

**„Ansätze zur verstärkten Mobilisierung von
Landschaftspflegematerialien“**

Sonderbetrachtungen Saarland

Teilbericht V

Ecobiogaz

01.05.2012 – 30.06.2015



Ministerium für
Umwelt und
Verbraucherschutz
SAARLAND



Gefördert von:

IZES gGmbH
Institut für ZukunftsEnergieSysteme
Altenkesseler Str. 17
66115 Saarbrücken
Tel.: +49-(0)681-9762-840
Fax: +49-(0)681-9762-850
baur@izes.de

Nadja Carius
Claudia Ziegler
Sonja Kay
Katharina Laub
Dr. Joachim Pertagnol
Prof. Frank Baur

Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Landschaftspflegematerialien und sonstige schwer abbaubare Substrate	5
2.1	Landschaftspflegematerial.....	6
2.2	Festmist.....	7
2.3	Stroh.....	8
2.4	Grassilage	8
2.5	Hybridroggen.....	9
2.6	Miscanthus	9
3	Art der Biogasproduktion	10
3.1	Nassvergärung	10
3.2	Feststoffvergärung.....	10
4	Verfahren zur Vorbehandlung der Substrate	12
4.1	Physikalische Vorbehandlung	12
4.1.1	Thermische Verfahren	12
4.1.2	Mechanische Verfahren	13
4.1.3	Sonstige Verfahren zur Desintegration	14
4.2	Biologische Vorbehandlung.....	15
4.3	Vorgeschaltete Hydrolysestufe	16
4.4	Chemische Vorbehandlung	16
5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	17
6	Potenzial Biosphärenreservat Bliesgau	27
6.1	Landschaftspflege	27
6.2	Grünlandflächen	28
6.3	Festmist.....	29
6.4	Zusammenfassung.....	30
7	Fazit.....	31
	Quellenverzeichnis	32

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gasausbeute verschiedener Substrate	5
Abbildung 2:	Festmistlagerung am Feld	8
Abbildung 3:	Vergleich Wirtschaftlichkeit von Landschaftspflegegras mit/ohne Bioextruder 1	19
Abbildung 4:	Vergleich Wirtschaftlichkeit von Landschaftspflegegras mit/ohne Bioextruder mit externer Wärmeabgabe	20
Abbildung 5:	Vergleich Wirtschaftlichkeit von Rindermist mit/ohne Bioextruder ..	21
Abbildung 6:	Vergleich Wirtschaftlichkeit von Rindermist mit/ohne Bioextruder mit externer Wärmeabgabe	21
Abbildung 7:	Vergleich Wirtschaftlichkeit von Stroh mit/ohne Bioextruder	22
Abbildung 8:	Vergleich Wirtschaftlichkeit von Stroh mit/ohne Extruder mit externer Wärmeabgabe	23
Abbildung 9:	Vergleich Wirtschaftlichkeit von Maissilage mit/ohne Bioextruder ..	24
Abbildung 10:	Vergleich Wirtschaftlichkeit von Maissilage mit/ohne Bioextruder mit externer Wärmeabgabe	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eigenschaften Lignin-/Cellulose-reicher und –armer Substrate	6
Tabelle 2:	Herausforderungen Landschaftspflegematerial	7
Tabelle 3:	Investitionskosten und Energiebedarf mechanischer Vorbehandlungsmethoden am Beispiel einer 500kW Biogasanlagen bzw. 1 t Silage,	13
Tabelle 4:	Kennwerte Bioextruder	17
Tabelle 5:	Zusammenfassung Wirtschaftlichkeit Bioextruder	25
Tabelle 6:	Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeit des Bioextruders (EEG 2014) ..	25
Tabelle 7:	Deckungsbeiträge der einzelnen Substrate	26
Tabelle 8:	Berechnung des „freien“ Energiepotenzials von Grünlandflächen	29
Tabelle 9:	Biogas- und Energiepotenzial aus Festmist (gerundet)	30
Tabelle 10:	Zusammenfassung Potenzial Landschaftspflegematerial und sonstige „schwierige“ Substrate	30

1 Einleitung

Während für die leicht anaerob abbaubaren Substrate umfangreiche Erkenntnisse zu den Abbaumechanismen/-verfahren sowie den (wirtschaftlichen) Effekten vorliegen, sind bislang für die – insbesondere im Reststoffsektor anfallenden – schwer abbaubaren Substrate bislang nur wenige belastbare Erfahrungen verfügbar. Schwer in Biogasanlagen (BGA) abbaubare Substrate sind dabei insbesondere Biomassen mit hohen Trockensubstanzgehalten sowie hohen Anteilen an Lignin und Cellulose. Hierzu gehören Reststoffe wie Landschaftspflegematerialien, Festmist und Stroh sowie einzelne Anbaubiomassen wie z. B. Grassilage und Hybridroggen.

Im folgenden Bericht werden die Möglichkeiten dargestellt, diese schwer abbaubaren Substrate in BGA zu verwerten. Dabei werden insbesondere Verfahren berücksichtigt, die einen Aufschluss der Biomasse bewirken sowie Vergärungstechnologien im Sinne der Trockenfermentation, die mit höheren Trockensubstanzgehalten gefahren werden können. Auf der Basis einer Literaturrecherche erfolgt dabei – unterstützt durch Expertenbefragungen – eine differenzierte Aufbereitung der Thematik hinsichtlich der relevanten Substrate sowie der anwendbaren Vergärungs- und Vorbehandlungsmethoden. Ein wesentliches Ziel ist dabei Ansätze zu identifizieren die im Kontext einer technischen Umsetzbarkeit einen Beitrag zur Mobilisierung und Nutzung „schwieriger“ Biomassen leisten können. Die in diesem Zusammenhang zu berücksichtigenden, teilweise durchsatzabhängigen ökonomischen Effekte werden im Rahmen einer ergänzenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung analysiert.

Unter Berücksichtigung der erzielten Erkenntnisse wurde abschließend im Hinblick auf mögliche regionale Projektierungsansätze in der Großregion eine Bestandsaufnahme der im saarländischen UNESCO-Biosphärenreservat Bliesgau verfügbaren Potenziale an Landschaftspflegematerial, Gras sowie landwirtschaftlichen Reststoffen in Bezug auf deren Masse sowie Energieertrag durchgeführt. In diesem Zusammenhang erfolgte ein wechselseitiger Informationsaustausch mit dem parallel laufenden Vorhaben „ARBOR“ (INTERREG IV B NWE)¹ sowie dem „Masterplan 100 % Klimaschutz“ des Biosphärenzweckverbandes².

Alle im Rahmen der Untersuchungen beschriebenen und hergeleiteten rechtlichen und wirtschaftlichen Sachverhalte basieren auf den in Deutschland im Frühjahr 2014 gültigen Rahmenbedingungen.

¹ ARBOR - Accelerating Renewable Energies through Valorisation of Biogenic Organic Raw Material, Improving sustainable biomass utilization in North West Europe – Interreg IVB NEW Projekt (2011-2015)

² „Masterplan 100 % Klimaschutz im Biosphärenreservat Bliesgau“ – Förderprogramm des BMU (2013-2014)

2 Landschaftspflegematerialien und sonstige schwer abbaubare Substrate

Biomassen mit hohen Anteilen an Lignin, Cellulose oder Hemi- Cellulose (z. B. Stroh, Holz) sind nur bedingt³ nutzbar für die Biogasproduktion. Durch einen hohen Lignin-gehalt und ausgeprägte Markstrukturen mit Hohlräumen und Fettschichten kommt es häufig zur Ausbildung von Schwimmschichten und „Zopfbildungen“ im Fermenter. Des Weiteren führt ein rein auf die substratspezifisch erzielbare Gasproduktion fokussierter Blick zur Einschätzung einer eher geringen Eignung und Nutzbarkeit dieser Substrate. Die nachfolgende Abbildung 1 gibt diesbezüglich einen Überblick über die erzielbaren Gaserträge unterschiedlicher Substrate.

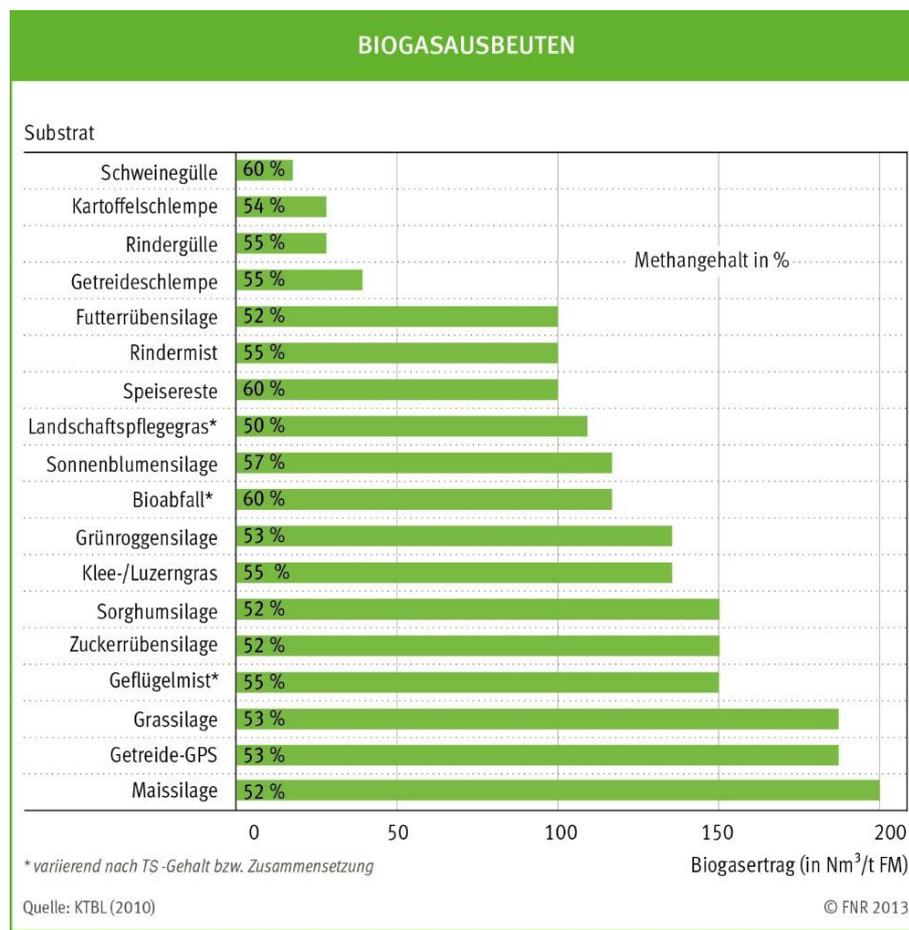


Abbildung 1: Gasausbeute verschiedener Substrate⁴

Trotz der obigen Effekte können diese ligninhaltigen Einsatzstoffe jedoch auch einen wichtigen Beitrag für ein ausgewogenes Nährstoffverhältnis im Fermenter leisten, ins-

³ Notwendigkeit zur Aufbereitung, Vorbehandlung bzw. zum Aufschluss sowie Einsatz geeigneter Vergärungstechniken

⁴ FNR, 2013d

besondere durch die Reduktion des Kohlenstoffmangels bei der gemeinsamen Vergärung mit eiweißhaltigen Substraten wie z.B. Hühnergülle, Trockenkot sowie Fleisch- und Schlachtabfällen.⁵

Nachfolgend werden die potenziellen, tendenziell eher ligninhaltigen Einsatzstoffe kurz charakterisiert. Relevante, substratspezifische Kennwerte können der folgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Eigenschaften Lignin-/Cellulose-reicher und –armer Substrate⁶

Substrat	TS [%]	oTS [%]	Cellulose [%]	Hemicellulose [%]	Lignin [%]	C [%]	N [%]	C:N	Gas-ertrag [l _N /kg oTM]	Methan-gehalt [%]
Festmist	25	85					1,5	8:1	450	55
Stroh	86	90	38	29	15	45	0,48	100:1	400	52
Grassilage	35	90				41	0,87		600	53
Landschaftspflegegras	50	85				45	1,34		200 – 400 (abhängig vom Lignin-Gehalt)	50
Miscanthus			43	24	19	47	0,73		365	
Maissilage	33	95	28	9,83	7	50	1,17	40:1	650	52

2.1 Landschaftspflegematerial

Landschaftspflegematerial ist indifferent und inhomogen. Die Bestandteile reichen von frischen, weichen Materialien bis hin zu verholzten, harten Substraten, die auch in angefaulten bis verfäulerten Form vorliegen können. Störstoffe wie Holz, Steine und Abfälle können zudem ein Problem bei der Vergärung darstellen.⁷

Landschaftspflegematerial und Landschaftspflegegras werden in der Biomasseverordnung gemäß EEG 2012 Einsatzstoffvergütungskategorie II wie folgt definiert: „Als Landschaftspflegematerial gelten alle Materialien, die bei Maßnahmen anfallen, die vorrangig und überwiegend den Zielen des Naturschutzes und der Landschaftspflege im Sinne des Bundesnaturschutzgesetzes dienen und nicht gezielt angebaut wurden. Marktfrüchte wie Mais, Raps oder Getreide sowie Grünschnitt aus der privaten oder öffentlichen Garten- und Parkpflege oder aus Straßenbegleitgrün, Grünschnitt von Flughafengrünland und Abstandsflächen in Industrie- und Gewerbegebieten zählen

⁵ LEHMANN & Fraunhofer IKTS 2011, 1-2

⁶ KTBL, 2009 + KTBL, 2006

⁷ LEHMANN & Fraunhofer IKTS 2011, 9-10

*nicht als Landschaftspflegematerial. Als Landschaftspflegegras gilt nur Grünschnitt von maximal zweischürigem Grünland.*⁸

Die energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial wird nach dem EEG 2012 zusätzlich zur leistungsabhängigen Grundvergütung von 6 bis 14,3 ct/kWh_{el} mit dem Nach Einsatzstoffvergütungsklasse II von 8 ct pro kWh erzeugtem Strom gefördert. Mit dem EEG 2014 und dem Wegfall der Einsatzstoffvergütungsklassen ist eine höhere Vergütung für Landschaftspflegematerialien nur noch über die Bioabfallvergütung möglich.

Im Hinblick auf die Bereitstellung von Landschaftspflegematerialien fasst Tabelle 2 die Herausforderungen bei der Ernte und der Silierung dieser Materialien zusammen.

Tabelle 2: Herausforderungen Landschaftspflegematerial⁹

	Verteilung auf viele kleine Flächen	Landschaftspflegematerial fällt häufig in kleinen Mengen und an verschiedenen Stellen an. Das erschwert die Logistik, Transportkosten steigen und die Energiebilanz kann sich bei längeren Transportwegen signifikant verschlechtern.
Ernte	Schlechte Befahrbarkeit	Oft handelt es sich um feuchte, unebene, steile oder sehr trockene Flächen, auf denen Landschaftspflegematerial anfällt. Die Gewinnung ist auf diesen Flächen weitaus aufwändiger als z. B. auf einem gut befahrenen Acker.
	Geringe Erträge	Landschaftspflegematerial bringt geringere Hektarerträge als Anbaubiomasse (Mais, Ganzpflanzensilage u.a.). Dadurch sind die Erntekosten je Tonne höher.
Silierung	Silierung	Landschaftspflegematerial fällt zu unterschiedlichen Zeiten im Jahr an. Das erschwert eine Silierung in Fahrsilos. Die Silierung in Ballen führt zu höheren Kosten.

2.2 Festmist

Festmist setzt sich aus tierischen Exkrementen, Einstreu und Futterresten zusammen. Dabei ist die Zusammensetzung abhängig von der Tierart und dem Verhältnis der Einstreumenge zur Exkrementmenge¹⁰.

Beim Einsatz von Festmist als Biogassubstrat besteht durch den hohen Trockensubstanzgehalt dieses Materials die Gefahr der Schwimmdeckenbildung im Fermenter. Putenmist und Hühnertrockenkot können zudem durch ihren hohen Stickstoffgehalt den Fermentierungsprozess hemmen.¹¹

⁸ EEG 2012 Einsatzstoffvergütungsklasse II

⁹ Eigene Darstellung nach DVL 2012

¹⁰ KTBL 2011

¹¹ NOVATECH GmbH 2013



Abbildung 2: Festmistlagerung am Feld¹²

2.3 Stroh

Nach der Getreideernte bleiben die Getreidehalme (Stroh) übrig. Diese besitzen einen hohen Trockensubstanz und – Ligningehalt. Im Bereich der ackerbaulichen Biomasse-Reststoffe weist Getreidestroh das höchste Potenzial in Deutschland auf¹³ und stellt ein lagerstabiles und einfach handhabbares Substrat da.¹⁴

Eine Strohmonovergärung wird bislang kaum praktiziert, da es ohne entsprechende Vorbehandlung zu Problemen in folgenden Bereichen kommen kann:

- Rührfähigkeit
- Aufschwimmverhalten
- Gasaustausch im Fermenter
- Nährstoffversorgung
- Biologische Abbaubarkeit des Materials

Im EEG 2012 wird Stroh in der Einsatzstoffklasse II eingeordnet.

2.4 Grassilage

Gras stellt besondere Anforderungen an die Biogasanlage und die Technik der Vergärung. Damit Gras ohne eine weitergehende Vorbehandlung im Fermenter vergoren werden kann, ist ein möglichst niedriger Trockensubstanzgehalt bzw. ein geringer Anteil an Lignin notwendig. Entscheidend hierfür sind die jeweiligen Standortbedingungen, die botanische Zusammensetzung sowie die Organisation des Schnittregimes. So steigen beispielsweise bei einem Schnitt im Spätsommer der Verholzungsgrad und der Ligninanteil.

Gras für Biogasanlagen wird in der Regel als Silage konserviert. Allgemein gilt dabei, dass Gras sich umso besser zur Silierung und anaeroben Vergärung eignet, desto kürzer die Häcksellänge ist. Um eine Schwimmdeckenbildung zu verhindern, sollte die Grassilage daher vor der Einbringung in den Fermenter zerkleinert werden.¹⁵ Gras-

¹² Eigenaufnahme IZESgGmbH

¹³ DBFZ, 2013

¹⁴ LEHMANN & Fraunhofer IKTS 2011, 6

¹⁵ Elsässer et al. 2012, 6

substrat enthält zudem meist einen relativ hohen Erd- und Steinanteil, der im Fermenter durch Sedimentation zur Verringerung des Gärraumvolumens und während der Silierung zu Schäden an der Einrichtung führen kann.¹⁶

Bei Kleeegrassilage besteht die Gefahr der Prozesshemmung durch den hohen Stickstoffgehalt.¹⁷

Gras wird in die Einsatzstoffklasse I im EEG 2012 zugeordnet.

2.5 Hybridroggen

Hybridroggen kann mit 70 % TS- Gehalt siliert und als Ganzpflanze in Biogasanlagen genutzt werden. Er gilt als gute Alternative zum Mais, um den Bodenwert zu verbessern und eine günstige Fruchtfolge zu etablieren.¹⁸

Hybridroggen gehört zu den Einsatzstoffklasse I im EEG 2012.

2.6 Miscanthus

Das Biogas Forum Bayern bescheinigt Miscanthus ein kein hohes Ertragspotenzial und eine Eignung als Substrat für Biogasanlagen. Bei der Ernte an dem für Miscanthus üblichen Zeitpunkt ist die Biomasse sehr stark verholzt, während ein früherer Sommerschnitt zu Wuchsdepressionen und massivem Ertragsverlust im Folgejahr führt. Die dadurch im Regelfall anfallende, verholzte Miscanthus- Ernte muss vorbehandelt werden, um als Substrat eingesetzt werden zu können.

Im EEG 2012 wird Miscanthus in der Einsatzstoffklasse I eingeordnet.

¹⁶ Elsässer et al. 2012, 6-8 und DBFZ 2013, 207-8

¹⁷ NOVATECH GmbH 2013

¹⁸ LEHMANN & Fraunhofer IKTS 2011, 5

3 Art der Biogasproduktion

Die Biogasproduktion unterscheidet sich in zwei grundlegende Vergärungstechniken, die Nassvergärung und die Feststoffvergärung. Diverse landwirtschaftliche Substrate (z.B. Stroh, Landschaftspflegematerialien) zählen im Bereich der Nassfermentation trotz technischer Weiterentwicklung im Bereich der Aufbereitungstechniken, Einbringung und Rührwerke, als schwierige vergärbare Substrate. Die Trockenfermentation bietet hier neue Lösungsansätze. Im Folgenden werden die beiden Verfahren zwecks Einsatzbereich und Nutzung in der Landwirtschaft gegenübergestellt.

3.1 Nassvergärung

Bei der landwirtschaftlichen Biogasproduktion wird hauptsächlich das Verfahren der Nassfermentation eingesetzt, bei der das Substratgemisch im Rahmen einer kontinuierlichen Einspeisung in flüssiger Form mit Trockensubstanzgehalten kleiner 15 % vergoren wird. Die Biogasreaktoren werden meist im mesophilen Bereich betrieben und der Gärrest kann im Anschluss als flüssiger Wirtschaftsdünger genutzt werden.¹⁹ Während für die typischen Biogassubstrate wie z.B. Maissilage bereits umfangreiche Erfahrungswerte vorliegen und ein sicherer Anlagenbetrieb ohne größeren Aufwand erreicht werden kann, sind beim Einsatz der in Abschnitt 2 dargestellten schwierigeren Substrate (z.B. als Co- Substrat) u.a. folgende betriebstechnischen Probleme zu erwarten:

- Störung der Zuführ- und Rührtechnik (Blockierung der Paddel, etc.)
- Schwimm- und Sinkschichten
- Dickenflüssiger Gärrest

Um die obigen Probleme zu vermeiden müssen die entsprechenden Substrate bei einem Einsatz in einer Nassfermentation, je nach Beschaffenheit, mit den im folgenden Kapitel 4 beschriebenen Methoden vorbehandelt werden. Ziel ist dabei, das schwer in Biogasanlagen abbaubare Material aufzuschließen und für die Mikroorganismen besser zugänglich zu machen.

Tendenziell werden in Nassvergärungsanlagen (insbesondere Bestandsanlagen) schwierige Substrate eher als (geringerer) Teilstrom im Sinne eines Co- Substrates eingesetzt.

3.2 Feststoffvergärung

Im Gegensatz zur Nassfermentation wird bei der Feststoffvergärung, auch Trockenfermentation genannt, Biomasse mit einem Trockenmasse- Gehalt in einem Bereich von 20 bis 40 % eingesetzt. Man unterscheidet dabei Batch- Prozesse und kontinuierlich arbeitende Verfahren. Beim Batch- Prozess wird das stapelbare Frischsubstrat entweder gemischt oder schichtweise z.B. per Radlader in den

¹⁹ DVL und NABU 2007, 12-13

Fermenter (Box) eingebracht und ruht dort über einen definierten Zeitraum. Die Flüssigkeit (das Perkolat) die sich während der Vergärung am Boden des Fermenters ansammelt und mikrobiologisch hoch aktiv ist, wird aufgefangen und in regelmäßigen Abständen in einem Kreislauf auf das eingebrachte Substrat rückgeführt. Die Gärreste werden teilweise als Impfmateriale verwendet.²⁰ Bei kontinuierlich arbeitenden Verfahren z.B. im Sinne von Pfropfenstromreaktoren wird dagegen das Substrat kontinuierlich zugegeben und in einem definierten Stoffstrom durch die (liegenden oder stehenden) Fermenter geführt. Rühr- oder Pumpwerke dienen dabei der Umwälzung, unterstützen aber in erster Linie den Gasaustrag. Umfangreiche Erfahrungen mit der Feststoffvergärung liegen insbesondere im Abfallbereich vor (Bioabfälle).

Strukturreiche, verholzte und strohartige Biomassen können grundsätzlich mit dem Trockenfermentationsverfahren vergoren werden. Mögliche Probleme wie z.B. Sedimentationsprozesse sind dabei gemäß den bisherigen Erfahrungen beherrschbar. Dadurch kann energetisch bisher wenig genutztes Material wie z.B. Grüngut, Festmist und Landschaftspflegematerial eingesetzt werden, welches ansonsten in der Nassfermentation nur mit einem erhöhten energetischen Aufwand im Rahmen einer Vorbehandlung gemäß Abschnitt 4 verarbeitet werden könnte. Holzartige Biomasse kann dabei bis zu einem Anteil von 20 % des Gesamtsubstrates mit vergoren werden.²¹ Im Hinblick auf die erzielbaren Gaserträge sind jedoch auch hier Vorbehandlungsverfahren gegebenenfalls sinnvoll.²²

²⁰ KTBL 2013, 62; DVL und NABU 2007, 13-14

²¹ DVL und NABU 2007, 13-14

²² Holzartige Biomasse stört zwar kaum den Prozess, trägt aber auch kaum zum Gasertrag bei.

4 Verfahren zur Vorbehandlung der Substrate

Eine Substrataufbereitung für die Fermentation ist von den jeweiligen Ausgangsstoffen sowie der jeweiligen Anlagentechnik abhängig und soll die Gasausbeute erhöhen und damit die Effizienz der Anlage verbessern.²³ Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen besonderen Eigenschaften von schwer abbaubaren Substraten machen dabei eine Vorbehandlung in den meisten Fällen notwendig. Ziele der Vorbehandlung sind die Vergrößerung der Oberfläche sowie der (Lignin-) Aufschluss im Hinblick auf einen verbesserten Abbau der Substanzen durch Mikroorganismen im Sinne einer Desintegration sowie die Minimierung der Verklumpung im Fermenter.²⁴

Um das Abbauverhalten von sogenannten „schwierigen“ Substraten im Fermenter zu verbessern, werden dabei die Ligninstrukturen durch unterschiedliche Verfahren weitgehend aufgebrochen und die stoffwechselfähigen Zellulose- und Hemizellulosestrukturen freigelegt. Hinsichtlich der einzelnen Verfahrenstypologien wird zwischen physikalischen, biologischen und chemischen Verfahren der Vorbehandlung unterschieden.

4.1 Physikalische Vorbehandlung

4.1.1 Thermische Verfahren

Optimal für die thermische Vorbehandlung zur Erhöhung der Biogasausbeute ist ein Temperaturbereich von 150 bis 190°C. Hier kommt es zur Auflösung von Hemizellulose und ab 160°C zur Auflösung von Lignin. In niedrigeren Temperaturbereichen ist kein signifikanter Aufschluss von Lignozellulose feststellbar, in höheren Temperaturbereichen kommt es zur verstärkten Bildung von Hemmstoffen sowie letztendlich zur Pyrolyse/Vergasung. Die Thermodruckhydrolyse, eine Vorbehandlung mit optimalen Prozesstemperaturen und hohem Druck ermöglicht eine hohe Aufschlussleistung ohne Chemikalien. Das Verfahren ist technisch anspruchsvoll und mit den höchsten Investitionskosten im Vergleich der Vorbehandlungsverfahren verbunden. Im Hinblick auf eine Verbesserung der Energiebilanz kann es aber mit der Abwärme des BHKWs betrieben werden.²⁵

Die thermisch induzierte Hydrolyse ist jedoch laut Auskunft des Fraunhofer Institutes UMSICHT²⁶ für nachwachsende Rohstoffe wirtschaftlich uninteressant. Hier seien eine sehr starke Zerkleinerung und der Einsatz von Enzymen effektiver. Interessant werde dieses Verfahren allerdings im Zusammenhang mit einer ohnehin erforderlichen Hygienisierung von Bioabfall.

Entsprechende Anlagen zur thermischen Vorbehandlung der Substrate wurden bislang durch die Firmen Demetrium Deutschland AG aus Kaiserslautern und R. Scheuchl GmbH aus Ortenburg konzipiert und gebaut.

²³ FNR 2013b

²⁴ DBFZ 2013, 208

²⁵ Schwarz 2012, 14 und DBFZ 2013, 210

²⁶ Telefonat mit Hr. Jung, Gruppenleiter Biogas, Abwasser, Phosphor, 27.03.2014

Anlagen der Firma Scheuchl (Thermodruckhydrolyse) werden aktuell aufgrund mangelnder Nachfrage bzw. ausbleibender Effekte nicht mehr gebaut. Die Demetrium Deutschland AG, deren Kerngeschäft die thermisch induzierte Hydrolyse war, meldete im Juni 2013 Insolvenz an.

4.1.2 Mechanische Verfahren

Bei den mechanischen Verfahren werden die Substrate durch Mahlen (Druck, Prall), Scherung oder Extrusion (Druck, Reiben, Zerkleinern) zerkleinert und so ihre Partikelstruktur verändert.²⁷ Die höchste Zerkleinerungswirkung wird mittels Extruder erreicht, jedoch mit hohem Energieverbrauch und begrenzter Durchsatzleistung. Der Prallreaktor sorgt bei großem Durchsatz für eine starke Zerkleinerung bei jedoch ebenfalls sehr hohem Energieeinsatz.

Der Einsatz einer Hammermühle sowie die Zerkleinerung mittels Schneidmühle weisen ähnliche Durchsatzleistungen wie Extruder bei gleichem Energieaufwand auf. Beachtet werden muss auch der je nach Substrat sehr hohe Verschleiß einzelner Anlagen-Teile sowie je nach Standort der Anlage die Lärmentwicklung, vor allem bei der Hammermühle und dem Prallreaktor.²⁸

In Tabelle 3 sind die Investitionskosten der einzelnen Verfahren und der jeweilige Energiebedarf dargestellt.

Die jeweiligen Techniken sind sehr gut verfügbar und eine Nachrüstung für bestehende Anlagen ist einfach umsetzbar. Mechanische Verfahren führen dabei – gemäß den bisherigen Erfahrungen - zu einer erhöhten Faulraumeffizienz. Allerdings ist auch der Energieeinsatz sehr hoch, sodass hier für jeden einzelnen Fall im Rahmen einer ganzheitlichen Energiebilanz die Energieaufwände und die potenziellen Energiegewinne gegeneinander abgewogen werden müssen.²⁹

Tabelle 3: Investitionskosten und Energiebedarf mechanischer Vorbehandlungsmethoden am Beispiel einer 500kW Biogasanlagen bzw. 1 t Silage^{30,31}

Technologie	Investitionskosten [€]	Energiebedarf [kWh/t Silage]
Extruder	75.000 – 90.000	6 – 14
Prall	75.000 – 90.000	7 – 10
Mühlen	15.000 – 35.000	1 – 9

²⁷ Schwarz 2012, 17ff.

²⁸ Thrän et al. 2013, 21-22

²⁹ Schwarz 2012, 32

³⁰ Schwarz 2012, 29-30

³¹ Schwarz 2012, 29-30

Der (thermo-) mechanische Aufschluss von Biomasse durch einen Extruder wird nachfolgend am Beispiel des Bioextruders der Firma LEHMANN Maschinenbau GmbH sowie des Bioaccelerators der Firma BTS Biogas erläutert.³²

Der **Bioaccelerator** der Firma BTS ist ein Biomasse- Zerfaserer und sorgt durch Hämmer und rotierende Zerfaserungselemente für einen mechanischen Aufschluss. Durch den Zerfaserungsprozess kommt es zu einer Temperaturerhöhung des Extruderinhaltes. Je nach Substrat kann nach Herstellerangaben ein um 5 bis 35 % erhöhter Gasertrag erreicht werden. Außerdem wird eine erhöhte biologische Stabilität im Fermenter unterstellt sowie ein höheres Bakterienwachstum und dadurch bedingt ein besserer Zugang und ein schnellerer Aufschluss der Substrate. Der holzige Anteil im Landschaftspflegematerial muss jedoch vor Einbringung in den Accelerator abgesiebt werden. Der Stromverbrauch des Bioaccelerators wird nach Herstellerangaben ausgeglichen durch einen geringeren Verbrauch der Rührwerke im Fermenter, bedingt durch die Vorbehandlung der Substrate.³³ Der Durchsatz beträgt 70 bis 150 kg pro Minute, abhängig vom Trockensubstanzgehalt des Inputmaterials sowie der Anlagengröße, bei einer Anschluss- Leistung von 75 bis 90 kW.³⁴

Der **Bioextruder** der Firma LEHMANN Maschinenbau GmbH war ein Doppelschneckenextruder, der das Substrat hydrothermal aufschließt. Ligninstrukturen wurden dabei weitgehend aufgebrochen um die verstoffwechslungsfähigen Zellulose- und Hemicellulosestrukturen für die Mikroorganismen im Fermenter freizulegen. Das Substrat wurde zwischen zwei gegenläufigen Schnecken einer schnell wechselnden Beanspruchung durch Druck- und Temperaturspitzen ausgesetzt, in deren Folge eine Strukturauflösung stattfindet.³⁵ Nach Tests der Firma Lehmann im Rahmen eines Förderprogramms des Bundesumweltministeriums steigere dies die Gasausbeute um ca. 30 % bei GPS (Hybridroggen), Gras- und Rapssilage sowie um 60 % bei Rindermist.³⁶ Die Kosten für den Bioextruder variieren je nach Größe und Ausführung zwischen 80.000 und 200.000 Euro. Empfohlen wird außerdem die Vorschaltung eines Detektorbandes zur Aussortierung von Steinen und Metall, dessen Kosten sich auf ca. 15.000 Euro belaufen.³⁷ Die Firma LEHMANN Maschinenbau GmbH beantragte im Mai 2014 die Insolvenz.

4.1.3 Sonstige Verfahren zur Desintegration

Zum Aufschluss können Biomasselpartikel grundsätzlich auch mittels Ultraschall oder elektrokinetische Impulse bearbeitet werden, um den Abbau durch die Mikroorganismen zu erleichtern und die Biogasproduktion zu erhöhen. Diese

³² LEHMANN & Fraunhofer IKTS 2011, 6-7

³³ Persönliche Auskunft von Frau Bettina Müller, BTS Biogas, Biologie-Abteilung, 07.04.2014; BTS Biogas 2013

³⁴ BTS Biogas 2013

³⁵ Lehmann & Fraunhofer IKTS 2011

³⁶ Lehmann 2012

³⁷ Persönliche Auskunft von Frau Janine Elliott, Lehmann Maschinenbau GmbH, Vertrieb, 10.04.2014

Methoden lassen sich auch nachträglich in die Anlage integrieren, in der Regel durch ein Bypass-Röhrensystem zum Fermenter.³⁸

Die Firma Vogelsang hat neben Maschinen für den mechanischen Aufschluss von Biomasse auch ein elektrokinetisches Desintegrationsverfahren entwickelt, den sogenannten **BioCrack**. In dieser Anlage wird ein Hochspannungsfeld erzeugt, das für eine Zerkleinerung von Zusammenballungen aus Materie sorgt. Dadurch soll die Verfügbarkeit von Nährstoffen für die fermentierenden Bakterien erhöht werden. Die Biogasausbeute kann so nach Herstellerangaben um ca. 6 bis 10 Prozent erhöht werden. Ein erweitertes System der Substratvorbehandlung bietet die Kombination des RotaCuts mit dem BioCrack. Der **RotaCut** ist ein Nasszerkleinerer und Schwergutabscheider der Firma Vogelsang. Gegebenenfalls kann noch der **EnergyJet** der Firma Vogelsang nachgeschaltet werden für die Flüssigfütterung des Fermenters. Grob überschlagen belaufen sich die Investitionskosten auf ca. 8.500 Euro für den RotaCut, ca. 12.500 Euro pro Modul des BioCrack, wobei ein Modul konzipiert ist für den Durchsatz einer 125 kW- Anlage, sowie auf 20- 25.000 Euro für den EnergyJet.³⁹

4.2 Biologische Vorbehandlung

Die biologischen Verfahren zielen auf eine Beschleunigung der Hydrolyse ab. Durch einen Einsatz von entsprechenden Enzymen konnte dabei z.B. im Rahmen von Versuchen eine bessere Zuckerfreisetzung nachgewiesen werden. Der Effekt steigt tendenziell mit zunehmender Verkleinerung des Substrates, jedoch gibt es bei schwer abbaubaren Substraten auch konträre Angaben zur Wirksamkeit. Die Vorbehandlung durch Enzyme besitzt im Vergleich der beschriebenen Verfahren den geringsten apparativen und energetischen Aufwand, da keine zusätzlichen Geräte eingesetzt oder Veränderungen an der Biogasanlage vorgenommen werden müssen. Allerdings ist es erforderlich, die Enzyme täglich zugegeben was einen erhöhten Betriebsaufwand nach sich zieht.⁴⁰ Schwarz (Fraunhofer IKTS)⁴¹ rät zu einem Testverfahren am konkreten Objekt, um die tatsächliche Wirkung der Enzyme unter den realen Umständen vor Ort zu ermitteln. U.a. das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ) erforschte in den letzten Jahren den Einsatz von hydrolytischen Enzymen im Biogasprozess.⁴² In zahlreichen Praxisversuchen und Labortests ergaben sich dabei keine nennenswerten Effekte der eingesetzten Enzyme im Hinblick auf einen verbesserten Substrataufschluss zur Vergärung.

Weitere biologische Verfahren sind der Pilzeinsatz (Lignin wird gespalten, allerdings entstehen Atmungsverluste) sowie eine separate Hydrolysestufe in der Biogasanlage (Einstellung optimaler Bedingungen vor allem bezüglich des pH- Wertes).⁴³

³⁸ FNR 2009, Schwarz 2012, 16 und Thrän et al. 2013, 22

³⁹ Persönliche Auskunft von Herrn Fastenau, Biologie-Abteilung und Herrn Schulte, Vertrieb, Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH, 07.04.2014 und 10.04.2014; Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH 2013

⁴⁰ Schwarz 2012, 8-10 und DBFZ 2013, 209-11

⁴¹ Schwarz 2012, 10

⁴² Siehe: <https://www.dbfz.de/web/forschung/referenzprojekte/einsatz-von-hydrolytischen-enzymen-im-biogasprozess.html>

⁴³ Schwarz 2012, 11

Bei der Feststoffvergärung kann es unter Umständen auch Sinn machen, eine aerobe Vorrotte im Hinblick auf einen optimierten Aufschluss vorzuschalten. Diese beinhaltet die erste Phase der Kompostierung, im Sinne eines vorbereitenden Abbauprozesses unter Einfluss von Luftsauerstoff.⁴⁴

4.3 Vorgeschaltete Hydrolysestufe

Es ist auch möglich, den Biogasprozess im Sinne einer 2- stufigen Betriebsweise in zwei Verfahrensschritte zu trennen, die jeweils für die Hydrolyse- und die Methanisierungs- Phase optimale Prozessbedingungen gewährleisten. Die vorgeschaltete Hydrolyse dient der Flexibilisierung der Substrate durch die Herauslösung der organischen Bestandteile.

Dabei werden die anaerobe und die aerobe Hydrolysestufe unterschieden. Die anaerobe Hydrolysestufe wie beispielsweise das Rottaler Modell „säuert“ das Substrat vor, so dass die Substrate in kürzerer Zeit aufgeschlossen werden können. Einige Verfahren (z.B. avantec biogas GmbH) verwenden ein semi- aerobes Verfahren. Dabei wird dem Prozess zeitweise Luft zugeführt, um die Rohstoffe mikrobiologisch aufzuschließen⁴⁵.

Das „vorverdaute“ Substrat wird dann in den Fermenter eingebracht und kann hier optimal zu Biogas umgesetzt werden.⁴⁶

4.4 Chemische Vorbehandlung

Für die chemische Vorbehandlung gibt es die Möglichkeiten des Aufschlusses mit Säuren, Laugen oder mithilfe von Oxidationsmittel.⁴⁷ Dabei wird die komplette Biomasse gemäß den bisherigen Erfahrungen sehr gut aufgeschlossen. Das DBFZ⁴⁸ bescheinigt in diesem Zusammenhang dem alkalischen Aufschlussverfahren die höchste Biogasausbeute, mit Werten vergleichbar mit denjenigen bei konventionell behandeltem Mais.

Die Verfahren der chemischen Vorbehandlung sind nur wenig verbreitet, da der Umgang mit starken Laugen und Säuren eine hohe Sachkunde erfordert und sehr hohe Anforderungen an den Arbeits-/ Emissionsschutz und die Anlagensicherheit stellt. Außerdem besteht ein sehr hohes Risiko bei Havarien. Weitere Probleme resultieren aus der erforderlichen Entsorgung von Restchemikalien und der Aufsalzung der Gärreste.⁴⁹

⁴⁴ FNR 2013b

⁴⁵ (BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH, 2014)

⁴⁶ Snowleopard 2014; Innovas 2013; Lebuhn 2011

⁴⁷ Schwarz 2012, 33

⁴⁸ DBFZ 2013, 209

⁴⁹ DBFZ 2013, 209 und Schwarz 2012, 35

5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im Rahmen der durchgeführten Recherche konnten für die in Abschnitt 4 aufgezeigten Verfahren im Hinblick auf die Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen nur wenige belastbare Daten ermittelt werden.

Für den Bioextruder der Firma Lehmann Maschinenbau liegen dabei die Ergebnisse ausführlicher Testreihen mit verwertbaren Ergebnissen zu den substratspezifischen Auswirkungen dieser Vorbehandlungsstufe aus einem entsprechenden BMU- Projekt vor.⁵⁰ Die nachfolgende Wirtschaftlichkeitsuntersuchung hinsichtlich der ökonomischen Auswirkungen einer Vorbehandlung bezieht sich daher im Sinne einer exemplarischen Betrachtung lediglich auf den Bioextruder. Es wird darauf hingewiesen, dass die dabei zugrunde gelegten Biogasertragssteigerungen die Testergebnisse aus den einzelnen Versuchen widerspiegeln und im speziellen Fall abweichen können.

Für eine BGA im Größenbereich von 300 bis 500 kW_{el} wurde auf der Basis der verfügbaren Angaben ein Bioextruder mit folgenden Kosten und Kennwerten angesetzt:

Tabelle 4: Kennwerte Bioextruder

Anschaffungskosten	150.000 EUR
Nutzungsdauer	10 Jahre
Zinssatz	4 % p.a.
Annuität	12,33 % p.a.
Wartung	4 % p.a.
Versicherung	0,5 % p.a.

Die Durchsatzkapazität des Bioextruders mit 2 x 37 kW Motoren liegt für Silagen zwischen 6 – 14 t/h, für Festmist zwischen 3,5 – 6,5 t/h und Stroh zwischen 0,5 – 1,2 t/h⁵¹.

Die nötige Energie zum Betrieb des Extruders wird durch die aufgrund der Vorbehandlung der Substrate eingesparte Rührenergie des Fermenters ausgeglichen (Lehmann, 2012). Auf eine separate Betrachtung der Energiekosten wird daher verzichtet. Nur bei Stroh ist der Energieaufwand im Vergleich zu Mais- oder Grassilage um ein Vielfaches höher. Dies wird im nächsten Abschnitt genauer fokussiert.

Vergleichend betrachtet werden vier Substrate: Landschaftspflegegras, Rindermist, Stroh und Maissilage. Gegenübergestellt werden dabei jeweils die Einnahmen durch die Stromproduktion (Vergütung nach EEG 2012, Inbetriebnahme der Anlage 1. Quartal im Jahr 2014) und die Ausgaben für die Substratbeschaffung sowie - bei der Betrachtung mit Substratvorbehandlung - die Kosten für den Bioextruder. Außer Acht gelassen werden bei den Berechnungen die Kosten für die BGA, da diese für beide

⁵⁰ Lehmann 2012

⁵¹ Lehmann 2011

Betrachtungsarten gleichermaßen anfallen, sowie zusätzliche Erlöse durch Wärme- und Gärrestverkauf. Es gilt daher zu beachten, dass die absoluten EUR- Angaben hier den Erlös der einzelnen Substrate darstellen und nicht den absoluten Gewinn des Biogasprozesses.

Im Hinblick auf entsprechende Sensitivitäten wurden in einer zweiten Betrachtungsweise die Einnahmen durch die Potenziale einer externen Wärmeabgabe ergänzt. Ausgegangen wird hierbei überschlägig von einer Wärmeproduktion von ca. 3 kWh_{th} pro m³ Biogas sowie einer externen Wärmeabgabe von 45 % der gesamten Wärmeerzeugung zu 2 ct. pro kWh_{th}.⁵²

Landschaftspflegegras erzielt durch eine BGA ohne Vorbehandlung eine Stromproduktion von durchschnittlich 220 kWh/t FM⁵³, mit Vorbehandlung im Bioextruder steigt diese Menge um 29,6 % auf 285 kWh/t FM⁵⁴. Nach EEG 2012 erwirtschaftet Biogas aus Landschaftspflegegras eine Vergütung von 0,2053 EUR/kWh (Grundvergütung plus Einsatzstoffvergütungskategorie II). Die Substratkosten liegen laut DBFZ bei 34 EUR/t FM für Mähen, Wenden, Schwaden, Häckseln und den Transport zur BGA.⁵⁵

Aus den Berechnungen der Einnahmen und Ausgaben ohne und mit Bioextruder ergibt sich im Zusammenhang mit einer grafischen Gegenüberstellung (s. Abbildung 3) ein Schnittpunkt der beiden Geraden bei einer Menge von 1.887 t FM Landschaftspflegegras. Diese Mindestmenge an Substrat ist notwendig um eine Wirtschaftlichkeit des Bioextruders unter den zugrunde gelegten Ansätzen zu erreichen, da ab diesem Punkt die Einnahmen (abzüglich der Ausgaben) mit Bioextruder den entsprechenden Saldo ohne Bioextruder überschreiten.

⁵² Angaben aus FNR 2013c, 42 und KTBL 2013, 279

⁵³ Annahme Biogasertrag 110 Nm³/t FM (FNR 2013c, 37) sowie Stromproduktion 2 kWh_{el}/m³ Biogas (FNR 2013c, 42).

⁵⁴ Lehmann 2012

⁵⁵ Es handelt sich hierbei um den Durchschnittspreis von 5 Beispielregionen, für die in Sauter et al. 2013 Kosten ermittelt wurden.

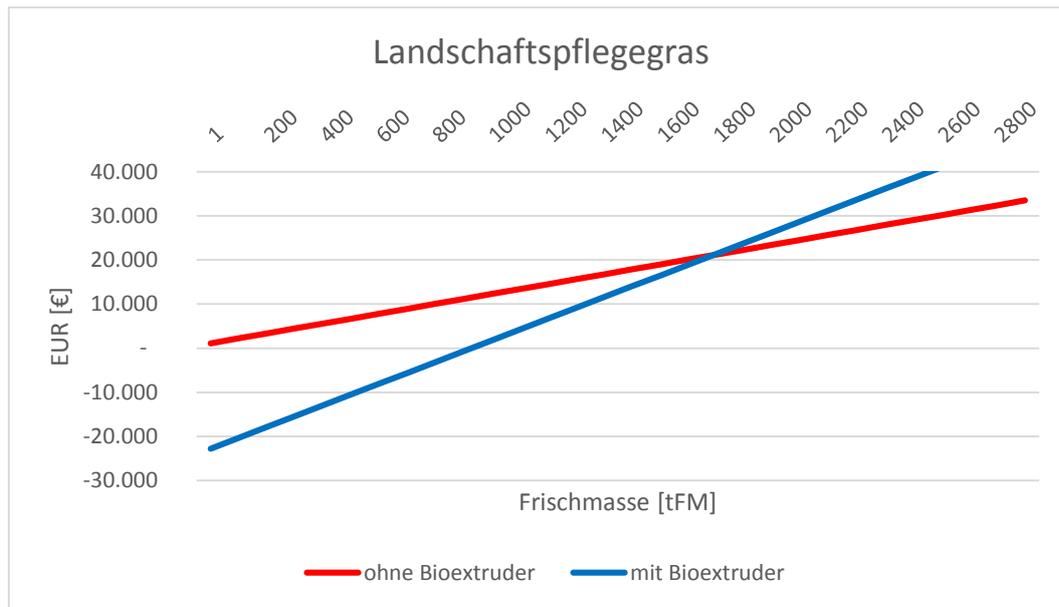


Abbildung 3: Vergleich Wirtschaftlichkeit von Landschaftspflegegras mit/ohne Bioextruder 1

Das Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) rechnet mit Substratkosten für Landschaftspflegegras von 20 EUR/t FM.⁵⁶ Der x- Wert des Schnittpunktes der beiden Linien ändert sich dadurch nicht und verbleibt weiterhin bei 1887 t FM Landschaftspflegegras, da der geringere Substratpreis für beide Betrachtungsvarianten gilt, allerdings erhöhen sich die absoluten Einnahmen in EUR (y- Wert) durch die entsprechend geringeren Kosten.

Die Betrachtung mit externer Wärmeabgabe ergibt durch die gestiegenen Einnahmen abhängig von der Biogasproduktion eine – im Vergleich zur Variante „ohne Bioextruder“ - frühere Rentabilität des Bioextruders ab einer jährlichen Substratmenge (34 €/t FM) von 1771 t FM Landschaftspflegegras (s. Abbildung 4).

⁵⁶ KTBL 2014

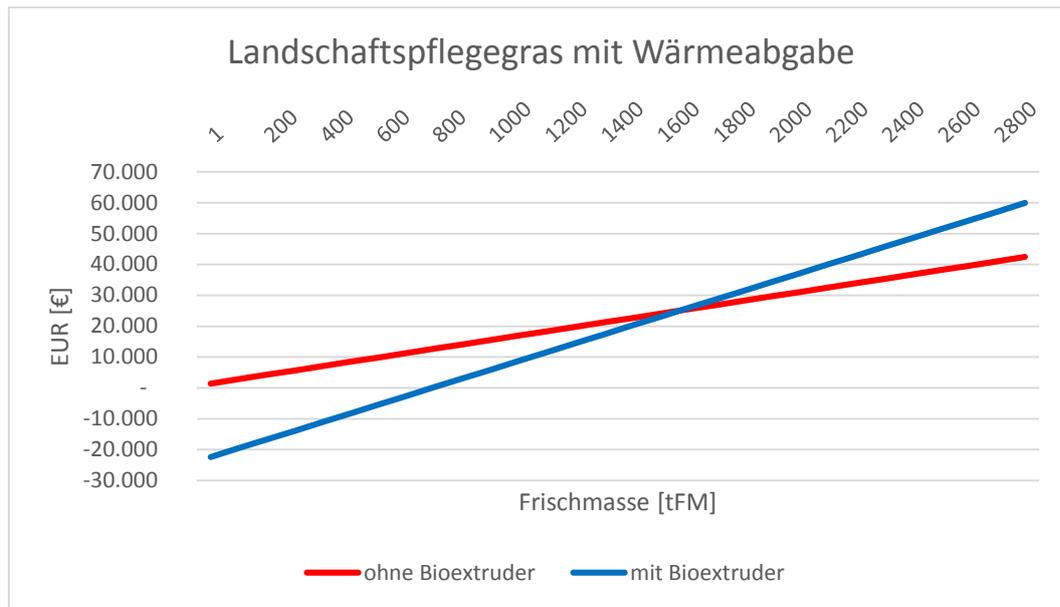


Abbildung 4: Vergleich Wirtschaftlichkeit von Landschaftspflegegras mit/ohne Bioextruder mit externer Wärmeabgabe

Rindermist erzielt durch Vergärung eine Stromproduktion von durchschnittlich 200 kWh/t FM⁵⁷ ohne Vorbehandlung, mit Vorbehandlung im Bioextruder steigt diese Menge um 60,8 % auf 322 kWh/t FM⁵⁸. Nach EEG 2012 erwirtschaftet Biogas aus Rindermist eine Vergütung von 0,2053 EUR/kWh (Grundvergütung plus Einsatzstoffvergütungskategorie II). Die Substratkosten liegen laut Umfrage des Fachverbands Biogas bei 5,62 EUR/t FM.⁵⁹

Unter diesen Annahmen führt die Anschaffung eines Bioextruders ab einer jährlichen Substratmenge von 1.011 t FM Rindermist zu einem besseren Betriebsergebnis (s. Abbildung 5).

⁵⁷ Annahme Biogasertrag 100 Nm³/t FM (FNR 2013c, 37) sowie einer Stromproduktion von 2 kWh_e/m³ Biogas (FNR 2013c, 42).

⁵⁸ Lehmann 2012

⁵⁹ Rauh und Strippel 2014

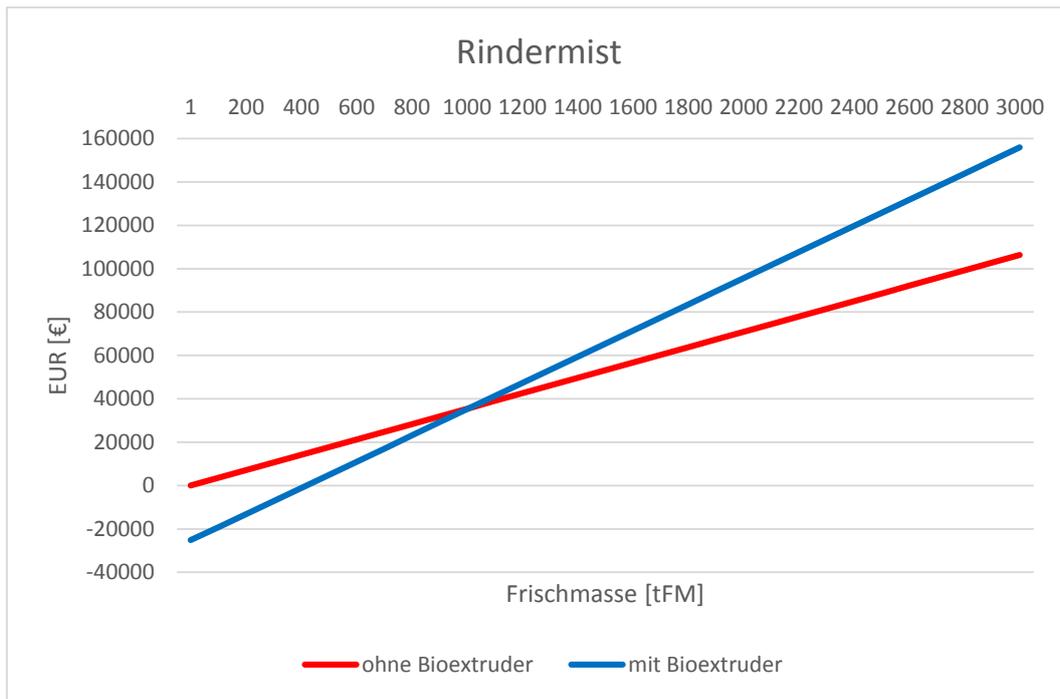


Abbildung 5: Vergleich Wirtschaftlichkeit von Rindermist mit/ohne Bioextruder

Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit mit externer Wärmeabgabe verbessert die Anschaffung eines Bioextruders bereits ab einer jährlichen Substratmenge von 949 t FM Rindermist die entsprechende Bilanzsumme (s. Abbildung 6).

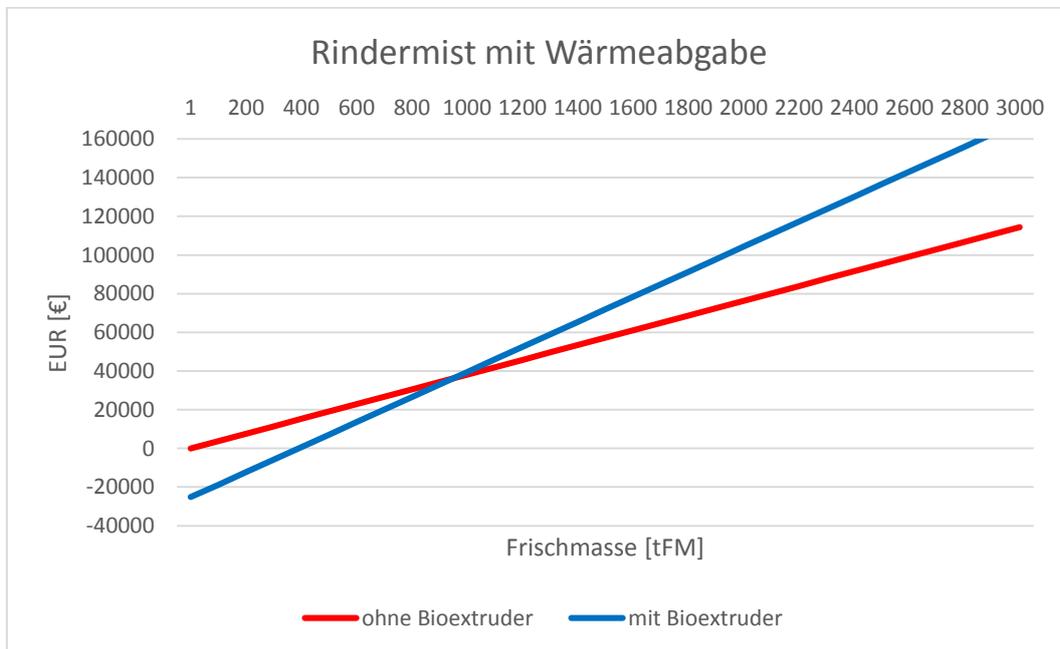


Abbildung 6: Vergleich Wirtschaftlichkeit von Rindermist mit/ohne Bioextruder mit externer Wärmeabgabe

Stroh kann theoretisch durch Vergärung eine Stromproduktion von durchschnittlich 564 kWh/t FM⁶⁰ ohne Vorbehandlung, mit Vorbehandlung im Bioextruder steigt diese

⁶⁰ Annahme Methanertrag von 161 m³/t FM (KTBL 2013, 141) sowie Stromproduktion von 3,5 kWh_{el}/m³ Methan (FNR 2013c, 42).

Menge um 21 % auf 682 kWh/t FM⁶¹. Nach EEG 2012 erwirtschaftet Biogas aus Stroh eine Vergütung von 0,2053 EUR/kWh (Grundvergütung plus Einsatzstoffvergütungsklasse II). Die Substratkosten liegen laut Umfrage des KTBL bei 110 EUR/t FM.⁶²

Unter diesen Annahmen verbessert die Anschaffung des Bioextruders – im Sinne einer theoretischen Betrachtung - ab einer jährlichen Substratmenge von mehr als 1.039 t FM an Stroh das Betriebsergebnis (s. Abbildung 7). Hierbei ist vorausgesetzt, dass es sich bei dieser Menge um eine Minimalmenge in einer Biogasanlage handelt, die noch mit weiteren Substraten gespeist wird. Praktisch betrachtet, dürfte die Vorschaltung eines Extruders eine Strohvergärung überhaupt erst möglich machen. Weiterhin von Nachteil sind der hohe Energiebedarf zur Extrusion und der vergleichsweise geringe Durchsatz der Anlage.

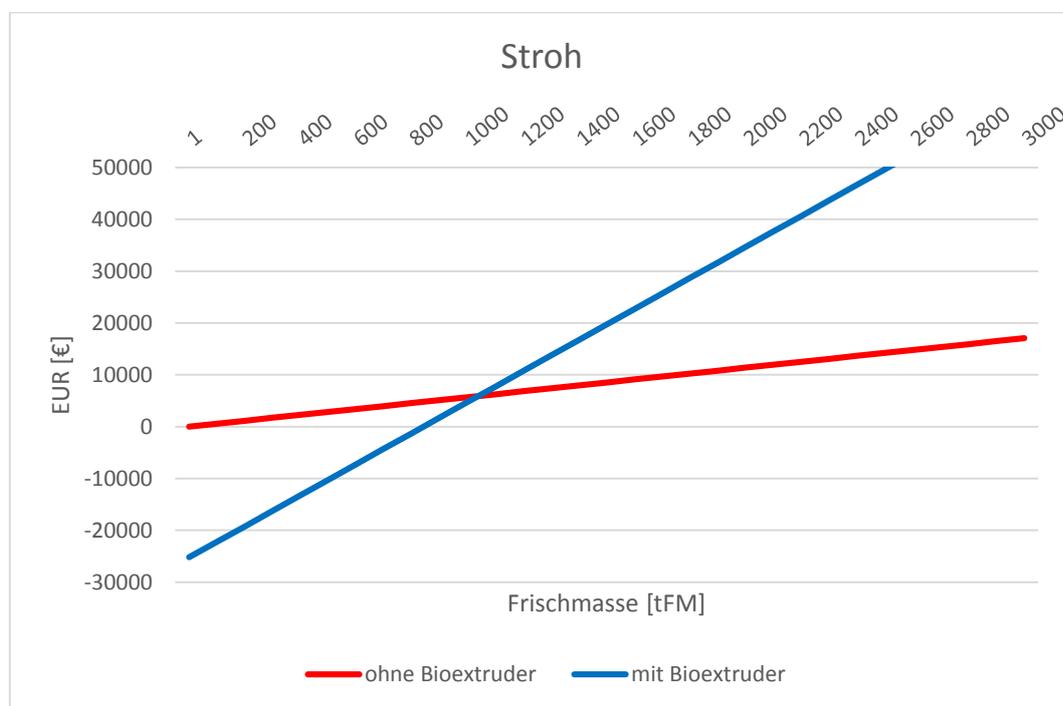


Abbildung 7: Vergleich Wirtschaftlichkeit von Stroh mit/ohne Bioextruder

Durch eine externe Wärmeabgabe und gestiegene Einnahmen abhängig von der Biogasproduktion verbessert die Anschaffung des Bioextruders ab einer jährlichen Substratmenge von 975 t FM Stroh die Bilanzsumme (s. Abbildung 8).

⁶¹ Lehmann 2012

⁶² KTBL 2014

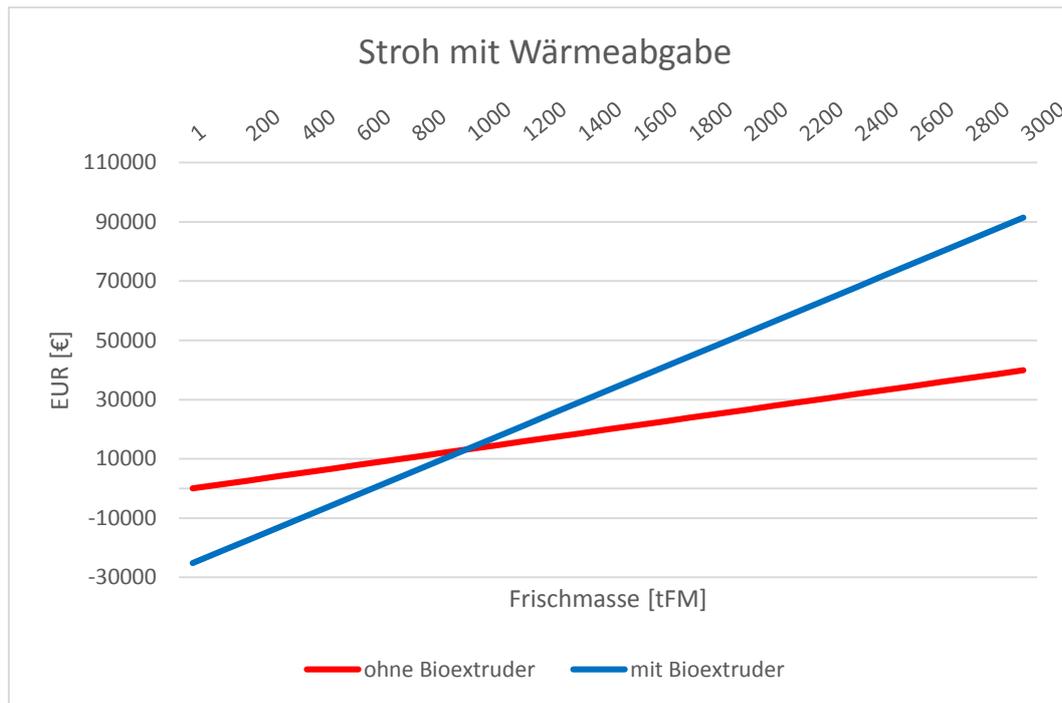


Abbildung 8: Vergleich Wirtschaftlichkeit von Stroh mit/ohne Extruder mit externer Wärmeabgabe

Maissilage erzielt durch Vergärung eine Stromproduktion von durchschnittlich 400 kWh/t FM⁶³ ohne Vorbehandlung, mit Vorbehandlung im Bioextruder steigt diese Menge um 18,1 % auf 322 kWh/t FM⁶⁴. Nach EEG 2012 erwirtschaftet Biogas aus Maissilage eine Vergütung von 0,1853 EUR/kWh (Grundvergütung plus Einsatzstoffvergütungskategorie I). Die Substratkosten liegen laut Umfrage des Fachverbands Biogas bei 35 EUR/t FM.⁶⁵

Unter diesen Annahmen verbessert die Anschaffung eines Bioextruders ab einer jährlichen Substratmenge von 1882 t FM Maissilage das Betriebsergebnis (s. Abbildung 9).

⁶³ Annahme von 200 Nm³/t FM (FNR 2013c, 37) sowie einer Stromproduktion von 2 kWh_{el}/m³ Biogas (FNR 2013c, 42)

⁶⁴ Lehmann 2012

⁶⁵ Rauh und Strippel 2014

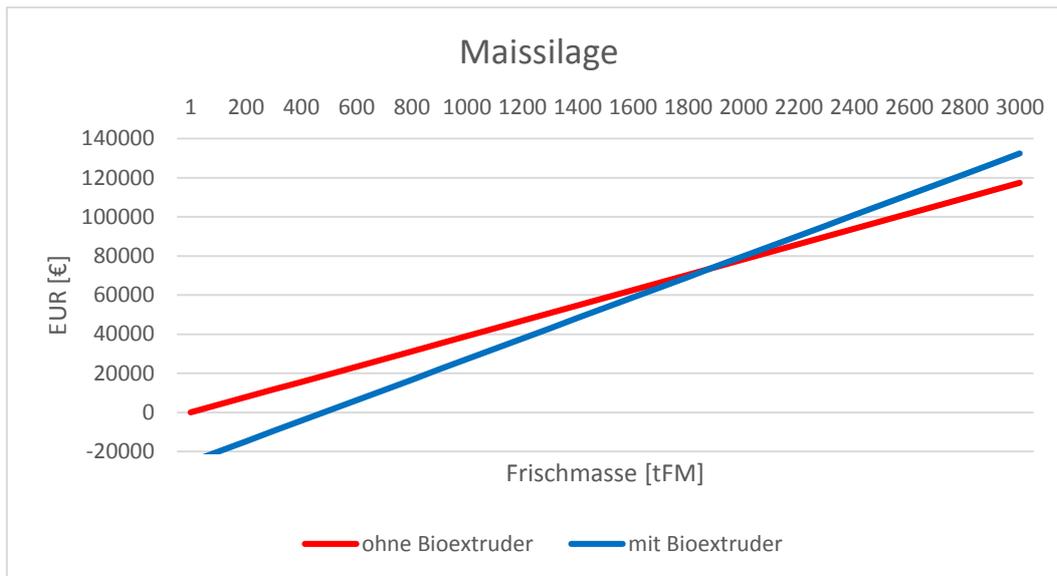


Abbildung 9: Vergleich Wirtschaftlichkeit von Maissilage mit/ohne Bioextruder

Unter den eingangs benannten Annahmen zur externen Wärmeabgabe verbessert die Anschaffung eines Bioextruders ab einer jährlichen Menge von 1.754 t FM Maissilage das Betriebsergebnis (s. Abbildung 10).

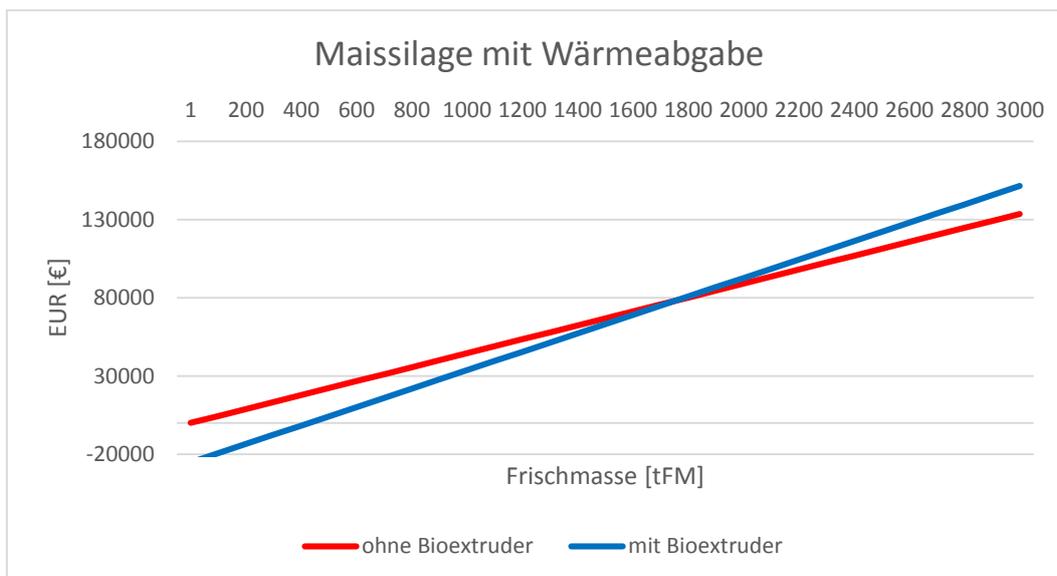


Abbildung 10: Vergleich Wirtschaftlichkeit von Maissilage mit/ohne Bioextruder mit externer Wärmeabgabe

Besonders interessant ist der Bioextruder bei der Nutzung von Rindermist und Stroh als Substrat in der Biogasanlage. Ohne das Aufschlussverfahren wären diese nur schwer einsetzbar, darüber hinaus ist der Mengenbedarf im Vergleich zu Landschaftspflegematerialien wesentlich geringer.

Tabelle 5 fasst die jeweils jährlich notwendigen Substratmengen noch einmal zusammen, die für eine Rentabilität des Bioextruders mindestens in die BGA eingebracht werden müssen. Da für die Sensitivätsberechnung mit externer

Wärmeabgabe ein relativ konservativer Wärmeerlös von 2 ct. pro kWh angesetzt wurde, fallen die Auswirkungen auf die notwendige Substratmenge relativ gering aus.

Besonders interessant ist der Bioextruder bei der Nutzung von Rindermist und Stroh als Substrat in der Biogasanlage. Ohne das Aufschlussverfahren wären diese nur schwer einsetzbar, darüber hinaus ist der Mengenbedarf im Vergleich zu Landschaftspflegematerialien wesentlich geringer.

Tabelle 5: Zusammenfassung Wirtschaftlichkeit Bioextruder

Substrat	„break-even-point“ Bioextruder	
	Menge in t FM	Menge in t FM mit ext. Wärmeabgabe
Landschaftspflegegras	1.887	1.771
Rindermist	1.011	949
Stroh	1.039	975
Maissilage	1.882	1.754

Die Änderungen des EEG 2014 im Vergleich zum EEG 2012 haben besonderen Einfluss auf die Vergütung von Substraten, die ehemals der Einsatzstoffklasse II zugeordnet wurden. Diese besonders geförderten Biomassen sind jetzt mit allen anderen Substraten gleich gestellt und in einer einheitlichen Grundvergütung zusammengefasst. Für die zuvor beschriebene Nutzung eines Extruders an einer Biogasanlage mit 400 kW_{el} Leistung ergeben sich dadurch neue Mindestverarbeitungsmengen zur Deckung der Kosten. In der Tabelle 6 wird von einer Grundvergütung von 12,49 ct/kWh ausgegangen. Dabei zeigt sich, dass die Substratmengen um ein vielfaches steigen müssen, um den Einsatz eines Extruders zu rechtfertigen. Zugleich ist zu berücksichtigen, dass Substrate wie Stroh durch die hohen Substartkosten keinen positiven Gewinn unter dem EEG 2014 erwirtschaften können.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeit des Bioextruders (EEG 2014)

Substrat	„break-even-point“ Bioextruder	
	Menge in t FM	Menge in t FM mit ext. Wärmeabgabe
Landschaftspflegegras	3.102	2.800
Rindermist	1.662	1.500
Stroh	1.708	1.542
Maissilage	2.792	2.519

Tabelle 7 fasst die möglichen Deckungsbeiträge - für die Betriebsweisen mit und ohne Extruder - der einzelnen, in den vorangegangenen Kapiteln betrachteten Substrate Landschaftspflegegras, Rindermist, Stroh und Maissilage zusammen. Die in der

Tabelle genannten Beträge beinhalten dabei ausschließlich die Erträge aus der EEG-Vergütung sowie die variablen Substratkosten unter den in Kapitel 5 genannten Annahmen (ohne Kosten der BGA sowie des Extruders). Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass – im Vergleich zur in der Regel wirtschaftlich auskömmlichen Maissilage – aufgrund der geringen Substratkosten nur Rindermist einen höheren Deckungsbeitrag erwirtschaftet. Der Deckungsbeitrag von Stroh hingegen fällt aufgrund der sehr hohen Substratkosten von 110 EUR/t FM relativ gering aus. Der Einsatz eines Extruders erhöht den Deckungsbeitrag teilweise signifikant. Dies bedeutet, dass, sobald die Substratkosten für Landschaftspflegematerialien oder Stroh sinken, dort der Einsatz eines Extruders von großem Interesse ist, da hier die größte Steigerung des Deckungsbeitrages erwirtschaftet wird. Wie jedoch bereits erwähnt, können diese Materialien auch bei gleichzeitigem Einsatz eines Extruders nur bis zu einer bestimmten Menge eingesetzt werden und es werden weitere Substrate zum Betrieb einer Biogasanlage benötigt.

Tabelle 7: Deckungsbeiträge der einzelnen Substrate

Substrat		ohne Extruder		mit Extruder	
Landschaftspflegegras	Erträge*	20,53	ct./kWh	20,53	ct./kWh
	Kosten**	15,50	ct./kWh	11,90	ct./kWh
	Deckungsbeitrag	5,03	ct./kWh	8,63	ct./kWh
Rindermist	Erträge*	20,53	ct./kWh	20,53	ct./kWh
	Kosten**	2,81	ct./kWh	1,75	ct./kWh
	Deckungsbeitrag	17,72	ct./kWh	18,78	ct./kWh
Stroh	Erträge*	20,53	ct./kWh	20,53	ct./kWh
	Kosten**	19,50	ct./kWh	16,10	ct./kWh
	Deckungsbeitrag	1,03	ct./kWh	4,43	ct./kWh
Maissilage	Erträge*	18,53	ct./kWh	18,53	ct./kWh
	Kosten**	8,75	ct./kWh	7,40	ct./kWh
	Deckungsbeitrag	9,78	ct./kWh	11,13	ct./kWh

* Erträge aus EEG 2014-Vergütung
** nur variable Substratkosten - ohne Fixkosten für BGA und Bioextruder

6 Potenzial Biosphärenreservat Bliesgau

Im Folgenden werden die Potenziale an Landschaftspflegematerialien, Grünlandflächen (Grasschnitt) und landwirtschaftlichen Reststoffen (Festmist) im Biosphärenreservat Bliesgau betrachtet. Ziel ist dabei die Herleitung möglicher Projektierungsansätze für die tendenziell eher „schwierigeren“ Substrate.

Als Grundlage zur Ermittlung der landwirtschaftlichen Potenziale dienen die Angaben des Ministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz Saar – Abteilung F „Agrarförderung, Geoinformation, Landentwicklung“⁶⁶. Diese stellen die aktuellen Nutzungen der landwirtschaftlich geförderten Flächen zusammen (EU- Agrarfonds).

6.1 Landschaftspflege

Als Biomassen der Landschaftspflege werden hier im Kontext einer umsetzungsorientierten Betrachtung aufgrund vergleichbarer Substratqualitäten neben Gras aus extensiv genutzten Grünlandflächen bzw. Schutzgebieten auch Kraut- und Strauchschnitt aus dem kommunalen und privaten Bereich zusammengefasst. Die Energiepotenziale aus Grünland werden im folgenden Kapitel näher beschrieben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ab dem EEG 2014 keine gesonderte Vergütung für Landschaftspflegematerialien in Anspruch genommen werden kann.

Potenziale im Bereich des kommunalen und privaten Kraut- und Strauchschnitts ergeben sich einerseits aus der primären Landschaftspflege u. a. in Form von Hecken- schnitt oder aus dem kommunalen bzw. privaten Bereich in Form von Grünschnitt aus Parks, Gärten oder Grünanlagen. Eine gemeinsame Vergärung der Substrate ist allerdings, unter Berücksichtigung der EEG-Vergütung und der Bioabfall-Verordnung, nur innerhalb einer Bioabfallvergärungsanlage möglich

Im Biosphärenreservat wird dieses Material auf kommunalen Heckenplätzen in allen Kommunen gesammelt. Insgesamt verfügt das Gebiet über 17 kommunale Sammelplätze. Dabei werden die anfallenden Massen von Blieskastel, Homburg und Gersheim auf die landkreiseigene Kompostanlage Hölschberg geliefert. Kirkel und St. Ingbert betreiben eigene Kompostanlagen. Mandelbachtal liefert seine Grünschnittmenge an das Kompost- und Erdenwerk Ormesheim des Entsorgungsverbands Saar (EVS). Kleinblittersdorf betreibt eine eigene Anlage in Auersmacher.

An o. g. Sammelplätzen fielen im Jahr 2011 zwischen 10.000 und 13.000 t Kraut- und Grünschnitt an. Davon sind ca. ein Drittel holziges (\cong 3.500 t) und zwei Drittel krautiges Material (\cong 8.500 t).⁶⁷

Der krautige Grünschnitt weist mit 80 m³ Biogas/t und einem Energieinhalt von 6 kWh/m³ ein Potenzial von **4,08 GWh/a** auf. Der holzige Grünschnitt liefert mit 2,5 kWh/kg ein Potenzial von **8,75 GWh/a**. Laut Umfragen wird dieses Potenzial bisher zu

⁶⁶ MUV 2013

⁶⁷ Masterplan 100% Klimaschutz

20 % energetisch genutzt, 80 % werden bislang kompostiert. Somit verbleibt ein Potenzial von **10,3 GWh/a**.

6.2 Grünlandflächen

Von den insgesamt ca. 9.800 ha Grünland⁶⁸ im Biosphärenreservat Bliesgau werden laut den Daten des MUV zur landwirtschaftlichen Nutzung der Acker- und Grünlandflächen derzeit etwa 7.700 ha⁶⁹ bewirtschaftet, bzw. im landesweiten Agrarmeldesystem (InVeKos) gemeldet. Da in der Region lediglich geringe landwirtschaftliche Erträge erwirtschaftet werden, wird für die folgenden Berechnungen generell für die Flächen außerhalb der Pflegezone ein Grasertrag von 4 t TS/ha zu Grunde gelegt.

Insgesamt befinden sich 1.900 ha Grünlandflächen in der Pflegezone des Biosphärenreservats, davon wiederum werden 1.400 ha bewirtschaftet. Für die Flächen der Pflegezone wird ein Ertrag von 2 t TS/ha angesetzt.

Zudem befindet sich im Untersuchungsgebiet das Naturschutzgroßprojekt „Saar-Blies-Gau/Auf der Lohe“. Die Flächen des Gebietes sind an Landbewirtschaftler verpachtet. In den Pachtverträgen sind zur Erreichung der naturschutzfachlichen Standards folgende Auflagen verankert:

- Die Mähwiesen sind ein- bis zweischürig zu nutzen und auf allen Flächen ist eine Mindestnutzung durchzuführen.
- Der früheste Mähtermin ist der 24.06., bei einer zweischürigen Mahd der 24.06. und der 15.08.

Auch auf diesen Flächen kann folglich nur ein Ernteertrag von maximal 2 t TS/ha erwirtschaftet werden.

Aus diesen Ansätzen ergibt sich eine aggregierte Erntemasse von jährlich 32.200 t TS.

Ein Teil der vorhandenen Grasernte wird zur Fütterung des Viehbestandes verwendet. Wie in Tabelle 8 dargestellt, besteht in der Region ein Futterbedarf von 28.200 t TS/a. Daher verbleibt ein freies Graspotenzial zur energetischen Nutzung von ca. 4.000 t TS. Dies entspricht einem Energiepotenzial (Biogas) von **12,9 GWh/a**.

⁶⁸ Daten des Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS) des Landesamtes für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung des Saarlandes

⁶⁹ Daten der Zentralen InVeKoS-Datenbank 2012 (Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem). Datenbank zur Meldung und Dokumentation im Rahmen der Betriebsprämienregelung in der Landwirtschaft

Tabelle 8: Berechnung des „freien“ Energiepotenzials von Grünlandflächen

Grasertrag:	32.200 t TS
<i>Grünland</i>	<i>25.000 t TS</i>
<i>Grünland (aus Erzeugung genommen)</i>	<i>3.200 t TS</i>
<i>Grünland in Pflegezone</i>	<i>3.800 t TS</i>
Futterbedarf [t TS]	28.200 t TS
Restpotenzial	4.000 t TS
Biogasertrag [m ³ /t TS]	550 m ³ /t TS
Heizwert [kWh/m ³]	6 kWh/m ³
Energiepotenzial	12.900.000 kWh

6.3 Festmist

Landwirtschaftliche bzw. tierische Reststoffe zum Einsatz in Biogasanlagen werden in Flüssig- und Festmist unterschieden. Diese Unterscheidung ist notwendig, da diese beiden Substrate unterschiedliche Energiegehalte und Eigenschaften (z.B. Trockensubstanzgehalt) mit verschiedenen Biogaserträgen aufweisen. Betrachtet wird hier lediglich der Festmist.

Als Grundlagen zur Ermittlung des landwirtschaftlichen Reststoffpotenzials dienen zunächst die Viehbestandsermittlungen der Allgemeinen Viehbestandserhebung in der Landwirtschaft des Statistischen Amtes des Saarlandes. Tabelle 9 zeigt die entsprechenden Zahlen des aktuellen Viehbestands aus den Statistiken des Jahres 2011 sowie die erforderlichen Umrechnungs- und Vereinheitlichungsfaktoren. Auf dieser Basis lässt sich das Energiepotenzial (Biogas) aus Festmist für das Biosphärenreservat von ca. **6,6 GWh/a** ableiten.

Tabelle 9: Biogas- und Energiepotenzial aus Festmist (gerundet)

	Pferde	Rinder	Milchkühe	Schweine	Schafe	Insgesamt
Viehzahlen	1.590	8.247	1.788	2.386	2.873	16.884
Umrechnungsfaktor GV	1	0,82	0,82	0,13	0,08	
GVE	1.590	6.763	1.466	310	230	10.359
Stallhaltungsanteil	20%	40%	85%	100%	20%	
Festmistanteil	100%	30%	30%	0%	100%	
Festmist [t/GV/a]	9,0	8,4	8,4	9,6	7,2	
Mist [t FM/a]	2.862	6.817	3.141	-	331	13.150
TS-Gehalt	28%	25%	25%	25%	25%	
davon oTS	75%	80%	80%	80%	75%	
Biogasertrag [l/kg oTS]	300	450	450	450	400	
Biogas aus Festmist (Nm³/a)	180.300	613.500	283.000	-	25.000	1.101.000
Energiepotenzial (kWh/a)	1.082.000	3.681.000	1.696.000	-	149.000	6.608.000

6.4 Zusammenfassung

Insgesamt besteht im Biosphärenreservat Bliesgau ein Potenzial an Landschaftspflegematerial und schwer abbaubaren sonstigen Substraten von **32,33 GWh/a** (s. Tabelle 10). Hier wurden mögliche Ertragssteigerungen durch Methoden der Substratvorbehandlung gemäß Kapitel 4 nicht berücksichtigt.

Tabelle 10: Zusammenfassung Potenzial Landschaftspflegematerial und sonstige „schwierige“ Substrate

Substrat	Biogasertrag [Mio. Nm ³ /a]	Gesamtpotenzial [GWh/a]
Krautiger Grünschnitt	0,68	4,08
Holziger Grünschnitt	-	8,75
Gras	2,2	12,9
Festmist	1,1	6,6
	3,98	32,33

7 Fazit

Wie die Potenzialanalyse in Kapitel 6 zeigt, besteht im Biosphärenreservat Bliesgau ein signifikantes Energiepotenzial an Landschaftspflegematerial und sonstigen schwer in BGA abbaubaren Substraten. Diese Einschätzung lässt sich grundsätzlich auch auf das gesamte Saarland übertragen.

Für die Verwertung dieser Substrate im Saarland gilt es zu klären, ob eine Co-Vergärung in einer bestehenden Anlage möglich ist. Vor allem Rindermist scheint in Anbetracht des hohen Deckungsbeitrages ein interessantes Inputsubstrat darzustellen. Aufgrund des hohen Trockensubstanzgehaltes kann Mist allerdings nicht ohne Vorbehandlung oder die Zugabe anderer Substrate mit einem höheren Feuchtigkeitsgehalt vergoren werden. Bezüglich des Landschaftspflegematerials ist anzumerken, dass die Flächen im Normalfall ohnehin in Stand gehalten werden müssen und damit die hier genannten Kosten ohnehin anfallen. Hier bleibt also die Konkurrenzfähigkeit der Vergärung gegenüber der Kompostierung zu prüfen. Stroh kann derzeit am Markt gut abgesetzt werden. Es lässt sich zudem in BGA ohne eine entsprechende Vorbehandlung kaum nutzenbringend einsetzen. Für Überschüsse, bzw. beschädigte Strohmenge könnte eine BGA mit Vorbehandlungsstufe jedoch durchaus eine Option darstellen.

Die Ausstattung einer Biogasanlage mit einer Vorbehandlung (hier: Extruder) für Teilströme (Co-Vergärung) lässt sich durchaus wirtschaftlich darstellen, was grundsätzlich eine Möglichkeit zur Verarbeitung schwieriger Substrate eröffnet. Die diesbezüglich vorhandene Datenlage ist allerdings noch wenig belastbar, so dass noch Risiken zu unterstellen sind, welche gegebenenfalls über eine entsprechende Projektförderung aufgefangen werden müssen.

Quellenverzeichnis

Biomasseverordnung vom 21. Juni 2001 (BGBl. I S. 1234), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 10 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert wurde

Biogas Forum Bayern (2010): Eignet sich Miscanthus als Biogassubstrat? Nr. I-9/2010, Straubing.

BTS Biogas, 2013. Biogasanlagen BIOaccelerator: Mehr Biogasausbeute durch Substrataufbereitung. http://www.bts-biogas.com/fileadmin/userdaten/bilder/Broschueren/bioaccelerator/BIOaccelerator_de_new.pdf, Zugriff 07.04.2014

DBFZ [Deutsches Biomasseforschungszentrum gmbH], 2013. Grünlandenergie Havelland: Entwicklung von übertragbaren Konzepten zur naturverträglichen energetischen Nutzung von Gras und Schilf am Beispiel der Region Havelland. Endbericht. Leipzig: DBFZ.

DVL [Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V.] und NABU [Naturschutzbund Deutschland e.V.], 2007. Bioenergie? – Aber natürlich!: Nachwachsende Rohstoffe aus Sicht des Umwelt- und Naturschutzes. Heft 12 der DVL-Schriftenreihe „Landschaft als Lebensraum“.

DVL [Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V.], 2012. Vom Landschaftspflegematerial zum Biogas: MULLE – Das Landschafts-Energie-Projekt. http://www.lpv.de/uploads/tx_ttproducts/datasheet/DVL-Broschuere_MULLE_klein.pdf, Zugriff 06.01.2014

Elsässer, Martin, Messner, Jörg, Keymer, Ulrich, Roßberg, Reinhard, Setzer, Frank, 2012. Biogas aus Gras: Wie Gründlandwüchse zur Energieerzeugung beitragen können. DLG-Merkblatt 386. 1. Auflage. Frankfurt (Main): DLG e. V.

FNR [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.], 2009. Pressearchiv: Die Wirksamkeit der Desintegration in Biogasanlagen nachweisen. http://www.fnr.de/presseservice/pressemitteilungen/archiv/archiv-nachricht/archive/2009/april/article/die-wirksamkeit-der-desintegration-in-biogasanlagen-nachweisen/?tx_ttnews%255Bday%255D=16, Zugriff 20.12.2013

FNR [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.], 2013a. Gärsubstrate. <http://biogas.fnr.de/biogas-gewinnung/gaersubstrate/>, Zugriff 20.12.2013

FNR [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.], 2013b. Anlagentechnik: Biogasproduktion. <http://biogas.fnr.de/biogas-gewinnung/anlagentechnik/biogasproduktion/>, Zugriff 20.12.2013

FNR [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.], 2013c. Basisdaten Bioenergie Deutschland. August 2013. Gülzow-Prüzen: FNR.

FNR [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.], 2013d. Gasausbeute verschiedener Substrate. 2013. Gülzow-Prüzen: FNR.

Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH, 2013. Zukunftsweisende Biogas-Produktion: Maschinen und Systeme für die Pump-, Zerkleinerungs- und Einbringtechnik. <http://www.vogelsang.info/fileadmin/pdf/Prospekte/Vogelsang-Biogas-DE.pdf>, Zugriff 07.04.2014

Innovas, 2013. innovas News Anwendungsbeispiel Biogas 18/13: Leistungssteigerung der Biogasanlage Parkstetten - Umbau in eine zweistufige Vergärung. http://www.innovas.com/de/templates/innovas_standard/pdf/biogas/NEWS_Anwendungsbeispiel_18_Parkstetten.pdf, Zugriff 30.06.2014

IVL [Institut für Vegetationskunde und Landschaftsökologie], 2010. Rahmenkonzept zur energetischen Verwertung von Biomasse aus der Landschaftspflege im Freistaat Sachsen. Abschlussbericht. http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/Energetische_Verwertung_von_Biomasse_aus_Landschaftspflege_A.pdf, Zugriff 06.01.2014

KTBL [Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft], 2013. Faustzahlen Biogas. 3. Ausgabe. Darmstadt: KTBL.

KTBL [Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft], 2012. Festmistaußenlagerung. 1. Überarbeitung. Darmstadt: KTBL

KTBL [Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft], 2014. Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas. <http://daten.ktbl.de/biogas/startseite.do;jsessionid=6865E79756710C6F413F3663C13C9CEE>, Zugriff 30.06.2014

Lebuhn, Michael, 2011. Prozessbeschleunigung und Hygienisierung in Biogasanlagen durch Vorschaltung einer Hydrolysephase/-stufe. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft. <http://www.lfl.bayern.de/ilt/umwelttechnik/biogas/032393/>, Zugriff 30.06.2014

LEHMANN & Fraunhofer IKTS, 2011. Nutzung hochlignozellulosehaltiger biogener Reststoffe und Substrate in Biogasanlagen. http://www.energetische-biomassennutzung.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Vorhaben/20110919_Nutzung_hochlignozellulosehaltiger_biogener_Reststoffe.pdf, Zugriff 19.12.2013

LEHMANN Maschinenbau GmbH, 2014. Bio-Extrudiertechnik. <http://www.lehmann-maschinenbau.de/web/index.php?id=54&L=1%20and%201%3D1--1%20or%201%3D%40%40version-->, Zugriff 12.06.2014

Lehmann, Thilo, 2012. Errichtung einer Biogas- u. Biobrennstoffherstellungsanlage. Abschlussbericht K II b1 – 001333 im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Pöhl: LEHMANN Maschinenbau GmbH.

NOVATECH GmbH, 2013. Fragen & Antworten.
<http://www.novatechgmbh.com/336.0.html>, Zugriff 20.12.2013

Rauh, Stefan, Strippel, Florian, 2014. „Biomassepreise steigen kontinuierlich“ In: Biogas Journal (3) 2014. S. 52-55.

Rudolph, Wolfgang, 2010. „Biogas aus Stroh.“ In: Joule 2.2010, S. 44-45

Schwarz, Björn (2011): Stand und neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der Substratvorbehandlung für den Biomasseeinsatz in Biogasanlagen. Vortrag Sächsische Biogastagung Groitzsch.

Snowleopard, 2014. Strohvergärung in der Praxis. <http://snow-leopard-projects.com/index.php/de/biogasanlagen/strohvergaerung>, Zugriff 30.06.2014