum Teil eingesunken.

Fazit: Für den Einsatz in Biogasanlagen kann abgeleitet werden, dass das Auflöseverhalten im Fermenter von der Viskosität und dem TS-Gehalt abhängig ist. Daher werden für die Praxis ein gutes Einrühren und evtl. Anmaischen vor der Einbringung empfohlen.



Pellets P1, teil-mobil

Pellets P7, stationär

Pellets P6, mobil

Pellets P10, mobil

Weizenstroh, 15 mm

Gerstenstroh, 8 mm

Roggenstroh, 15 mm

Weizenstroh, 8 mm

Abbildung 3: Vergleichende Darstellung unterschiedlicher Strohpellets

C/N-Verhältnis

Das ermittelte C/N-Verhältnis der untersuchten Strohpellets beträgt 88:1 (n=11) und bei den untersuchten Strohproben 90:1 (n=6). Das ideale C/N-Verhältnis im Fermenter liegt zwischen 10:1 und 40:1 (Eder et al, 2012) und somit deutlich niedriger.

Fazit: Bei einem Einsatz in der Praxis sollte, je nach Substratmischung, auf ausreichende Stickstoffzufuhr, z.B. durch Gülle, geachtet werden.

Pentosangehalt

Pentosane sind Schleimstoffe, die zur Gruppe der Hemicellulosen gehören und Wasser binden können. Es gibt wasserlösliche und wasserunlösliche Pentosane. Die Pentosangehalte in Strohpellets wurden mit dem Furfurol-Verfahren nach DIN ISO 54361 bestimmt und lagen bei 30,7 %. Im Vergleich dazu ergaben die Maissilageproben einen Wert von 15,1 % und die Zuckerrübenproben einen Wert von 5,5 %.

Fazit: Bei Einsatz von Strohpellets kann die Viskosität im Fermenter durch Wasseraufnahme der Pentosane beeinflusst werden.

Futtermittelanalytik

Die Bestimmung der Zusammensetzung der Strohpellets liefert Informationen zur Vergärbarkeit und zu

anaerob nicht oder schwer abbaubaren Anteilen wie z.B. Lignin und Rohasche. Anhand der erweiterten Weender Futtermittelanalyse wurde die Zusammensetzung vor und nach Vergärung im Batchtest untersucht. Der Anteil an nicht vergärbarem Material beträgt 15 % und unterscheidet sich bei Stroh und Strohpellets nicht. Hauptbestandteile der Strohpellets waren Cellulose und Hemicellulose, welche zum größten Teil abgebaut werden. Insgesamt konnten im Batchtest 70 % der eingesetzten Masse an Strohpellets abgebaut werden.

Gasbildungspotential

Das Gasbildungspotential von Strohpellets wurde im Batchversuch nach VDI 4630 in 30 L PET-Fässern mit einem Nutzvolumen von 20 L bei 37 °C in einer Klimakammer bestimmt.

Die Methanerträge der einzelnen Pelletproben liegen zwischen 271 und 340 NL/kg oTS. Die Biogaserträge liegen zwischen 523 und 593 LN/kg oTS. Auf Frischmasse bezogen weisen die Strohpellets 251 NL/kg FM auf. Im Vergleich dazu werden die Methanerträge für Maissilage in der Literatur mit 102 - 121 NL/kg FM angegeben (LfL, 2023; KTBL, 2021). Dies bedeutet, dass der gleiche Methanertrag wie aus einem kg Maissilage (FM) alternativ durch 0,4 - 0,48 kg Strohpellets erzeugt werden kann.

Tabelle 1: Mittelwerte der Methan und Biogaserträge von Strohpellets und Stroh im Vergleich zu Maissilage

	TS	oTS	Ertrag bezogen auf die organische Trockensubstanz		Ertrag bezogen auf Frischmasse		
	[% FM]	[%TS]	Biogas [LN/kg oTS]	Methan [LN/kg oTS]	Biogas [LN/kg FM]	Methan [LN/kg FM]	Methan-gehalt [%]
Strohpellets	92,0 %	94,0 %	560	291	484	251	51,9
Stroh	90,5 %	93,9 %	520	268	442	228	51,5
Maissilage (KTBL, 2021)	35,1 %	96,5 %	658	357	223	121	54,3

Gesamtfazit Charakterisierung von Strohpellets:

Strohpellets eignen sich gut als Biogassubstrat. Sie weisen hohe Trockensubstanz- und oTS-Gehalte sowie Schüttdichten von 557 kg/m³ auf, was eine hohe Energiedichte und gute Lager- und Transportwürdigkeit gewährleistet. Jedoch sind durch die hohen TS-Gehalte mögliche Einflüsse auf den Wassergehalt und die Rührfähigkeit im Fermenter zu beachten. Ebenso weisen Strohpellets ein sehr weites C:N-Verhältnis von 88:1 auf. Es konnte gezeigt werden, dass sich Strohpellets sehr gut in Wasser auflösen. Das Auflösungsverhalten im Fermenter ist allerdings von der Viskosität und dem TS-Gehalt abhängig. Die Viskosität kann durch den Pentosangehalt der Strohpellets beeinflusst werden. Die Partikelgrößen in den Pellets sind vom Pressverfahren abhängig und haben einen Einfluss auf die Methanbildungskinetik. Der Methanertrag belief sich auf 251 LN/kg Frischmasse bei Strohpellets und war damit doppelt so hoch wie bei Maissilage.

4. Ökobilanzielle Betrachtungen

Die ökobilanzielle Bewertung des Einsatzes von Strohpellets zur Biogasproduktion erfolgte anhand der aufgestellten Szenarien mit verschiedenen Substratmischungen und unterschiedlichen Bereitstellungspfaden der Pellets. Für die verschiedenen Szenarien, die sich an exemplarischen Substratmischungen (siehe Abbildung 4) und Gegebenheiten landwirtschaftlicher Biogasanlagen in Deutschland orientierten, wurden zunächst die Stoff- und Energieströme modelliert und die entsprechenden Sachbilanzen aufgestellt. Außerdem wurden die durchgeführten Versuche des Strohpelleteinsatzes in der Praxisbiogasanlage in Reliehausen bilanziert. Anschließend erfolgte eine Abschätzung der Umweltwirkung in verschiedenen Umweltwirkungskategorien. Mithilfe von Prozess- und Parametervariationen wurden dabei zusätzlich die Einflussfaktoren einzelner Parameter und Prozesse sowie der logistischen Rahmenbedingungen der Strohpelletbereitstellung und Gärresttransporte auf die Emissionen untersucht.

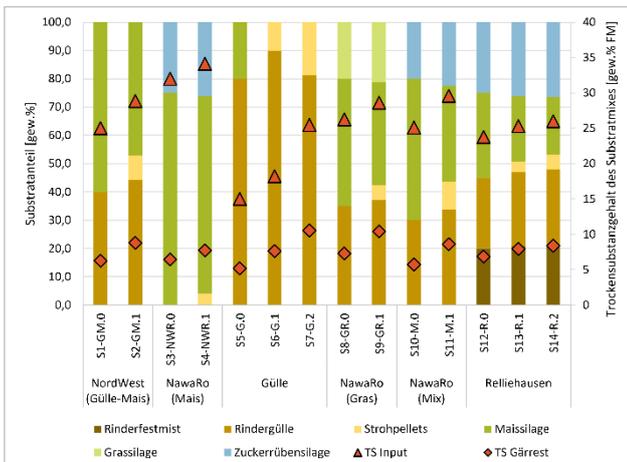


Abbildung 4: Modellierter Szenarien S1-S14 der Biogasproduktion mit unterschiedlichen Substratzusammensetzungen

Die Ergebnisse der ökobilanziellen Bewertung der Strohpelletbereitstellung sowie der gesamten Prozesskette mit unterschiedlichen Nutzungsszenarien und Substrat-Mixen zeigen ein sehr differenziertes Bild. Die ökologischen Auswirkungen der Nutzung von Strohpellets als Substrat in Biogasanlagen hängen demnach immer von den zugrunde gelegten Randbedingungen wie der Wahl der Allokationsmethode für den Getreideanbau oder dem gewählten Substrat-Mix ab.

Einfluss der Substratzusammensetzung

Die Auswertung der Szenarien mit unterschiedlichen Substrat-Mixen und einer mobilen Pelletierung ergab, dass die Substratzusammensetzung einen maßgeblichen Einfluss auf die zu erwartenden Emissionen hat (siehe Abbildung 5). Insbesondere der Einsatz von Wirtschaftsdünger bietet einen großen Hebel zur Minderung der Treibhausgasemissionen und des fossilen Ressourcenverbrauchs. Es zeigte sich, dass je nach Substrat-Mix und Bereitstellungskette der Strohpellets sowohl Emissionsminderungen als auch ein Anstieg der Emissionen im Vergleich zum Ausgangs-Substrat-Mix beobachtet werden kann.

Fazit: Für die Szenarien mit Strohpellets kann im Vergleich zu den Basiszenarien bei einer angepassten, emissionsarmen Prozesskette zur Strohpelletbereitstellung eine Reduktion der Treibhausgasemissionen und des fossilen Ressourcenverbrauchs erreicht werden.

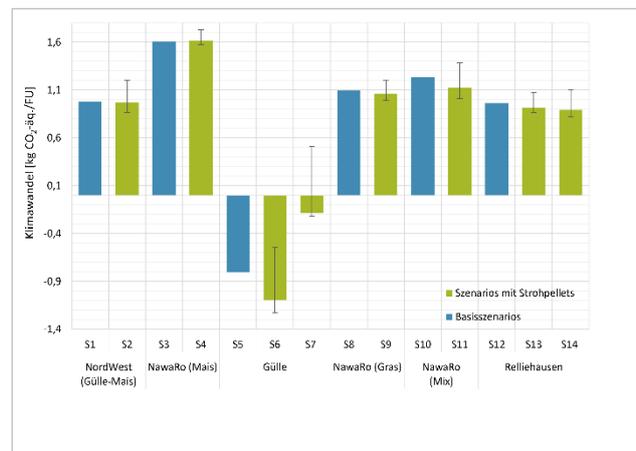


Abbildung 5: Treibhausgasemissionen bei unterschiedlichen Substratzusammensetzungen, bezogen auf die funktionelle Einheit FU (FU = m³ Methan)

Zudem kann in den Umweltwirkungskategorien Eutrophierung, Humantoxizität und Ökotoxizität durch den Einsatz von Strohpellets in allen Szenarien eine Emissionsminderung erzielt werden, wohingegen die Partikelemissionen und das Versauerungspotenzial in einigen Szenarien anstiegen.

Fazit: Strohpellets können bei einer emissionsarmen Prozesskette der Strohpelletbereitstellung und einem auf Wirtschaftsdünger basierenden Substrat-Mix eine sinnvolle Alternative zu klassischen NawaRo einnehmen.

Einfluss der Strohpelletbereitstellung

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für einzelne Prozesse der Strohpelletbereitstellung zeigten, dass die entscheidenden Parameter die Wahl der Allokationsmethode für die Strohbereitstellung, die verwendete Pelletiertechnik sowie die Transportentfernungen der Strohballen und Pellets sind. Im Hinblick auf eine Anpassung der Allokationsmethode führte die Zuteilung der Emissionen von Stroh und Getreide nach Masse oder Preis gegenüber der Variante „Stroh als Reststoff ohne Berücksichtigung von Emissionen der Strohproduktion“ in allen Umweltwirkungskategorien zu einer Erhöhung der Gesamtemissionen.

Fazit: Nur unter der Annahme einer emissionsfreien Strohbereitstellung als Koppelprodukt des Getreideanbaus können Strohpellets eine Emissionsminderungen im Vergleich zum Substrat-Mix ohne Strohpellets erreichen. Diese Betrachtungsweise wird beispielsweise in der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV) angewendet.

Pelletierverfahren

Allgemein zeigte sich die mobile Pelletierung aufgrund der relativ größeren Pelletdurchmesser und der dadurch ermöglichten hohen Durchsätze und geringen Energieverbräuche sowie der nicht benötigten Strohbollenherstellung und -logistik als vorteilhaft gegenüber einer stationären Pelletierung. Demgegenüber besteht der Vorteil der stationären Pelletierung darin, dass die sehr energieintensive Prozesskette der Pelletierung mithilfe erneuerbaren Energie erfolgen kann, was sich emissionsmindernd auswirkt. Der emissionsbehaftete Mehraufwand einer Strohbollenkette, die für eine stationäre Pelletierung benötigt wird, kann dadurch kompensiert werden, sodass die Treibhausgasemissionen für die Prozesskette der stationären Pelletierung bei Einsatz

erneuerbarer Energien unter denen der mobilen Pelletierung liegen können. Die teil-mobile Pelletierung hat aufgrund der geringeren Durchsätze und des damit verbundenen höheren Energiebedarfs, der meist aus fossiler Quelle gedeckt wird, die höchsten Emissionen aller Pelletierverfahren.

Fazit: Als Pelletierverfahren kommen sowohl die mobile Pelletierung als auch die stationäre Pelletierung infrage. Allerdings sollte bei der stationären Pelletierung wenn möglich auf die Eigenstromnutzung der Anlage oder eine andere erneuerbare Energiequelle zurückgegriffen werden, um die Emissionen möglichst gering zu halten.

Transportentfernung für die Bereitstellung von Stroh(-pellets) und Gärresten

Die Transportentfernungen für die Bereitstellung der Strohballen und Strohpellets hat je nach Substrat-Mix einen merklichen Einfluss auf die Gesamtemissionen. Sind die Transportentfernungen zu groß, liegen die Treibhausgasemissionen der Szenarien mit Strohpellets über denen der konventionellen Substrat-Mixe, auch bei einer ansonsten emissionsarmen Bereitstellungskette. Zudem zeigt sich, dass ein Strohpellet-Transport über 200 km für die gegebenen Randbedingungen in etwa den selben Emissionsanstieg für das Treibhausgaspotenzial wie ein Strohbollen-Transport über 50 km hervorruft.

Fazit: Um die Transportemissionen möglichst gering zu halten, sollte sowohl auf eine lokale Substratbeschaffung als auch eine lokale Gärrestverbringung geachtet werden. In Bezug auf die unterschiedlichen Bereitstellungspfade ist deshalb eine stationäre Pelletierung eher für eine lokale Strohbollenversorgung und die mobile Pelletierung auch für einen weiten Strohpellet-Transport geeignet.

Gesamtfazit Charakterisierung Ökobilanzierung:

Durch die ökobilanzielle Bewertung der Prozessketten des Strohpelleteinsatzes wurde gezeigt, dass je nach Substratmix und Bereitstellungskette der Strohpellets eine Emissionsminderung in einigen Umweltwirkungskategorien wie dem GWP (Global warming potential) im Vergleich zum Ausgangs-Substratmix ohne Strohpellets erreicht werden kann. Die Parameter mit großem Einfluss auf die Ergebnisse sind die gewählte Pelletier-Technik, die Transportentfernungen der Stroh-, und Pelletbereitstellung sowie die Gärrestlogistik. Zudem zeigte sich, dass im Substratmix die Einsatzmenge von Wirtschaftsdünger die Gesamtemissionen in den einzelnen Wirkungskategorien stark beeinflusst, sodass die Bandbreiten an Emissionen in den jeweiligen Wirkungskategorien und innerhalb der Substratzusammensetzungen in manchen Szenarien groß waren. Die ökologischen Auswirkungen der Nutzung von Strohpellets als Substrat hängen deshalb immer mit den zugrunde gelegten Randbedingungen wie der Wahl der Allokationsmethode für den Getreideanbau oder dem verwendeten Substrat-Mix zusammen.

5. Ökonomische Betrachtungen

Datenerhebung

Für die ökonomische Bewertung musste zunächst eine Datenbasis geschaffen werden, um Strohpellets im Rahmen der Lagerentenermittlung (Nettoerlös pro Flächeneinheit) und der Prozesskostenbetrachtung bewerten zu können. Einen Schwerpunkt bildete aufgrund des Neuheitsgrades der mobilen und teil-mobilen Pelletierverfahren die Erfassung von Arbeitszeit-, Leistungs- und Verbrauchsdaten anhand der Pelletierung von Getreidestroh mit einer Krone Premos (Ammon 2019; Holzhammer 2023). Darüber hinaus erfolgte die Arbeitszeiterfassung bei der Fütterung von Strohpellets während der großtechnischen Versuche sowie eine Eigenstromverbrauchsmessung am Eintragungssystem bei der Fütterung von einzelnen Substraten an der Versuchsanlage Relliehausen.

Leistungs- und Verbrauchsdaten der Pelletierung am Beispiel der Krone Premos



Abbildung 6: Mobile Pelletierung mit Krone Premos

Für die teil-stationäre Pelletierung aus Quaderballen mit der Krone Premos wurde die pelletierte Menge pro Zeiteinheit (t/h) anhand der Ballenanzahl und dem Durchschnittsgewicht pro Ballen ermittelt. Die Pelletiermaschine verfügt über einen automatischen Ballenauflöser sowie einen Zuführtisch, auf dem mit einem Frontladerschlepper bis zu drei Ballen abgelegt werden können (siehe Abbildung 7).

Bei der mobilen Pelletierung wurden die Leistungs- und Verbrauchsdaten manuell aufgezeichnet und durch Daten des Maschinenterminals ergänzt. Es wurde zwischen aktiver Pelletierzeit (Zeit, in der die Maschine aktiv Stroh mittels einer Pick-Up aus dem Schwad aufnimmt) und inaktiver Zeit (Störungszeiten, Wendezeit + Leerfahrten auf dem Feld, Abbunkern am Feldrand, Rüstzeiten auf dem Feld, Rüstzeiten auf dem Hof sowie die Anfahrt zur Fläche (Entfernung

rd. 4 km)) untergliedert. Die produzierten Pelletmengen wurden über die Wiegeeinheit des Bunkers der Krone Premos gemessen. Abgebunkert wurde die Maschine auf dem Vorgewende.



Abbildung 7: Teil-mobile Pelletierung mit Krone Premos

Die erfassten Daten wurden anschließend in einer Vollkostenrechnung weiterverwendet, bei der eine Gesamtauslastung von 555,6 Stunden pro Jahr und bei allen Verfahren ein Dieselpreis von 1,26 €/l, ein Strompreis von 0,21 ct/kWh und ein Lohnansatz von 21,5 €/h (Statistisches Bundesamt 2023a; KTBL 2022) zu Grunde gelegt wurden.

Bei der teil-mobilen Pelletierung wurde im Schnitt über drei Tage Datenerhebung eine Pelletierzeit von 6,62 Industrieminuten (Imin) pro Ballen erfasst. Die Hochrechnung anhand der Zeiterfassung pro Ballen ergab einen Durchsatz von 2,17 t/h. Unter Berücksichtigung der täglichen Arbeiten sowie zwischenzeitlicher Störungen wurde jedoch nur ein tatsächlicher Durchsatz von 1,71 t/h erreicht, der von der vom Hersteller angegebenen Durchsatzleistung von bis zu vier Tonnen pro Stunde abweicht. Der Auf- und Abbau der Anlage (Ein-/Ausklappen des Zuführtisches) sowie das tägliche Auspusten der Pelletiermaschine mit Druckluft, die routinemäßige Durchsicht der Maschine sowie das Tanken des Schleppers lassen sich auf etwa 30 Minuten Arbeitszeit pro Tag beziffern. Darüber hinaus traten bei der Datenerfassung, z.B. bei etwas höherer Feuchtigkeit der zu pelletierenden Strohballen, häufiger Störungen auf, die zu Verzögerungen im Pelletiervorgang führten. Sowohl die Rüstzeiten als auch Störungsbehebungen sind in der Betrachtung in Bezug auf die Bruttozeit berücksichtigt worden. An Tag 1 waren die einzelnen Pelletierzeiten pro Ballen zu Beginn deutlich höher, da die Pelletiermaschine kalt gestartet wurde (Temperatur der Kollerwalze zu Beginn 4 °C).

An Tag 2 und 3 konnte mit einer Ausgangstemperatur von etwas mehr als 30 °C begonnen werden.

Der Durchsatz bei der mobilen Pelletierung mit der Krone Premos lag im Durchschnitt von vier Tagen der Datenerhebung netto, d.h. bezogen auf die aktive Zeit, bei 5,57 t/h. Bezogen auf die Bruttozeit inklusive der Fahrt- und Rüstzeiten ergab sich ein durchschnittlicher Durchsatz von 3,65 t/h.

Damit konnte der vom Hersteller angegebene Wert für die mobile Pelletierung von bis zu 5 t/h bzw. durchschnittlich ca. drei Tonnen bestätigt werden. Die aktive Zeit bei der mobilen Pelletierung macht knapp 2/3 im Tagesverlauf aus, 1/3 die inaktive Zeit. Das Verhältnis von aktiver zu inaktiver Zeit hängt wesent-

lich davon ab, wie viel Störungszeiten und Leerfahrten gemacht werden. So könnte – anders als in den beobachteten Versuchen - z.B. das Abbunkern während des aktiven Pelletierens zu einer Reduzierung der inaktiven Zeit beitragen und den Durchsatz pro Stunde weiter erhöhen.

Auf Basis der erfassten Leistungsdaten wurden die Pelletierkosten am Beispiel der Krone Premos berechnet. Bei der teil-mobilen Pelletierung wurden die eigenen Ergebnisse mit den Herstellerangaben gemittelt und entsprechend mit einem Durchsatz von 2,65 t/h Stunde weitergerechnet. Bei der mobilen Pelletierung wurde der ermittelte Wert von 3,65 t/h bzw. 3,69 t/h (ohne Anfahrt zum Feld) genutzt.

Tabelle 2 Ermittlung der Strohpelletkosten frei Biogasanlage

	Einheit	Mobil	Teil-mobil	Teil-mobil (aus Zukauf Quaderb.)	Festinstallierte Anlage**	Container-Mietanlage
Pelletierleistung/Durchsatz pro Stunde	t/h	3,65	2,65	2,65	1,0	1,0
Pressen	€/t	- €	23,89 €		23,89 €	23,89 €
Ballentransport u. Einlagerung	€/t	- €	10,59 €		10,59 €	10,59 €
Zukauf Quaderballen frei BGA	€/t			100,00 €		
Pelletierung	€/t	79,57 €	138,09 €	138,09 €	111,54 €	170,06 €
Transport Feld-Hof	€/t	2,71 €	-	-		
Transport Hof-Hof	€/t	- €	1,38 €	1,38 €	1,38 €	1,38 €
Lagerung						
Lagerung Ballen (3 Monate) inkl. Lagerverluste	€/t	- €	8,30 €	-	8,30 €	8,30 €
Lagerung Pellets (3 Monate) inkl. Lagerverluste	€/t	4,32 €*	2,39 €	5,10 €*	2,32 €	2,47 €
Zinsansatz	€/t	0,62 €	1,30 €	1,80 €	1,11 €	1,54 €
Gesamtkosten frei BGA	€/t	84,51 €	185,94 €	246,37 €	159,12 €	218,23 €
<i>Stromgestehungskosten***</i>	<i>€/kWh</i>	<i>0,082 €</i>	<i>0,181 €</i>	<i>0,240 €</i>	<i>0,155 €</i>	<i>0,213 €</i>

*hier abweichend 6 Monate Lagerung Pellets **21 ct/kWh Strom; *** 9,97 kWh/m³ Methan, 41% Wirkungsgrad.

Die mobile Pelletierung stellt sich mit Gesamtvollkosten von 85 €/t am günstigsten dar. Es ergeben sich 8,2 ct pro kWh in der BGA erzeugtem Strom.

Die teil-mobile Variante ist insbesondere aufgrund der höheren Pelletierkosten von 138 €/t sowie der höheren Lagerkosten für Strohballen mit 185,9 €/t deutlich kostenintensiver und würde zu Stromgestehungskosten von 18,1 ct/kWh führen. Würde die Krone Premos im Jahresverlauf zu 50 % mobil und 50 % teil-mobil betrieben, ergäben sich Pelletierkosten von 135,2 €/t.

Würde man statt der Kosten für das Pressen und den Ballentransport Zukaufstroh (Ansatz: 100 €/t frei Anlage) einsetzen, so würden Kosten von rd. 246 €/t entstehen. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass im Zukaufpreis neben den Transportkosten zur Anlage der Nährstoffentzug des Stroh sowie eine Gewinnprämie des Verkäufers enthalten sind. Bei allen anderen Kalkulationen gilt die Annahme, dass der Nährstoffentzug des Stroh nicht berücksichtigt wird, da die Nährstoffe über die Gärrestzufuhr im Kreislauf verbleiben. Das Pelletieren mit einer festinstallierten Anlage direkt an der Biogasanlage kommt auf Gesamtkosten von 159,1 €/t bzw. Stromgestehungskosten von

15,5 ct/kWh. Mit einer Container-Mietanlage sind die reinen Pelletierkosten mit rd. 170 €/t am höchsten, da der Durchsatz nur eine Tonne pro Stunde beträgt und zum anderen zwei Arbeitskräfte benötigt werden. Die Stromgestehungskosten würden in diesem Fall 21,3 ct/kWh betragen.

Arbeitszeitbedarfs bei der Fütterung von Strohpellets

Die Ermittlung des Arbeitszeitbedarfs bei der Fütterung der Biogasanlage erfolgte einzeln für die Substrate Maissilage, Zuckerrüben, Rindermist und Strohpellets. Auf Basis der erfassten Daten wurde die Futtermenge pro Laderschaufel und pro Substrat in Minuten errechnet, um die Fütterungsmenge in Tonnen pro Stunde ermitteln zu können.

Tabelle 3 Ermittlung der Fütterungsmenge

Substrat	Entfernung vom Eintrag	Tonnen pro Stunde
Maissilage	40 m	42,8 t/h
Maissilage + Zuckerrübenschnitzel	40 m	65,5 t/h
Strohpellets	170 m	19,9 t/h
Rindermist	95 m	53,2 t/h
Zuckerrüben	20 m	77,9 t/h

In Bezug auf die betrachtete Biogasanlage ergibt sich aus den ermittelten Ergebnissen kein Mehraufwand bei der benötigten Fütterungszeit für Strohpellets, weil pro Stunde weniger Tonnage gegenüber Maissilage in das Eintragungssystem eingebracht wird. Aufgrund des Austauschverhältnisses von Maissilage (KTBL, 2013) zu Strohpellets von 1:0,45 müssten äquivalent zu 42,8 t/h Silomais 19,2 t/h Pellets gefüttert werden, um die gleiche Gasmenge aus den Substraten zu gewinnen. Mit 19,9 t/h wurde dieser Wert um 3,6 % überschritten. Darüber hinaus fallen je nach Lagerort der Pellets Arbeiten wie das Silo-Abdecken bei Maissilage weg.

Unter Berücksichtigung der Gasausbeute pro Tonne Pellets verursachen diese im Vergleich zu Silomais keinen Mehraufwand bei der Fütterung.

Darüber hinaus ließ die Arbeitszeitdokumentation während der Versuchsphasen keine Rückschlüsse auf eine Erhöhung des Arbeitszeitbedarfs für die Prozessüberwachung oder das Beheben von Störungen zu, die auf den Einsatz von Strohpellets hätte zurückgeführt werden können.

Eigenstromverbrauchs des Feststoff-Eintragungssystems

Zur Ermittlung des Eigenstromverbrauchs wurde gemeinsam mit einem Energieberater eine Messung zur Ermittlung des Stromverbrauchs des Eintragungssystems bei den verschiedenen Substraten durchgeführt. Entsprechend der technischen Machbarkeit auf der Biogasanlage des Versuchsgutes Relliehausen wurde der Stromverbrauch der Rohrförder- und der Steilförderschnecke mit einem Datenlogger während der Fütterung einer Substratmenge von 1500-2000 kg pro Substrat erfasst. Die Stromaufnahme der weiteren Aggregate wurde mit einem Zangenamperemeter und über die Anzeige der Frequenzumrichter die Stromaufnahme der Mischschnecken (links, rechts) und der Stopfschnecke gemessen.

Die Messung der Leistungsaufnahme der Rohrförder- und Steilförderschnecke ergab eine Spanne zwischen 2,13 kW (Häckselstroh) und 5,84 kW (Landschaftspflege-Gras). Für Silomais wurde ein Wert von 3,79 kW und für Strohpellets ein Wert von 4,29 kW ermittelt. Die zwei Mischschnecken im Futtermischer liefen konstant mit 9,73 kW bzw. 9,98 kW Leistung, die Stopfschnecke mit 1,51 kW.

Bezogen auf die Zeit, die für die Versuchsmenge des Substrates gebraucht wurde, wurde für Strohpellets ein vergleichsweise niedriger Stromverbrauch von 1,31 kWh pro Tonne Frischmasse ermittelt (Silomais: 5,28 kWh/t, Häckselstroh: 9,97 kWh/t, Rindermist 5,65 kWh/t, Zuckerrüben 2,54 kWh/t, Landschaftspflegegras 9,99 kWh/t).

Limitierend zu berücksichtigen ist, dass es sich jeweils um eine Einzelbetrachtung der Substrate handelt. Entsprechend kann nicht direkt auf den Verbrauch einer Substratmischung geschlossen werden, sondern es können lediglich Tendenzen abgeleitet werden.

Wirtschaftlichkeitsanalyse anhand verschiedener Szenarien

Ziel der prozessbezogenen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung war es, die Veränderungen der Vollkosten bei der Biogaserzeugung in Cent pro produzierte Kilowattstunde zu ermitteln, die beim Einsatz von Strohpellets anstelle von Maissilage bei den zu Beginn definierten Szenarien entstehen würden. In Anlehnung an die Größe der Versuchsanlage wurde angenommen, dass in allen Szenarien 4,4 Mio. kWh Strom pro Jahr (530 kW_{el}) bei einer Methanmenge von 1,05 Mio. m³ pro Jahr erzeugt werden. Das jeweilige Ausgangsszenario enthält keine Strohpellets im Substratmix.

Im Szenario mit Strohpellets wird so viel Silomais ersetzt, dass der rechnerische TS-Gehalt im Gärrest einen Wert von rund 10 % nicht überschreitet. Dies entspricht in etwa einem maximalen TS-Gehalt von 12 % im Fermenter, der für viele Biogasanlagen je nach installierter Rührtechnik ein Maxi-

mum darstellt (Kusch und Oechsner 2004; Reinhold 2019). Die Berechnung der TS-Prognose im Gärrest basiert auf dem Konzept zur Masse- und Trockensubstanzbilanzierung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen (Reinhold 2005).

Tabelle 4 Szenarien der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Szenarien		Substrat		Mais-silage	Zucker-rüben	Rinder-gülle	Rinder-mist	Stroh-pellets	TS-Gärrest
Rellehausen	V6	23,8	15.625	30,0	25,0	25,0	20,0	-	6,9 (8,5)
	V7	26,0	14.678	20,3	26,6	26,6	21,3	5,2	8,5 (10,0)
Nord-West	V3.1	25,0	14.177	60,0	-	40,0	-	-	6,3 (7,9)
	V3.2	28,8	12.816	47,1	-	44,2	-	8,6	8,8 (10,4)
NaWaRo	V4.1	32,0	10.190	75,0	25,0	-	-	-	6,5 (8,1)
	V4.2	34,1	9.710	69,8	26,2	-	-	4,0	7,81 (9,4)
	V4max	35,2	9.497	67,3	26,8	-	-	5,9	8,4 (10,0)
Gülleanlagen	V5.1	15,0	29.309	20,0	-	80,0	-	-	5,3 (6,8)
	V5.2	17,1	27.102	6,9	-	86,6	-	6,6	6,9 (8,4)
	V8	18,3	26.071	0,0	-	89,9	-	10,1	7,7 (9,3)
Ackerbauregion(en)	V9.1	25,1	13.776	50,0	20,0	30,0	-	-	5,8 (7,4)
	V9.2	29,6	12.264	33,8	22,5	33,7	-	10,0	8,7 (10,3)
Süd-Deutschland	V10.1	26,3	13.743	45,0	-	35,0	20,0	-	7,4 (8,9)
	V10.2	28,6	12.944	36,6	-	37,2	21,2	5,1	8,9 (10,5)

¹ Korrigierter Wert auf Basis des Biogas-Messprogramm III (Wert in Klammern: Rein rechnerischer Wert nach Reinhold (2005))

Die Gesamtsubstratkosten für jedes Szenario wurden auf Basis von regionsspezifischen Entfernungs- und Preisannahmen für die Regionen Nord-West, Ost und Süd durchgeführt und zugeordnet. Die entsprechende Datengrundlage hierfür wurde im Rahmen einer eigens durchgeführten Betreiberbefragung im Jahr 2021 geschaffen. Fehlende Preisangaben für einzelne Substrate wurden ggf. äquivalent zum Preis von Silomais auf Basis m³ Methan pro Tonne umgerechnet (KTBL 2013). Für Strohpellets wurden die jeweiligen Vollkosten pro Tonne frei Biogasanlage bei 1,26 €/l Diesel berechnet. Dabei wurden Lager- bzw. Silierverluste von 1 % bei Strohpellets und 12 % bei Silomais, Getreide-GPS und Gras in den Preisannahmen einkalkuliert (KTBL 2022). Auf Basis der

Datenerhebung bei der Fütterung wurden angelehnt an die KTBL-Daten Mehrkosten bei der Einbringung von Strohpellets in Höhe von 1,94 €/t angenommen.

Der Nährstoffentzugswert für die Strohabfuhr wurde bei den Pelletkosten aus der mobilen und teil-mobilen Variante nicht berücksichtigt. Diese Annahme ist allerdings betriebsindividuell zu überprüfen. Sie trifft zu, wenn die Gärrestrückführung auf die entsprechenden Flächen erfolgt und die Nährstoffe im Kreislauf verbleiben.

Der Gärrestanfall für die jeweiligen Szenarien wurde jeweils für den Gesamt-Substratmix errechnet, die Differenz zur jeweiligen Referenz ermittelt und anhand der regional vorherrschenden

Ausbringkosten bewertet. Der Lagerraumbedarf für Gärrest wurde ebenfalls berücksichtigt. Es wurde jeweils von einem Lagerraumbedarf von neun Monaten für flächenlose Betriebe entsprechend der Düngeverordnung ausgegangen (DüV 2020). Die Differenz im notwendigen Lagerraumbedarf wurde im Positiven sowie Negativen mit 6,1 €/m³ bewertet. Dieser Annahme liegen ein Gärrestlager mit Baukosten von rd. 91 €/m³, ein Abschreibungszeitraum von 20 Jahren und ein Zinssatz von 3 % sowie 100 % Fremdkapitalfinanzierung zu Grunde.

Die Änderung des TS-Gehaltes durch die Substrat-anpassung (siehe Ergebnisse) lässt Mehrkosten beim Eigenstrombedarf als Teil der variablen Kosten erwarten (Oechsner et al. 2018). Da die Ergebnisse bzw. Einschätzung im Rahmen der großtechnischen Versuche keine belastbaren Erkenntnisse darüber liefern konnten, wie sich der Eigenstrombedarf bei der Fütterung von Stroh-pellets insgesamt verändert, wurde hierfür ein rechnerischer Ansatz entwickelt, der die Änderung des Eigenstrombedarfs anhand des TS-Gehalts im Gärrest schätzt.

Wie in Abbildung 8 dargestellt, bieten Strohpellets aus mobiler Pelletierung mit Vollkosten von rd. 84,5 €/t die Möglichkeit den Gewinn nahezu gleich zu halten bzw. sogar einen betriebswirtschaftlichen Vorteil zu erreichen.

Der Ersatz von Mais (43,4 €/t inkl. Lagerverluste) kann hier zu einer Kostenreduktion führen, da dieser zu relativ hohen Anteilen durch Strohpellets ersetzt werden kann, die im Verhältnis günstiger sind. Die Substratkosten sinken insgesamt von 7,69 ct/kWh auf 7,19 ct/kWh in Szenario V5.2 bzw. 6,96 ct/kWh in Szenario V8. Darüber hinaus sinken die Gärrestausbringungskosten sowie die Kosten für das Vorhalten des Gärrestlagerraums. Die Mehrkosten des Eigenstrombedarfs werden unter den getroffenen Annahmen mehr als kompensiert. Ebenfalls positiv stellen sich die Ergebnisse bei den Szenarien V7, V3.2 und V9.2 dar, wobei der Effekt jeweils auf die günstigen Pellets zurückzuführen ist. Rechnet man den mobil hergestellten

Pellets 35 €/t hinzu, z.B. beim Zukauf von Stroh von Nachbarfeldern ohne Gärrestrückgabe, so sinkt der Gewinn in allen Szenarien gegenüber dem Basisszenario. Eine Minderung von bis zu 1,2 ct/kWh (V8 Gülleanlage) wurde ermittelt, was bei der Beispielanlage mit 530 kW_{el} einer Minderung um rd. 51.000 € pro Jahr entspricht. Mit steigendem Pelletpreis nimmt die Gewinnminderung bei steigendem Pelleteinsatz überproportional zu. Bei einem durchschnittlichen Gewinn von rund 4,2 ct/kWh (n=31 im Biogasmessprogramm III) würde durch den Pelleteinsatz insbesondere bei teil-mobil pelletiertem Zukaufstroh in den Szenarien V5.2, V8 und V9.2 ein Verlust entstehen (Barchmann et al. 2021). Anders kann sich dies darstellen, wenn Biomethan produziert werden soll. Wie eingangs erwähnt, wurde ein Biomethan-äquivalenter Preis von knapp 8,5 ct/kWh Biome-than (bezogen auf den Brennwert, H_s) angenommen. Während für Mais aktuell 9 ct/kWh H_s geboten werden, wären es bei Strohpellets unter Annahme von +15 CO₂eq/MJ¹ rd. 10 ct/kWh H_s bei Einfachanrechnung bzw. 14 ct/kWh bei Doppelanrechnung. Je nach Szenario würde sich bereits bei Einfachanrechnung der Einsatz von Strohpellets aus der teil-mobilen Pelletierung aus Zukaufstroh noch wirtschaftlich - ohne Gewinnminderung – darstellen lassen.

Hinweis: Das angenommene Verhältnis von Eigenstrombedarf zum TS-Gehalt im Gärrestendlager sowie die Aufteilung des Eigenstrombedarfs nach BHKW, Rührwerkstechnik, Einbringung und Sonstigem kann in der Praxis anlagenindividuell sehr unterschiedlich sein, so dass die Steigerungsrate des Eigenstromverbrauchs lediglich als theoretisch ermittelter Anhaltspunkt zu interpretieren ist, der je nach technischer Ausstattung der jeweiligen Anlage abweichen kann. Auch die Annahme, dass der Eigenstrombedarf linear mit dem TS-Gehalt im Fermenter ansteigt, ist zu prüfen.

¹ Hinweis: Überschlägig ermittelter Wert nach eigenen Ergebnissen. Unbedingt anlagenindividuell mit dem Zertifizierer je nach Beschaffung abklären lassen.

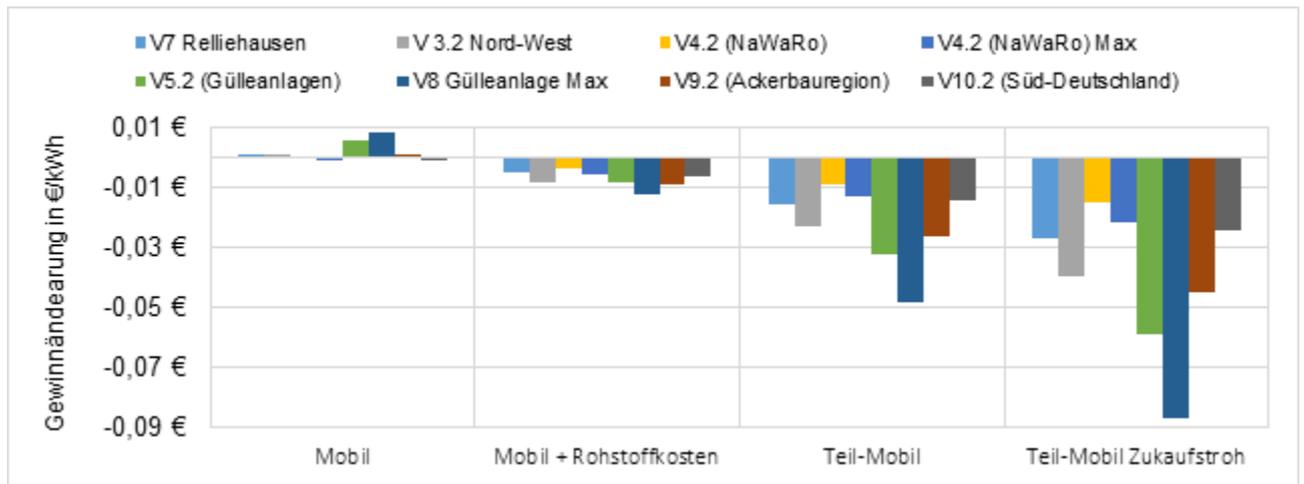


Abbildung 8: Mehrkosten des Strohpelleteinsatzes nach Szenarien (€/kWh Strom)

Gleichgewichtspreise

In der landwirtschaftlichen Praxis wird häufig über den Zukaufpreis von Substraten frei Biogasanlage diskutiert. Entsprechend wurde ein Gleichgewichtspreis von Strohpellets gegenüber Maissilage als auch Getreidekorn gebildet. Letzteres geschah vor dem Hintergrund, dass relativ viele Anlagen sowohl in der Betreiberbefragung als auch im Biogasmessprogramm III Getreidekorn als Substrat genannt haben und dieses vor allem bei Substratknappheit in Erwägung gezogen wird. Im Vergleich zu Silomais als Referenzsubstrat ergeben sich bei Gärrestverbringungskosten von 0 €/m³ (bei Kostenzuteilung der Ausbringung im Ackerbau, Abgabe ab Behälter) Gleichgewichtspreise zwischen 86,3 €/t und 131 €/t. Bei 5 € Ausbringkosten, was in etwa dem Durchschnitt der Angaben im Rahmen der Betreiberbefragung entspricht, ergeben sich Werte zwischen 93,0 €/t und 137,7 €/t. Bei höheren Gärrestausbringkosten von 10 €/m³ beträgt der Gleichgewichtspreis zwischen 99,7 €/t und 144,4 €/t.

In Tabelle 4 sind die Werte im Detail aufgeführt und der Preis für Getreidekorn als Äquivalent dargestellt. Strohpellets aus dem mobilen Pelletierverfahren können bei hohen Substratpreisen von über 45 €/t Silomais und/oder höheren Ausbringkosten für die Gärrestverbringung sowohl zu Mais als auch zu Getreidekorn konkurrenzfähig sein.

Zu berücksichtigen ist dabei, dass bei der Ermittlung der dargestellten Gleichgewichtspreise der Gärrestlagerraum mit 6,1 €/m³ angenommen wurde. Hierdurch sind Strohpellets und Getreidekorn im Vergleich zu Silomais etwas bessergestellt,

als wenn der Gärrestlagerraum nicht monetär bewertet werden würde.

Unter Berücksichtigung der Durchschnittspreise für Getreide in den letzten drei Jahren stellen Strohpellets unter günstigen Pelletierbedingungen eine wirtschaftlichere Alternative zu Getreidekorn dar: Bei einem Durchschnittspreis für Futterroggen in den Jahren 2019/20 bis 2021/22 von rd. 186 €/t (21/22: 286 €/t) plus der Kosten für das Mahlen/Schroten käme dieser höchstens bei 55 €/t Maissilage und Gärrestausbringkosten von 10 €/m³ als Biogassubstrat in Frage. Weizenkorn kommt unter den getroffenen Annahmen aufgrund höherer Produktpreise weniger in Betracht als Roggenkorn.

Im Vergleich zu Strohpellets ist der Gleichgewichtspreis von Häckselstroh bei Lagerverlusten von 3 % nur um 5 €/t bis 10 €/t niedriger, da der Methanertrag von Häckselstroh mit 232,3 m³ Methan pro Tonne Frischmasse nur um 7,5 % niedriger ist als der von Strohpellets. Der Fugatfaktor von Häckselstroh liegt mit 0,38 nahezu auf dem Niveau von Strohpellets (0,36). Diese Werte weichen deutlich von denen des KTBL ab, die einen Methanertrag für gehäckseltes Stroh von 161 m³ Methan pro Tonne Häckselstroh bei einem Fugatfaktor von 0,6 angeben. Das könnte darin begründet liegen, dass im Projekt nur eine einzelne Stichprobe bewertet wurde, die entsprechend nicht dazu geeignet ist, eine belastbare Aussage zur Ökonomie zu treffen (KTBL 2013). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass das Handling von Häckselstroh schwieriger ist und unter Umständen auch zu Fixkosten durch notwendige, bauliche Veränderungen führt, die im Rahmen des Projektes aufgrund der Fokussierung auf Strohpellets nicht betrachtet wurden.

Tabelle 5 Gleichgewichtspreis in Abhängigkeit von Maissilage und den Gärrestverbringungskosten

		Kosten Gärrestverbringung		
		0 €/m ³	5 €/m ³	10 €/m ³
		Strohpellets* Getreidekorn**	Strohpellets* Getreidekorn**	Strohpellets* Getreidekorn**
Mais- silage (35% TS) **	35 €/t	86,3 112,6	93,0 122,3	99,7 132,0
	40 €/t	97,5 127,0	104,2 136,7	110,7 144,9
	45 €/t	108,7 141,4	115,4 151,1	122,1 160,7
	50 €/t	119,9 155,8	126,5 165,5	133,2 175,1
	55 €/t	131,0 170,2	137,7 179,9	144,4 189,5

*anhand Gasausbeute aus AP1; **KTBL (2013); Lagerraumkosten 6,1 €/m³

inkl. 12 % Lagerverluste bei Maissilage; 1 % bei Strohpellets und Getreidekorn

Gesamtfazit der ökonomischen Betrachtung:

Die ökonomische Bewertung hat gezeigt, dass Strohpellets unter gewissen Voraussetzungen wie hohen Substratkosten, Substratknappheit und knappem Lagerraum für Gärrest eine gute Ergänzung für den Substratmix von Biogasanlagen darstellen können. Die Wirtschaftlichkeit des Strohpelleteinsatzes hängt dabei wesentlich von den Beschaffungs- bzw. Herstellungskosten ab. Das noch relative neue mobile Pelletierverfahren, bei dem direkt aus dem Strohschwad auf dem Feld pelletiert wird, hat sich nach den Erkenntnissen aus diesem Projekt als am kostengünstigsten erwiesen und bietet zudem – zumindest bei den im Rahmen des Projekts eingesetzten Maschinenmodellen - die Möglichkeit teil-mobil aus Quaderballen pelletieren zu können. Die Prozesskostenbetrachtung anhand der Szenarien hatte zum Ziel, die Gewinnänderung zwischen dem Basis-szenario und dem jeweiligen Szenario mit Strohpellets (Maisersatz durch Strohpellets bis zu einem maximalen TS-Gehalt im Gärrest von rechnerisch 10 %) unter Berücksichtigung der Gärrestverbringungs- und -lagerkosten sowie der Veränderung des Eigenstrombedarfs zu ermitteln. Unter günstigen Voraussetzungen bei der Pelletbeschaffung konnte aufgrund der Reduzierung der durchschnittlichen Substratkosten eine minimale Gewinnsteigerung im Vergleich zum Basisszenario ermittelt werden. Dies setzt jedoch die Annahme voraus, dass die Nährstoffe der Strohabfuhr über den Gärrest zurückgeführt werden und entsprechend nicht monetär bewertet werden. Bei Verwendung der teil-mobilen Pelletierung und insbesondere bei Verwendung von Pellets aus Zukaufstroh, bei dem die Nährstoffentzugskosten und der Gewinn des Strohverkäufers enthalten sind, nimmt die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung in allen Szenarien mit steigender Pelletmenge im Substratmix ab, da die Mehrkosten für die Strohpellets sowie der höhere Eigenstrombedarf die Einsparungen bei den Gärrestausring- und lagerkosten überlagern. Anhand der Gleichgewichtspreise von Strohpellets wird deutlich, dass diese als Biogassubstrat insbesondere bei hohen Gärrestverbringungskosten und hohen Substratpreisen wirtschaftlich vorteilhaft sein können. Dies gilt nicht nur im Vergleich zum Substrat Silomais, sondern insbesondere auch im Vergleich zu Getreidekorn, dass nach wie vor von vielen Anlagenbetreibern als Substrat eingesetzt wird und in den letzten drei Jahren verhältnismäßig teuer im Zukauf war.

Die im Gesamt-Abschlussbericht ermittelten Lagerrenten haben zudem gezeigt, dass bei Strohpellets im Vergleich zu etablierten Substraten wie Silomais und GPS-Getreide aufgrund der höheren Transportwürdigkeit längere Transportstrecken realisiert werden können. Unter Annahme der Vollkostendeckung wird bis zu Entfernungen zwischen 50 km und 80 km bei mobil hergestellten Pellets eine positive Lagerrente realisiert. Dies kann insbesondere vor dem Hintergrund eines Austausches von Strohpellets gegen Gärrest zwischen Biogasanlagen in Veredelungsregionen (Überschuss an org. Düngern) mit landwirtschaftlichem Betrieb in Ackerbauregionen (Überschuss an Stroh) praxisrelevant sein.

6. Zusammenfassung und Empfehlungen

Zusammenfassung

Abschließend ist festzustellen, dass Strohpellets unter bestimmten Bedingungen aus technischer, wirtschaftlicher und ökobilanzieller Sicht eine Substratalternative für die Biogasproduktion darstellen können. Strohpellets weisen durch hohe TS-Gehalte eine hohe Energiedichte und Methanerträge mit 251 NL/kg FM auf. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass nach der Vergärung ca. 15 % der eingesetzten Strohpelletmenge als Anteil aus Lignin, Cellulose und Hemicellulose nicht abgebaut wurden und somit bei Gärrestrückfuhr für den Humusaufbau zur Verfügung stehen. Ein großer Vorteil von Strohpellets ist außerdem die gute Transportwürdigkeit sowie die hohe Flexibilität in Hinblick auf die Einbringtechnik. Dadurch, dass ein gewisser Anteil Strohpellets mit Standard-Einbringtechnik ohne weiteres gefüttert werden kann, ist ein kurzfristiger, zeitweiser Einsatz von begrenzten Anteilen von Strohpellets jederzeit möglich. Positiv zu bewerten ist darüber hinaus, dass während der Projektlaufzeit eine zunehmende Tendenz der Verfügbarkeit von mobiler Pelletiertechnik sowie ein steigendes Interesse von Agrarhandelsunternehmen, Lohnbetrieben als auch Biogasanlagenbetreibern beobachtet werden konnte.

Zukünftige rechtliche Rahmenbedingungen beim Substrateinsatz sowie neue Erlöschancen durch den Einsatz von Reststoffen in den Bereichen Biomethan (Stichwort: Doppelanrechnung) und LNG lassen auf eine stärkere Dynamik bei der Steigerung der Strohpelletvergärung hoffen.

Empfehlung für das Vorgehen bei Einsatz von Strohpellets

Für den Einsatz von Strohpellets in Biogasanlagen wird folgendes Vorgehen empfohlen, um zu verhindern, dass die Rührfähigkeit des Fermenters zu stark abnimmt:

1. Vorab: Analyse der Trockensubstratgehalte im Fermenter und Gärrest-Endlager
2. Bei TS-Gehalten im Fermenter von > 10 %* wird davon abgeraten Strohpellets einzusetzen!
3. Beginn mit 1 % Frischmasse am Substrat-Mix. Tagesmenge für eine Woche nicht erhöhen.
4. Fermenter-Rührfähigkeit intensiv beobachten.
5. Erhöhung der Pelletmenge wöchentlich in kleinen Schritten (1 % pro Woche, bei einem Anteil von 3 % eine Pause bei der Erhöhung der Strohpelletmenge vornehmen).
6. Die regelmäßige Analyse des Fermenter-TS wird empfohlen.

**Falls Sie mit TS-Gehalten von >10 % im Fermenter bei ihrer Anlage grundsätzlich gut zurechtkommen, sollte dieser bei Umstellung des Substratmixes mit Strohpellets nicht weiter erhöht werden.*

Im Durchschnitt der Anlagen werden max. 3-5 % Strohpellets anteilig am Gesamt-Frischmasse-Input gefüttert werden können. Bei hohen Anteilen an Gülle und/oder Zuckerrüben im Substrat-Mix sind in Einzelfällen (ggf. vorübergehend) Mengen bis ca. 10 % der Frischmasse möglich.

Eine Vorab-Prognose des maximalen TS-Gehaltes ist rechnerisch möglich, ersetzt jedoch nicht die genaue Beobachtung durch den Anlagenbetreiber und die Begleitung von Analysen des Fermenter-inhalts.

Haftungsausschluss: Es handelt sich hierbei lediglich um eine Beratungsempfehlung auf Basis der Projektergebnisse. Wir übernehmen insbesondere keine Haftung für Handlungen, die auf Grundlage dieser Handlungsempfehlungen unternommen werden.

Literaturverzeichnis

- Ammon, F. (2019): Energiebündel. In: *Traction-Magazin* Juli/August 2019, S. 82–85.
- Barchmann, T.; Pohl, M.; Denysenko, V.; Fischer, E.; Hofmann, J.; Lenhart, M. et al. (2021): Biogas-Messprogramm III, Erstausgabe. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Gülzow-Prüzen.
- Düngeverordnung (DüV) (2020): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV). DüV, vom Düngeverordnung vom 26.05.2017 (BGBl. I S. 1305), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 28.04.2020.
- Holzhammer, A. (2023): Strohpellets statt Mais in der Biogasanlage. Hg. v. topagrar online. Online verfügbar unter: „<https://www.topagrar.com/technik/news/strohpellets-statt-mais-in-der-biogasanlage-a-13380421.html>“, zuletzt geprüft am 10.06.2023.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (2013): Faustzahlen Biogas. 3. Ausgabe. Darmstadt.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- KTBL (2022): Betriebsplanung Landwirtschaft 2022/23. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- Oechsner, H.; Nägele, H.-J.; Kress, P. (2018): Studie zur Effizienzmessung eines neuartigen und innovativen Rührwerks für Substrate in Biogasanlagen und dessen Strömungsverhalten. Abschlussbericht. Universität Hohenheim - Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie. Online verfügbar unter „https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/85193-Studie_zur_Effizienzmessung_eines_neuartigen_und_innovativen_R%C3%BCrwerks_f%C3%BCr_Substrate_in_Biogasanlage.pdf“, zuletzt geprüft am 10.06.2023.
- Statistisches Bundesamt (2023a): Durchschnittlicher Preis für Dieselkraftstoff in Deutschland in den Jahren 1950 bis 2023. Online verfügbar unter „<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuer-dieselmotorkraftstoff-seit-dem-jahr-1950/>“, zuletzt geprüft am 20.05.2023.
- Reinhold, G. (2005): Masse- und Trockensubstanzbilanz in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In: *Neue Landwirtschaft* 12, S. 68–72.
- VDI Richtlinie 4630 Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche, 2016-1