



KIT SCIENTIFIC REPORTS 7691

Biogas aus Landschaftspflegegras

Möglichkeiten und Grenzen

L. Leible, S. Kälber, G. Kappler,
H. Oechsner und M. Mönch-Tegeder

L. Leible, S. Kälber, G. Kappler,
H. Oechsner und M. Mönch-Tegeder

**Biogas aus
Landschaftspflegegras**

Möglichkeiten und Grenzen

Karlsruhe Institute of Technology
KIT SCIENTIFIC REPORTS 7691

Biogas aus Landschaftspflegegras

Möglichkeiten und Grenzen

von

L. Leible, S. Kälber, G. Kappler,
H. Oechsner und M. Mönch-Tegeder

Report-Nr. KIT-SR 7691

Titelbild- und Layoutgestaltung

Gunnar Kappler, KIT/ITAS

Bildquellen

Titelbild: © Ludwig Leible und Gunnar Kappler, KIT/ITAS

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 1869-9669

ISBN 978-3-7315-0353-8

DOI: 10.5445/KSP/1000045983

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Zusammenfassung	1
Vorbemerkung	4
1 Hintergrund und Zielsetzung	5
2 Landschaftspflegegras als Biogassubstrat	7
2.1 Definition Landschaftspflegegras	7
2.2 Aufkommen in Deutschland und Baden-Württemberg	7
2.3 Landschaftspflegegras in der Biogaserzeugung	9
2.4 Landschaftspflegegras – Stoffeigenschaften	11
2.4.1 Aufbau	11
2.4.2 Abbauvorgänge im Biogasprozess	12
2.4.3 Stoffeigenschaften der für den Vergleich ausgewählten Substrate	13
2.5 Bereitstellung von Landschaftspflegegras	15
2.5.1 Grundannahmen und Beschreibung der Bereitstellungspfade/-kosten	17
2.5.2 Bereitstellungskosten unterschiedlicher Biogas-Substrate im Vergleich	21
2.5.3 Bereitstellungskosten von Landschaftspflegegras unterschiedlicher Bereitstellungsvarianten ..	22
2.5.4 Schlussfolgerungen	24
3 Aufbereitung von Landschaftspflegegras	25
3.1 Ziele und Verfahren	25
3.2 Querstromzerspannung von Landschaftspflegegras	27
3.2.1 Techno-ökonomische Beschreibung	27
3.2.2 Kosten der Querstromzerspannung	30
3.2.3 Schlussfolgerungen	32
4 Biogaserzeugung aus Landschaftspflegegras	33
4.1 Einleitung und methodisches Vorgehen	33
4.1.1 Ausgewählte Anlagengrößen und Biogas-Substrate	33
4.1.2 Methan-Ausbeuten	35
4.2 Kosten der Biogaserzeugung	37
4.2.1 Substratbereitstellung	37
4.2.2 Bau und Betrieb der Biogasanlagen, ohne und mit Landschaftspflegegras	38
4.2.3 Schlussfolgerungen	45
5 Verfahrenstechnische Untersuchungen	47
5.1 Spezifische Methanerträge	47
5.1.1 Material und Methoden	47
5.1.2 Ergebnisse	55
5.1.3 Diskussion und Schlussfolgerungen	59
5.2 Aufbereitung im Querstromzerstaner	60
5.2.1 Material und Methoden	60
5.2.2 Bestimmung der Effekte der mechanischen Aufbereitung	62
5.2.3 Diskussion und Schlussfolgerungen	65
6 Fazit und Ausblick	66
Literaturverzeichnis	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Aufkommensdichten des technischen Brennstoffpotenzials von Landschaftspflegematerial der einzelnen Bundesländer	8
Abbildung 2.2:	Massen- und energiebezogene Verteilung des Substrateinsatzes in Biogasanlagen in Deutschland (Bezugsjahr 2013).....	10
Abbildung 2.3:	Anaerobe Abbaubarkeit organischer Inhaltsstoffe von Biogas-Substraten	13
Abbildung 2.4:	Verfahrensschema zu Bereitstellung und Nutzung von Landschaftspflegegras in Biogasanlagen	16
Abbildung 2.5:	Bereitstellungskosten der Substrate (mit Gärrestnutzung) frei Biogasanlage	22
Abbildung 3.1:	Überblick zu den prinzipiellen Möglichkeiten einer Substratvorbehandlung.....	26
Abbildung 3.2:	Bereitstellungs- und Zerkleinerungskosten von L-Gras.....	31
Abbildung 4.1:	Verfahrensfließbild für eine 500 kW _{el} -Biogasanlage (Eltrop et al., 2013, angepasst).....	39
Abbildung 4.2:	Kosten und Kostenbestandteile der Biogasbereitstellung ohne und mit L-Gras.....	43
Abbildung 5.1:	Gefüllter Kolbenprober des HBT mit Inokulum und Testsubstrat	49
Abbildung 5.2:	HBT-Brutschrank mit montiertem Rotor und Ventilator	50
Abbildung 5.3:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der 2 Liter-Batch-Anlage	51
Abbildung 5.4:	Aufbau der 2 Liter-Batch-Gärversuchsanlage	52
Abbildung 5.5:	Fermenter mit Haspelrührwerk des Labor-Durchfluss-Fermenters	53
Abbildung 5.6:	Schemazeichnung des Labor-Durchfluss-Fermenters mit 17 l Nutzvolumen.....	54
Abbildung 5.7:	Tägliche spezifische Methanproduktion von vier Landschaftspflegematerialien im Durchflussversuch, nach Ablauf der Startphase	57
Abbildung 5.8:	Vergleich der spezifischen Methanerträge von 4 Landschaftspflegematerial-Chargen nach 3 Biogas-Bestimmungsverfahren (HBT, 2 l-Batch, kontinuierlich).....	58
Abbildung 5.9:	Schematische Darstellung des Querstromzerspanners (Bio-QZ)	61
Abbildung 5.10:	Beschaffenheit des Landschaftspflegematerials vor (oben) und nach (unten) der Querstromzersetzung	63
Abbildung 5.11:	Spezifische Methanerträge (2-Liter Batch-Fermenter) der untersuchten Chargen ohne und mit Querstromzersetzung (QZ)	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Eigenschaften der ausgewählten Biogas-Substrate	14
Tabelle 2.2:	Erträge und Lagerungsverluste der Biogas-Substrate	18
Tabelle 2.3:	Beschreibung der Anbau- und Ernteprozesse für Biogas-Substrate.....	19
Tabelle 2.4:	Transportentfernungen und -charakteristik für Biogas-Substrate in Abhängigkeit von der Anlagengröße	19
Tabelle 2.5:	Lagerung und Einbringung der Biogas-Substrate	20
Tabelle 2.6:	Fixe und variable Kostenkomponenten der Biogassubstrat-Bereitstellung	20
Tabelle 2.7:	Bereitstellungskosten für Biogas-Substrate	21
Tabelle 2.8:	Bereitstellungskosten für Landschaftspflegegras in Abhängigkeit der Biogas-Modellanlagen und Erfassungsvarianten	23
Tabelle 3.1:	Techno-ökonomische Kenndaten zur Aufbereitung von Landschaftspflegematerial im Querstromzerspaner	28
Tabelle 3.2:	Aufbereitungskosten von Landschaftspflegematerial im Querstromzerspaner	30
Tabelle 4.1:	Anlagengrößen, Substratanteile und -durchsätze der Biogas-Modellanlagen	34
Tabelle 4.2:	Methan-Erträge der eingesetzten Biogas-Substrate, ein Vergleich eigener Ansätze mit Literaturwerten	35
Tabelle 4.3:	Spezifische Methan- und Biogaserträge aus Gras, Heu und Weizenstroh, Ergebnisse von Labor- und Praxisversuchen (Nassvergärung)	36
Tabelle 4.4:	Kosten der Substratbereitstellung frei Biogasanlage (inkl. Gärrestausbringung).....	37
Tabelle 4.5:	Anlagen- und prozessspezifische Kenndaten zu den Biogas-Modellanlagen.....	41
Tabelle 4.6:	Ökonomische Analysen zu den Biogas-Modellanlagen	42
Tabelle 5.1:	Substrat-Nr., Substratherkunft und -art, TS- und oTS-Gehalte der untersuchten Landschaftspflegematerialien	47
Tabelle 5.2:	Verwendete Substrate und Varianten im 2 Liter-Batch-Gärversuch	52
Tabelle 5.3:	Tägliche Fütterungsmengen des kontinuierlichen Gärversuches	55
Tabelle 5.4:	TS-, oTS-, Methangehalt und spezifischer Methanertrag (im HBT) der untersuchten Landschaftspflegematerialien	56
Tabelle 5.5:	Methangehalt und spezifischer Methanertrag von vier Landschaftspflegematerialien im Durchflussversuch (Mittelwert, nach Ablauf der Startphase; ab Versuchstag 36).....	58
Tabelle 5.6:	Geerntete Flächen, Ballenzahlen, Chargengewichte und Hektarerträge	62
Tabelle 5.7:	Dauer der Aufbereitung, Durchsatz, Gesamt- und spezifischer Energieverbrauch der QZ-Chargen	62
Tabelle 5.8:	Inhaltsstoffe der untersuchten Chargen (ohne und mit QZ) zur Beurteilung der Silagequalität .	63
Tabelle 5.9:	Biogas- und Methanerträge je ha Erntefläche.....	64

Abkürzungsverzeichnis

FFH	Schutzgebiete nach der Fauna-Flora-Habitatrichtlinie
FM	Frischmasse
GJ	Gigajoule
GPS	Ganzpflanzensilage
GV	Großvieheinheit (entspricht einem Tier mit 500 kg Lebendgewicht)
HBT	Hohenheimer Biogasertragstest
H_i	Heizwert, unterer (inferior)
hPa	Hektopascal
HRT	Hydraulische Verweilzeit (Hydraulic Retention Time)
IER	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart
ILV	Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
k.A.	Keine Angaben
kJ	Kilojoule
kW_{el}	Kilowatt, elektrisch
kWh_{el}	Kilowattstunde, elektrisch
LAB	Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim
L-Gras	Landschaftspflegegras (Silage)
I_n	Normliter (Gasmenge, die im physikalischen Normzustand (0° C, 1013 mbar) 1 Liter ausfüllt)
m_n³	Normkubikmeter (bei 0 °C, 1013 mbar, 0 % Feuchtegehalt)
Mg	Megagramm (= 1 t)
oTS	organische Trockensubstanz
PJ	Petajoule
QZ	Querstromzerspaner
s	Sekunde
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
WW	Winterweizen

Zusammenfassung

Die Regelungen des EEG haben in den vergangenen Jahren zu einer erheblichen Steigerung der Zahl und Größe von landwirtschaftlichen Biogasanlagen geführt. Derzeit (im Jahr 2013) sind in Deutschland ca. 7.800 landwirtschaftliche Biogasanlagen in Betrieb, mit einer gesamten elektrischen Leistung von 3,5 GW. Für die Produktion von Biogas werden jährlich ca. 115 Mio. t Substrat eingesetzt, das zu 48 % aus Nachwachsenden Rohstoffen (davon 73 % Mais-silage), zu 44 % aus Gülle/Festmist und zu 8 % aus Bioabfall und Reststoffen besteht (Daniel-Gromke et al., 2014). Energetisch gesehen – gemessen am Biogasertrag – trägt Maissilage rd. 55 % zur Biogasgewinnung bei; die Wirtschaftsdünger Gülle und Festmist dagegen nur rd. 13 %.

Für die Produktion der in den Biogasanlagen eingesetzten Nachwachsenden Rohstoffe werden derzeit (2013) ca. 1,157 Mio. ha Ackerland genutzt. Das sind etwa 10 % der zur Verfügung stehenden Ackerfläche. Eine weitere Ausdehnung der Fläche stößt zumindest in einigen Regionen auf Akzeptanzprobleme, auch in Zusammenhang mit der für die Tierhaltung erforderlichen Anbaufläche. Es ist daher unerlässlich, alternative Substrate für die Erzeugung von Biogas zu finden. Diese bisher nicht genutzten Substrate sind allerdings häufig schwer für den Biogasprozess zu mobilisieren, da sie oft aufgrund ihres hohen Fasergehaltes im Biogasprozess nur teilweise abgebaut werden können, eine geringe Methanausbeute liefern und auch zu verfahrenstechnischen Problemen im Biogasfermenter führen (z.B. Bildung von Schwimmschichten, Brückenbildung, Verstopfungsgefahr, erhöhter Rühraufwand).

Landschaftspflegematerial ist eines dieser alternativen Substrate, das für eine verstärkte Verwendung in Biogasanlagen infrage käme. Hierzu müssen jedoch bestehende verfahrenstechnische Probleme durch die Wahl geeigneter Konditionierungsschritte, z.B. mechanische Substrataufbereitung, behoben werden. Landschaftspflegematerial fällt in der Regel an, ohne dass spezielle Anbaukosten zu berechnen sind. Die Kosten der Pflegemaßnahmen werden zumeist durch die Vergütung des damit verbundenen zusätzlichen Bewirtschaftungsaufwandes bereits getragen.

Vor diesem Hintergrund war es Ziel dieser Studie, die Verwertbarkeit von Landschaftspflegegras („L-Gras“) als alternatives Gärsubstrat in landwirtschaftlichen Biogasanlagen unter techno-ökonomischen und verfahrenstechnischen Aspekten zu untersuchen. Den spezifischen Rahmenbedingungen Baden-Württembergs sollte dabei Beachtung geschenkt werden.

Nach der Beschreibung von Hintergrund und Zielsetzung der vorliegenden Studie wurde zunächst der Kenntnisstand zum Aufkommen und zu den Stoffeigenschaften von L-Gras skizziert. Im Zusammenhang mit den verfahrenstechnischen Untersuchungen wurden an verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg (Schwarzwald und Schwäbische Alb) von Landschaftspflegeflächen mit unterschiedlichster Nutzungsintensität (von FFH-Flächen bis Golfplatz) Substratproben für Biogasuntersuchungen und für die mechanische Aufbereitung über einen Querstromzerspaner gesammelt. An ausgewählten Standorten wurden auch Ertragsmessungen durchgeführt, wobei Erträge von 3,7 bis 6,0 t FM/ha erzielt wurden, die damit erheblich unter dem Massenertrag der baden-württembergischen Ertragswiese liegen.

Die in diesem Zusammenhang durchgeführten techno-ökonomischen Analysen zum Bereitstellungsprozess (frei Biogasanlage) von L-Gras von Streuobstwiesen waren ein Schwerpunkt dieser Studie. Hierbei wird verdeutlicht, dass sich die Bereitstellung von L-Gras-Silage kaum von der klassischen Grassilagebereitstellung vom Dauergrünland unterscheidet, insofern sind die den techno-ökonomischen Analysen zugrunde gelegte Technologien bzw. Bereitstellungsverfahren mehr oder weniger Stand der Technik. Da das L-Gras nicht eigens zum Zwecke der Biogaserzeugung angebaut wird, sondern vielmehr als Reststoff bei landschaftspflegerischen Maßnahmen anfällt, kommen hierbei bestimmte Kostenbestandteile (z.B. Pacht) nicht zum Tragen. Trotz dieser Gründe liegen die Kosten für die Bereitstellung von L-Gras doch merklich über denen von Maissilage oder Getreideganzpflanzensilage. Hierbei zeigten die Analysen, dass die Bereitstellung über Silageballen ökonomisch eine interessante Alternative zu den herkömmlichen Silageverfahren darstellt.

Die durchgeführten verfahrenstechnischen Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung in einem Querstromzerspanner waren mit einem Energiebedarf zwischen 21 und 27 kWh_{el}/t FM verbunden, der Methanertrag konnte hierdurch jedoch nicht signifikant gesteigert werden. Die hierzu durchgeführten techno-ökonomischen Analysen machen deutlich, dass die Auslastung einer solchen Aufbereitungsanlage die bestimmende Größe für deren wirtschaftlichen Betrieb ist. Da die Aufbereitung von L-Gras jedoch zu keiner signifikanten Steigerung der Methanerträge führte, wurde dieser Verfahrensschritt bei den nachfolgenden techno-ökonomischen Analysen zur Biogaserzeugung nicht weitergehend betrachtet.

Die verfahrenstechnischen Untersuchungen (im Labormaßstab) zu den Methanausbeuten erbrachten für die extensiv gewachsenen Landschaftspflegematerialien Erträge von 152 bis 307 Normliter Methan je kg oTS. Die zum Vergleich geernteten Gräser vom Golf- und Sportplatz lagen bei 309 bis 340 Normliter Methanertrag je kg oTS. Die flächenbezogenen Methanerträge lagen bei den untersuchten Standorten zwischen 580 und 775 Normkubikmeter Methan/ha und damit nur bei ca. 20 % des Ertrages von intensiv bewirtschafteten Grünlandflächen.

Techno-ökonomische Analysen zur Bereitstellung und Verwertung von L-Gras wurden in zwei für Baden-Württemberg typischen Biogas-Modellanlagen (150 bzw. 500 kW_{el}) durchgeführt. Hierzu erfolgten detaillierte Analysen im Vergleich zum Substratmix von Rindergülle, Maissilage, W-Weizen-Ganzpflanzensilage und Grassilage und deren teilweiser Substitution.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser Analysen, dass die Produktion von Biogas aus L-Gras einen sehr teuren Verwertungsweg für dieses Substrat darstellt. Nicht einmal die noch relativ günstigen Regelungen des EEG 2008 (zusätzliche Vergütung von 20 €/MWh_{el}) wären ausreichend, um die bestehenden Kostennachteile auszugleichen. In der aktuell ab 01.08.2014 gültigen Version des EEG (2014) ist eine spezifische Förderung für das Landschaftspflegematerial sogar komplett entfallen.

Im Sinne eines Fazits und Ausblicks werden abschließend Maßnahmen und bestehender Forschungsbedarf angeführt, um den Prozess der Biogaserzeugung zu optimieren und somit die Wettbewerbsfähigkeit der Verwendung von L-Gras als Biogassubstrat zu steigern. Die detaillierten techno-ökonomischen Analysen zur Verwendung von L-Gras-Silage als Biogas-Substrat machen deutlich, dass zusätzliche Fördermaßnahmen nötig sind, um diesem Substrat eine tragfähige ökonomische Perspektive zu eröffnen.

Vor diesem Hintergrund müssen folglich alternative Förderungsmöglichkeiten angeboten und genutzt werden, um die Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Landschaftspflegematerial in Biogasanlagen darstellen zu können. Ansätze hierzu gibt es. Um darüber hinaus die Wettbewerbsfähigkeit der Verwendung von lignozellulosereicher L-Gras-Silage in Biogasanlagen steigern zu können, ist die Erhöhung des Abbaugrades der oTS und somit der spezifischen Methanausbeute sicherlich mit eines der wichtigsten Optimierungsziele. Kostengünstige Aufschlussverfahren für lignozellulosereiche Biogas-Substrate, insbesondere aber auch die Realisierung zweiphasiger Verfahrenskonzepte in der Biogasanlage sind hierfür sicherlich zentrale Ansätze.

Der politisch gewünschten Verbreiterung der Palette an möglichen Biogas-Substraten würde man hierdurch einen deutlichen Schritt näher kommen.

Grundlage dieses Reports war ein Projekt des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des KIT und der Universität Hohenheim (Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie: Dr. H. Oechsner, Dr. M. Mönch-Tegeger), zum Themenbereich „Biogas aus Landschaftspflegegras“. Für die Förderung aus Mitteln der Baden-Württemberg Stiftung möchten sich die Autoren dieses Reports beim Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR) an dieser Stelle nochmals bedanken.

Aufgrund des begrenzten Projektrahmens konnten nicht zu allen wesentlichen Fragestellungen umfassende Untersuchungen durchgeführt werden. Dies trifft insbesondere auf flächendeckende Analysen zum erschließbaren Potenzial an Landschaftspflegegras in Baden-Württemberg zu. Ferner konnten – mit Ausnahme der durchgeführten verfahrenstechnischen Untersuchungen (s. Kapitel 5) zu den spezifischen Methanerträgen und zur mechanischen Substrataufbereitung mit einem Querstromzerspaner – keine weitergehenden empirischen Untersuchungen durchgeführt werden. Vielmehr musste bei den durchzuführenden techno-ökonomischen Prozesskettenanalysen – von der Substratbereitstellung bis zur Biogasproduktion – des systemanalytischen Teils (s. Kapitel 2-4) auf aktuell verfügbare Daten aus der Literatur zurückgegriffen werden. Hierbei wurde aber mit besonderem Augenmerk auf die spezifischen Rahmenbedingungen in Baden-Württemberg geachtet. Dies betrifft z.B. die Größe der zwei ausgewählten Biogas-Modellanlagen und die ihnen zugeführten Substrate und deren Anteile.

In Kapitel 1 wird zunächst der Hintergrund und die Zielsetzung dieser Untersuchung dargestellt, gefolgt von Kapitel 2, das sich mit der Definition, dem Aufkommen, den Stoffeigenschaften und den Verfahren zur Bereitstellung von Landschaftspflegegras für die Biogasproduktion auseinandersetzt.

In Kapitel 3 wird auf die Substrataufbereitung von Landschaftspflegegras eingegangen und am Beispiel der Querstromzerspanung anhand techno-ökonomischer Kenngrößen kritisch beleuchtet, welche Perspektive diesem Aufbereitungsverfahren zugeordnet werden kann.

Kapitel 4 konzentriert sich auf die techno-ökonomische Analyse und Bewertung der Verwendung von Landschaftspflegegras in zwei ausgewählten Biogas-Modellanlagen, im Substrat-Mix – Maissilage, Winterweizen-Ganzpflanzensilage (GPS), Grassilage (vom Dauergrünland) und Rindergülle. Bei den spezifischen Methanerträgen von Landschaftspflegegras wird auf den hierzu in diesem Projekt gewonnenen verfahrenstechnischen Ergebnissen aufgebaut (s. Kapitel 5.2).

Wie bereits angeführt, konzentriert sich Kapitel 5 auf verfahrenstechnische Untersuchungen zu den spezifischen Methanerträgen verschiedenster Landschaftspflegematerialien und auf deren mechanischen Aufbereitung in einem Querstromzerspaner.

Abschließend wird im Kapitel 6 ein Fazit aus dieser Untersuchung gezogen.

1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG

Die Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahre 2000 sorgte für einen stetigen Zuwachs an Biogasanlagen in ganz Deutschland. Während im Jahr 2000 lediglich rund 1.000 Anlagen in Betrieb waren, umfasste der Biogasanlagenbestand 2013 bereits über 7.800 Anlagen (Fachverband Biogas e.V., 2014). Gegenwärtig beanspruchen die für die Biogaserzeugung angebaute Energiepflanzen mit rund 1,3 Mio. ha bzw. 54 %, die größte Anbaufläche aller in Deutschland angebaute nachwachsenden Rohstoffe (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2014). Insofern dürften durch diesen Boom die verfügbaren Flächenpotenziale zur Erzeugung von Energiepflanzen inzwischen weitestgehend erschlossen sein.

Um im Rahmen der Energiewende einen weiteren nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung zu ermöglichen, ist daher die Erschließung und Verwertung von alternativen Einsatzstoffen notwendig. Ein mögliches alternatives Substrat zur Biogaserzeugung könnte Landschaftspflegematerial darstellen, welches im Rahmen des Erhalts der Kulturlandschaft bei der Pflege von Grünland und Naturschutzflächen anfällt. Aufgrund der extensiven Nutzung ist jedoch die Verwertbarkeit der Produkte von diesen Flächen nur eingeschränkt möglich. Im ungünstigsten Fall werden die geernteten Materialien kompostiert und keiner weiteren Nutzung zugeführt.

So werden insbesondere der Verwendung von Landschaftspflegegras in Biogasanlagen von verschiedenen Seiten günstige Perspektiven eingeräumt. Vor allem mit der Begründung, dass hierfür keine speziellen Anbaukosten zu veranschlagen sind und mit der durchgeführten Pflegemaßnahme und deren Bezahlung (Vergütung) auch die Erntekosten bereits zu großen Teilen abgedeckt sind. Dies könnte zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung beitragen. Jedoch weist das Landschaftspflegegras in der Regel hohe Rohfaser- und Ligningehalte auf, was hohe Ansprüche an die vorhandene Anlagentechnik stellt. Demzufolge ist ohne spezielle Aufbereitungsverfahren eine Verwertung dieses Materials in Biogasanlagen nur erschwert möglich. Zudem ist die fehlende Kenntnis über die Verwertbarkeit und Gasausbeute dieser Substrate ein großes Hindernis für die Anlagenbetreiber. Inzwischen sind jedoch verfahrenstechnische Lösungen verfügbar, die eine störungsfreie Verwertung von Landschaftspflegematerialien im Biogasprozess ermöglichen können.

Vor diesem Hintergrund war es Ziel dieses Projekts, die Verwertbarkeit von Landschaftspflegegras als alternatives Gärsubstrat in landwirtschaftlichen Biogasanlagen unter Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen Baden-Württembergs zu untersuchen.

Anhand ausgewählter Prozessketten (vgl. Abbildung 2.4, S. 16) – von der Bereitstellung des Landschaftspflegegrases bis zur Biogasproduktion in Modellanlagen – und den von der Universität Hohenheim zur Verfügung gestellten Daten sollte untersucht und bewertet werden, inwieweit Landschaftspflegegras unter Berücksichtigung der wesentlichen technischen und ökonomischen Kennwerte für die Biogasproduktion geeignet ist.

Hierbei standen techno-ökonomische Analysen zu folgenden Aspekten im Vordergrund:

- Bereitstellungskosten des Landschaftspflegegrases frei Biogasanlage
- Kosten der Aufarbeitung (Zerkleinerung/Querstromzerspannung) des Substrats
- Kosten der Biogaserzeugung
- Ausmaß an finanziellen Anreizen, um bestehende ökonomische Nachteile auszugleichen

Für die Untersuchung der techno-ökonomischen Auswirkungen des Einsatzes von Landschaftspflegegras als Co-Substrat in Biogasanlagen, wurden zwei für Baden-Württemberg typische Anlagengrößen (150 kW_{el} „Gülle-geprägt“ und 500 kW_{el} „Mais-geprägt“) – betrieben mit den Basissubstraten Rindergülle, Maissilage, Winterweizen-GPS und Grasschnitt (Silage) von Dauergrünland – ausgewählt. Dabei beschränkt sich der Anteil des als Co-Substrat eingesetzten Landschaftspflegegrases, je nach Anlagengröße, auf 10 bzw. 20 %. Eine genaue Darstellung zu den jeweiligen Biogas-Modellanlagen bzw. den dort eingesetzten Substratmengen findet sich in Kapitel 4.1.1, S. 33.

Ein besonderer Fokus lag zudem auf verfahrenstechnischen Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung des faserreichen Substrates, um dessen biologischen anaeroben Abbau im Biogasfermenter zu erleichtern bzw. sonstige verfahrenstechnische Nachteile zu beseitigen bzw. zu reduzieren. Hierbei standen folgende Aspekte im Mittelpunkt:

- Untersuchung verschiedener Materialien aus exemplarisch ausgewählten Grünflächen unterschiedlicher Nutzungsintensität bezüglich des spezifischen Gasertrags.
- Ermittlung des Energiebedarfs für die Aufbereitung verschiedener Landschaftspflegematerialien im Querstromzerspanner im Praxismaßstab.
- Ermittlung des Einflusses der mechanischen Aufbereitung mittels Querstromzerspanner im Praxismaßstab auf die Abbaubarkeit und den spezifischen Gasertrag von ausgewählten Landschaftspflegematerialien.

2.1 Definition Landschaftspflegegras

Im Allgemeinen werden die im Rahmen von landschaftspflegerischen Maßnahmen anfallenden halmgutartigen Rückstände als Landschaftspflegegras verstanden und werden zusammen mit den holzartigen Rückständen (Landschaftspflegeholz) unter dem Begriff des Landschaftspflegematerials zusammengefasst (vgl. Menzel und Thoss, 2012).

Das *Landschaftspflegeholz* fällt bei der vegetationstechnischen Pflege von Hecken, Bäumen, Feld- und Ufergehölzen an. Zu den holzigen Rückständen kann auch das Schwemmholz in Rechenanlagen wasserbaulicher Einrichtungen von Fließgewässern gezählt werden.

Das *Landschaftspflegegras* ergibt sich als Grasschnitt bei der Pflege von Grünflächen. Mengemäßig bedeutsam ist hierbei insbesondere das bei der Pflege von landwirtschaftlichem Grünland anfallende Gras, das nicht mehr für die Verfütterung benötigt wird. Ferner fallen auf den zu pflegenden Flächen (öffentliche Park- und Grünanlagen, Privatgärten, Friedhöfe, Straßen-, Feld- und Waldränder, Bahntrassen und Wasserstraßen, unter Hochspannungsleitungen, Natur- bzw. Landschaftsschutzgebiete, Obst- und Rebflächen) grasartige Rückstände an.

Der Begriff des Landschaftspflegematerials ist u.a. durch die Biomasseverordnung 2012 (BiomasseV, 2012) im Erneuerbare-Energien-Gesetz verankert. Gemäß dieser Verordnung werden darunter Einsatzstoffe verstanden, „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“. Bei der EEG-Novellierung 2014 (EEG, 2014) wurde die zugehörige Biomasseverordnung am 21.7.2014 erneut geändert – durch Wegfall der Einsatzstoffvergütungsklassen ist eine Definition des Begriffs in der Verordnung nun nicht mehr verankert.

2.2 Aufkommen in Deutschland und Baden-Württemberg

Bezüglich des Aufkommens von Landschaftspflegematerial gibt es in der Literatur unterschiedliche Angaben. Laut einer Schätzung des deutschen Verbandes für Landschaftspflege e.V. (Thoss und Menzel, 2012) beträgt das tatsächlich technisch nutzbare Flächenpotenzial deutschlandweit ca. 900.000 ha, welches einem Energiepotenzial von etwa 12 PJ/a entspricht.

In einer Abschätzung von Kern et al. (2009) wurde das Aufkommen krautiger und halmartiger Materialien aus Straßenbegleitgrün mit ca. 1,1 Mio. t FM pro Jahr abgeschätzt. Dagegen ist nach Seyfert et al. (2011) mit einem jährlichen Aufkommen von 3,3 Mio. t FM Grünschnitt und 1,4 Mio. t FM an holzartigen Biomassen aus der Landschaftspflege in der Bundesrepublik Deutschland zu rechnen. Wie Abbildung 2.1 verdeutlicht, sind die größten Potenzialdichten (GJ/ha) in Rheinland-Pfalz und den Stadtstaaten zu finden. Mit einem Brennstoffpotenzial im Bereich von 0,5 bis 1 GJ/ha ist Baden-Württemberg im Mittelfeld einzuordnen.

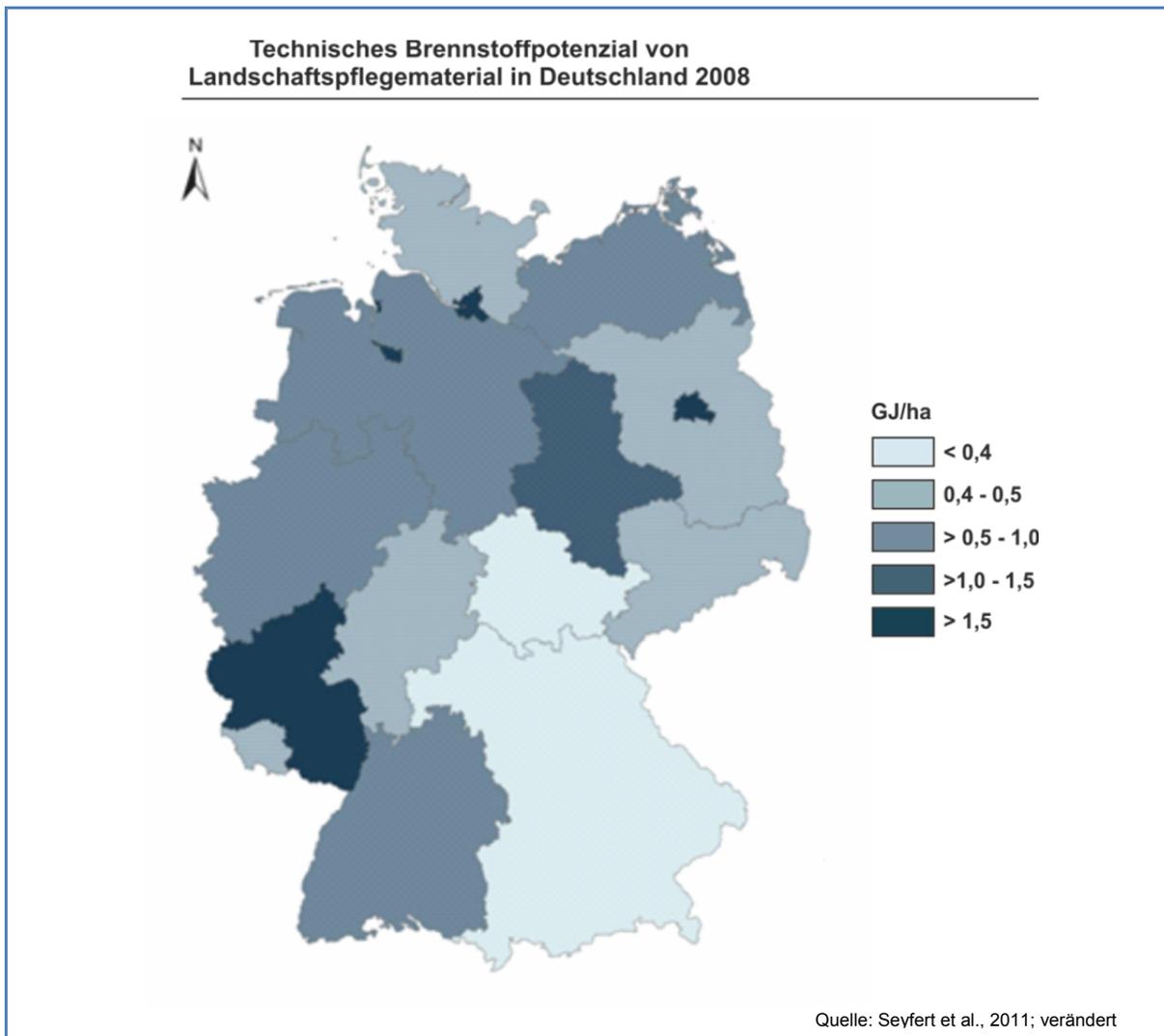


Abbildung 2.1: Aufkommensdichten des technischen Brennstoffpotenzials von Landschaftspflegematerial der einzelnen Bundesländer

Landschaftspflegematerial fällt auf einer Vielzahl von Flächen an, zu denen auch Flora-Fauna-Habitat-Wiesen (FFH) zählen. Demnach umfassen nach Untersuchungen der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW, 2013) solche FFH-Gebiete deutschlandweit ca. 5,4 Mio. ha, von denen rund 426.000 ha in Baden-Württemberg liegen.

Nach Fabricius et al. (2011) werden die derzeit anfallenden Landschaftspflegematerialien in Baden-Württemberg vorwiegend kompostiert und nur zu geringen Anteilen energetisch verwertet. In einer Studie von Rösch et al. (2007) wurde das landkreisspezifische Potenzial der ungenutzten Grünlandflächen in Baden-Württemberg für das Jahr 2003 ermittelt. Bei diesen Flächen, die insbesondere aufgrund rückläufiger Viehbestände nicht mehr für die Tierfütterung benötigt werden, ergibt sich ein potenzieller Überschuss von rund 135.000 ha. Dies stellt ca. 21 % der in Baden-Württemberg vorhandenen Grünlandfläche dar, wobei davon ausgegangen wird, dass die Nutzung des Grünlandes bis 2015 aufgrund von Änderungen in der Tierhaltung und des Futtermittelbedarfs weiter zurückgehen wird. Demzufolge ist nach dieser Studie mit einer zunehmenden Verfügbarkeit von Landschaftspflegematerialien bzw. Grünlandaufwüchsen zu rechnen.

Darüber hinaus gibt es für Baden-Württemberg einige regionale Potenzialabschätzungen, die sich auf exemplarisch ausgewählte naturräumliche Einheiten beziehen. Als Beispiel sei hier die Studie von BUND und Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg (2009) erwähnt, bei der es um die Abschätzung des energetisch nutzbaren Potenzials von Resthölzern aus der Landschaftspflege u.a. im Biosphärengebiet der Schwäbischen Alb ging.

Zusammenfassend lässt sich jedoch festhalten, dass es gegenwärtig keine aktuellen Studien zum tatsächlich in Baden-Württemberg anfallenden Landschaftspflegegras gibt, bei denen gleichzeitig eine hohe räumliche Differenzierung (z.B. auf Gemeindeebene) und aktuelle Nutzungsstrukturen berücksichtigt und dargestellt wurden. Zugleich wurden bei den bisherigen Abschätzungen teilweise stark voneinander abweichende methodische Ansätze gewählt, so dass ein Vergleich oder eine sinnvolle Zusammenfassung der Ergebnisse massiv erschwert oder gar unmöglich ist.

2.3 Landschaftspflegegras in der Biogaserzeugung

Grundsätzlich lässt sich für die Biogaserzeugung eine Vielzahl biogener Substrate verwenden. In landwirtschaftlich genutzten Biogasanlagen werden jedoch vorwiegend tierische Exkrememente in Verbindung mit Energiepflanzen eingesetzt. Entsprechend einer am Deutschen Biomasse Forschungszentrum (DBFZ) durchgeführten Untersuchung, welche sich auf die Befragung von Biogasanlagenbetreibern (Stichprobenumfang, n=702) stützt, bestehen die für die Biogaserzeugung verwendeten Einsatzstoffe massenbezogen anteilig aus 44 % tierischen Exkrementen, 48 % nachwachsenden Rohstoffen und zu 8 % aus Bioabfällen bzw. weiteren organischen Reststoffen (Daniel-Gromke et al., 2014).

Wie aus Abbildung 2.2 anhand der Massenanteile (in % FM) ersichtlich, bilden die nachwachsenden Rohstoffe neben den tierischen Exkrementen den bedeutendsten Einsatzstoff für Biogasanlagen in Deutschland. Daneben sind die außerlandwirtschaftlichen Substrate, wie z.B. Rückstände aus der Lebensmittelindustrie und Gemüse- und Speiseabfälle eher unbedeutend. Als nachwachsende Rohstoffe werden in den Biogasanlagen überwiegend Mais-, Getreide- und Grassilagen eingesetzt, wobei Maissilage den dominierenden Einsatzstoff darstellt.

Energetisch gesehen – gemessen am Biogasertrag – trägt Maissilage rd. 55 % zur Biogasgewinnung bei; die Wirtschaftsdünger Gülle und Festmist dagegen nur rd. 13 % – obgleich sie massenbezogen (FM) rd. 44 % der Substrate in landwirtschaftlichen Biogasanlagen ausmachen.

In der Praxis werden diese nachwachsenden Rohstoffe bzw. Energiepflanzen vorwiegend als Co-Substrate in Verbindung mit tierischen Reststoffen in Biogasanlagen eingesetzt (Eder und Schulz, 2012). Mit einem massenbezogenen Anteil von lediglich 1,2 % erscheint das Landschaftspflegematerial in der Biogaszeugung zum gegenwärtigen Zeitpunkt mengenmäßig eher unbedeutend.

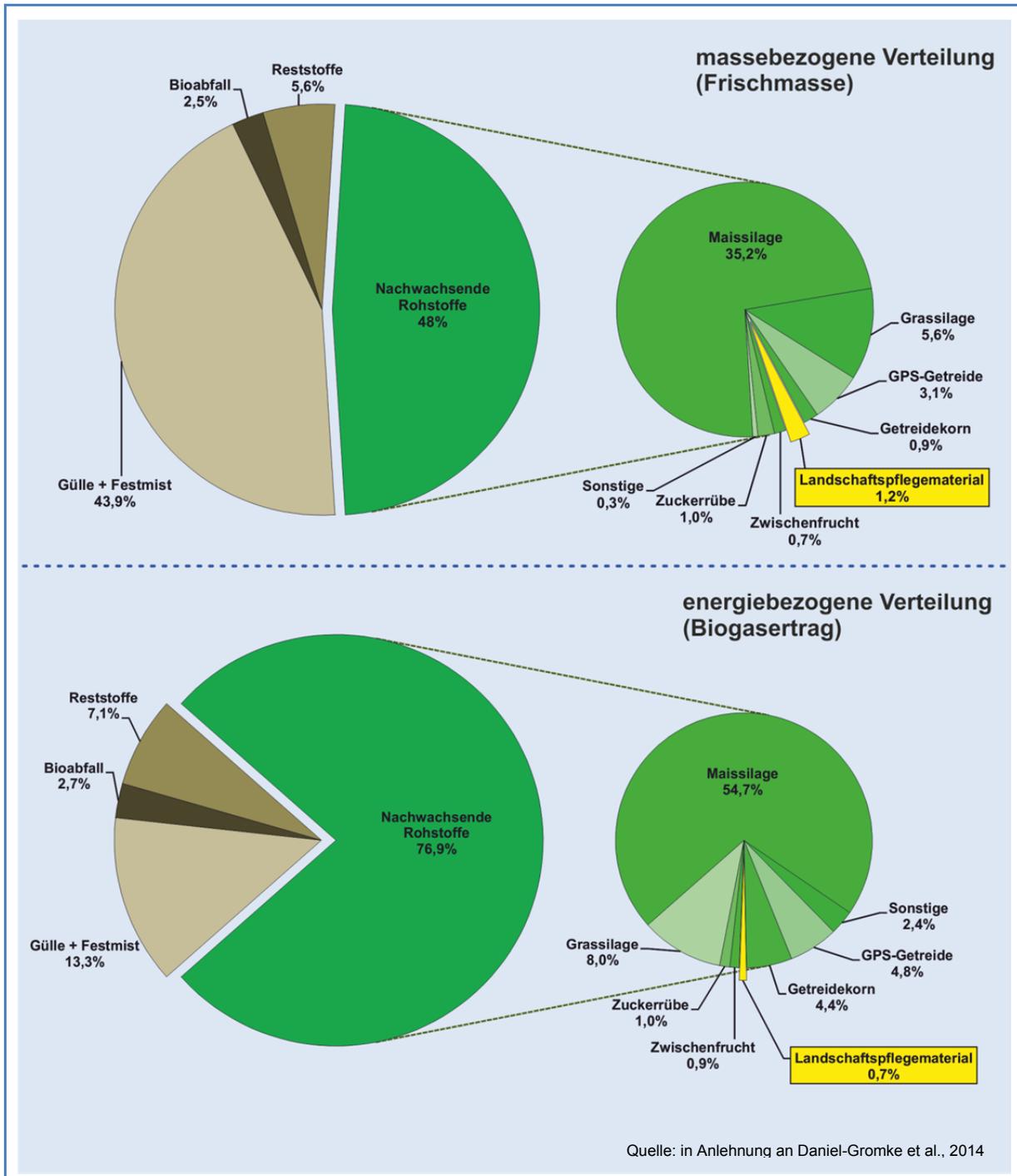


Abbildung 2.2: Massen- und energiebezogene Verteilung des Substrateinsatzes in Biogasanlagen in Deutschland (Bezugsjahr 2013)

2.4 Landschaftspflegegras – Stoffeigenschaften

2.4.1 Aufbau

Maßgeblich für den Aufbau bzw. die Zusammensetzung von Biogas-Substraten ist, dass es im Laufe des Wachstums von Pflanzen zu einer zunehmenden Einlagerung von Lignin in die Zellwände kommt, um die Stabilität der Pflanzen zu gewährleisten (Maurer und Winkler, 1982). Die Verknüpfung zwischen Zellulose und Hemizellulosen mit Lignin führt zur Bildung eines Lignozellulosekomplexes, der sogenannten Lignozellulose (Loll, 2002). Zellulose entsteht durch eine Verknüpfung von D-Glucose-Molekülen über Wasserstoffbrücken (Kaltschmitt et al., 2009). Es ist ein lineares Polysaccharid, wobei die einzelnen Glucosemoleküle über β -1,4-glycosidische Bindungen miteinander verknüpft sind. Die Zellulosemoleküle lagern sich aufgrund der Wasserstoffbrücken zu Elementarfibrillen zusammen, in denen sich kristalline (geordnete) und amorphe (ungeordnete) Bereiche abwechseln (Peters, 2004). Diese Elementarfibrillen verbinden sich wiederum zu Mikrofibrillen, welche sich weiter zu Makrofibrillen zusammenlagern und somit die Zellulosefasern bilden (Meiland, 2011). Hemizellulosen (Polyosen) sind verzweigte Polysaccharide, welche aus fünf unterschiedlichen Zuckerbausteinen aufgebaut sind. Im Wesentlichen existieren fünf verschiedene Arten von Hemizellulosen, welche je nach Pflanzenart in unterschiedlichen Konzentrationen vorliegen. Die Bausteine können in Hexosen (Galactose, Glucose, Mannose) und Pentosen (Arabinose, Xylose) unterteilt werden. Während Nadelhölzer überwiegend Hemizellulosen aus Mannose und Galactose bilden, bestehen die Hemizellulosen von Laubhölzern und landwirtschaftlichen Erzeugnissen (z.B. Stroh und Gras) vorwiegend aus Xylose. Hemizellulose dient im Zellverband als Kittsubstanz zwischen Lignin und Zellulosefasern, wodurch es den Zellwänden zusätzliche Stabilität verleiht. Da Hemizellulose im Vergleich zu Zellulose nicht kristallin, sondern stark verzweigt und amorph ist, weist sie hydrophile Eigenschaften auf. Dies führt dazu, dass sie für hydrolytische Enzyme leichter zugänglich ist und die Hemizellulose leichter abgebaut werden kann als Zellulose und Lignin.

Lignin ist ein stark vernetztes Polymer, welches aus aromatischen Bindungen, Doppelbindungen und phenolischen Gruppen zu einem dreidimensionalen Makromolekül aufgebaut ist. Dieser Aufbau sorgt dafür, dass Lignin hauptsächlich hydrophob und somit biochemisch nur schwer abbaubar ist. Wie bei den Hemizellulosen unterscheidet sich die Ligninstruktur zwischen den verschiedenen Pflanzenarten. Im Wesentlichen besteht sie aber immer aus ähnlichen Grundmolekülen, welche zu einem stark vernetzten amorphen Aufbau führen.

Die Grundbestandteile von Lignin sind Coniferylalkohol, Sinapylalkohol und Cumarylalkohol, welche im Molekül auf unterschiedlichste Weise verknüpft sein können (Gruber, 2011). Das Lignin verbindet sich mit der Zellulose durch Wasserstoffbrücken und mit den Hemizellulosen durch kovalente Bindungen. Cellulose und Hemizellulosen verbinden sich ebenfalls über Wasserstoffbrücken.

Aufgrund der starken Einbindung von Lignin in die entstehenden Komplexe, ist die Lignozellulose mit steigendem Ligningehalt zunehmend resistenter gegenüber biochemischen Abbauprozessen (Bekker, 2007). Dies führt dazu, dass die Vergärung lignozellulosehaltiger Substrate in Biogasanlagen i.d.R. nur unvollständig und eher langsam abläuft (Schieder et al., 2009). Im folgenden Kapitel wird darauf näher eingegangen.

2.4.2 *Abbauvorgänge im Biogasprozess*

Die Abbauvorgänge im Biogasprozess von lignozellulosereichen Substraten – hierzu zählen beispielsweise Landschaftspflegematerial, Stroh und andere landwirtschaftliche Reststoffe, sowie der Großteil halmgutartiger Biomassen – unterscheiden sich im Wesentlichen nicht von dem bekannten anaeroben Abbauschema. Die strukturarmen Kohlenhydrate, wie beispielsweise Stärke, können durch die Mikroorganismen leicht angegriffen und somit relativ schnell abgebaut werden. Für Substrate mit einem hohen Anteil an strukturreichen Kohlenhydraten, welche mit dem Lignin eingebunden sind (Lignozellulosekomplexe), ist die Hydrolyse der abbaulimitierende Schritt. Dies führt dazu, dass die Hydrolysephase bedeutend länger dauern kann, da bei der mikrobiellen Hydrolyse der Zellulose und Hemizellulose, aufgrund ihrer komplizierten biochemischen Struktur, das Zusammenwirken sehr vieler Enzyme notwendig ist (Schlegel, 1992).

Die Zellulose wird enzymatisch durch ein Cellulasensystem gespalten, welches aus mindestens drei verschiedenen Enzymen besteht. Das erste Enzym greift die β -1,4-Bindungen innerhalb des Zellulosemoleküls an, wodurch dieses in lange Kettenabschnitte zerlegt wird. Das zweite Enzym spaltet von den entstandenen Ketten wiederum die Zellobiose ab, welche dann vom dritten Enzym, unter Bildung von Glucose, hydrolysiert wird. Der Hemizelluloseabbau erfolgt durch das Enzym Xylanase, welches gleichzeitig an mehreren Stellen des Moleküls angreift. Der mikrobielle Abbau von Hemizellulosen erfolgt schneller als der der Zellulose, da es eine größere Anzahl an Hemizellulose abbauenden Mikroorganismen gibt und die Xylanasen zusätzlich auch von einigen Zellulose abbauenden Mikroorganismen ausgeschlossen werden.

Aus der enzymatischen Hydrolyse von Zellulose und Hemizellulosen gehen unter anderem die Produkte Glucose, Zellobiose und Pentosen hervor, welche anschließend über die restlichen drei Phasen Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese zu Methan umgewandelt werden (Schlegel, 1992). Die dabei ablaufenden Stoffumwandlungsprozesse unterscheiden sich nur unwesentlich von denen, die bei strukturarmen Kohlenhydraten stattfinden. Der einzige Unterschied hierbei ist, dass eine Hemmung der Acetogenese bei lignozellulosehaltigen Substraten durch die langsam ablaufende Hydrolyse- und Acidogenese eher unwahrscheinlich ist. Dieser langsame Ablauf sorgt dafür, dass der Wasserstoffpartialdruck nicht so schnell ansteigen kann und somit keine Anreicherung organischer Säuren und somit keine Hemmung des Prozesses stattfindet (Bekker, 2007).

Entsprechend den Ergebnissen von Agbor et al. (2011) erfordern Substrate, welche neben Zellulose und Hemizellulosen auch Lignin enthalten, vorab eine Aufbereitung (vgl. Kapitel 3, S. 25), um überhaupt von den Mikroorganismen abgebaut werden zu können. Aufgrund der starken Verzweigungen zwischen den drei Komponenten des Lignozellulosekomplexes, sind die Porenräume zu klein für Bakterien, so dass sie sich nicht in die Strukturen einlagern können (Haeffner et al., 2010).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die organischen Inhaltsstoffe in strukturreiche und strukturarme Kohlenhydrate (Butler und Bailey, 1973), Eiweißstoffe, Lipide und Lignin unterteilen lassen, welche die Abbaubarkeit des jeweiligen Substrates im Wesentlichen bestimmen. In Abbildung 2.3 ist die anaerobe Abbaubarkeit dieser Stoffgruppen schematisch dargestellt.

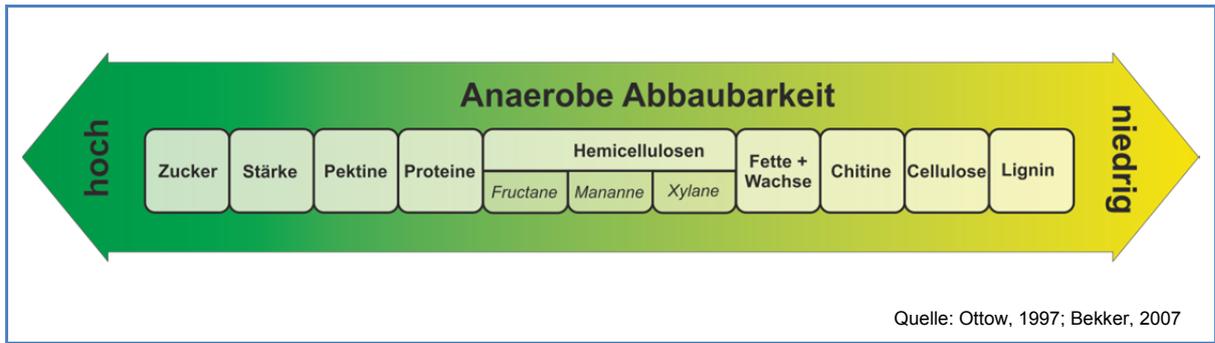


Abbildung 2.3: Anaerobe Abbaubarkeit organischer Inhaltsstoffe von Biogas-Substraten

Von der biochemischen Zusammensetzung der eingesetzten Substrate wird somit im Wesentlichen auch die Gasausbeute und -qualität bestimmt. Die komplexe Struktur und die daraus resultierenden Schwierigkeiten beim enzymatischen Abbau von Lignozellulose führen dazu, dass die Vergärung solcher Substrate i.d.R. unvollständig erfolgt und die verbleibenden Gärreste meist größere Mengen an nicht abgebauten Faserstoffen enthalten. Um eine annähernd vollständige Umsetzung zu erreichen sind daher häufig sehr lange Gärzeiten notwendig.

Weitere Probleme bei der Vergärung solcher faserreicher Substrate in Biogasanlagen ergeben sich durch die Neigung zur Quellung und zum Aufschwimmen, was dann zur Verfilzung und Bildung von Schwimmschichten an der Oberfläche im Fermenter führt – dies erschwert letztlich auch den Gasaustritt (Schieder et al., 2009). Hinzu kommt, dass solch faserhaltige Biomasse auch die Gefahr birgt, Eintragstechnik und Pumpen zu verstopfen (Thoss und Menzel, 2013).

In der Praxis bedeutet dies, dass je extensiver Grasland bzw. Naturschutzflächen genutzt werden und je später der Erntezeitpunkt liegt, desto höher ist der Rohfasergehalt und somit auch der Lignozellulosegehalt des Aufwuchses von diesen Flächen und desto geringer der Methanertrag (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2010). Jedoch verringern späte Erntezeitpunkte die Methanausbeute nicht nur direkt, sondern auch indirekt, da sie zuvor den Silierprozess erschweren und somit zu verminderten Silagequalitäten führen (Prochnow et al., 2007). Eine Zusammenstellung von Daten zu erzielbaren Methanausbeuten unterschiedlicher Substrate findet sich in Kapitel 4.1.2 (S. 35).

2.4.3 Stoffeigenschaften der für den Vergleich ausgewählten Substrate

Aufgrund der spezifischen Stoffeigenschaften und der derzeit eher wenig verfügbaren Mengen kann Landschaftspflegegras wirtschaftlich lediglich als Co-Substrat in Biogasanlagen eingesetzt werden.

Die für die Untersuchung ausgewählten Biomassen gehören zu den gängigsten in Biogasanlagen verwendeten Substraten. Als Grundlage für deren Auswahl dienten neben statistischen Daten aus der Agrarstrukturerhebung in Baden-Württemberg (StaLa, 2008) auch Daten aus einer vom IER durchgeführten Befragung von Biogasanlagenbetreibern in Baden-Württemberg zum Betriebsjahr 2008 (Stenull et al., 2009). Diese Auswahl ist im Wesentlichen identisch mit den bereits im Projekt „Systemanalyse zur Erzeugung und Nutzung biogener Gase in Baden-Württemberg“ berücksichtigten Substraten (Eltrop et al., 2013).

Die Spezifikation der Biogas-Substrate, die bei dieser Systemanalyse betrachtet wurden (vgl. Kapitel 4), fasst Tabelle 2.1 zusammen, wobei diese tabellarische Zusammenstellung auf

einer umfangreichen Literaturrecherche beruht. Sie enthält auch Ergebnisse der Elementaranalyse von Gülle, die auf Analysen des Projektpartners, der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie (LAB) der Universität Hohenheim basieren. Beim Landschaftspflegegras orientieren sich die Angaben zum oTS- und Aschegehalt an den von der LAB durchgeführten Analysen (Tabelle 5.1, S. 47); die Angaben zur Elementaranalyse und Zusammensetzung der Asche wurden anhand von Angaben der PHYLLIS2-Datenbank (PHYLLIS2, 2014) zu Gras aus Naturschutzgebieten abgeleitet. Die Heizwerte wurden anhand von Nährungsformeln nach Boie (Härdtlein et al., 2004) berechnet.

Tabelle 2.1: Eigenschaften der ausgewählten Biogas-Substrate

Parameter	BASISSUBSTRATE				Gras (Landschaftspflege), 2 Schnitte		
	Rindergülle	Maissilage	Winterweizen	Gras (Dauergrünland) 4-5 Schnitte			
Konditionierungsform	Gülle	Ganzpflanzensilage (GPS)	Ganzpflanzensilage (GPS)	Silage	Silage		
Schüttdichte [kg FM/m ³]	1.000	660	700	600	600		
TS-Gehalt bei der Ernte bzw. frisch [%FM]	7,5	33,0	34,0	35,0	36,0		
oTS-Gehalt [%TS]	75,0	96,0	95,0	94,0	93,0		
TS-Gehalt frei Anlage [%FM]	7,5	33,0	34,0	35,0	36,0		
Aschegehalt [%TS]	10,0	4,3	4,1	10,0	7,0		
Heizwert H _i [kWh/kg TS]	3,51	4,66	4,77	4,63	4,79		
Elementaranalyse	Substrat [%TS]	C	36,90	47,10	45,10	44,20	45,51
		H	4,40	5,16	6,40	5,60	5,82
		S	0,56	0,14	0,12	0,14	0,23
		N	4,65	1,25	1,40	1,95	2,31
		O	43,49	42,00	42,90	38,10	39,13
	Asche [%TS]	Ca	k.A.	0,20	0,21	0,56	0,35
		K	5,51	1,38	0,98	2,25	1,54
		Mg	0,50	0,14	0,12	0,23	0,12
		P	0,87	0,26	0,25	0,39	0,20

Quelle: Eigene Zusammenstellung nach Eltrop et al. (2013), Härdtlein et al. (2004) und PHYLLIS2 (2014)

Wie aus Tabelle 2.1 ersichtlich, weisen die Biogas-Substrate, insbesondere bezüglich des TS- und Aschegehalts, deutliche Unterschiede auf. Auch wenn bei einem direkten Vergleich der beiden Gras-Substrate auf den ersten Blick zum Teil nur marginale Unterschiede bestehen, bewirken diese jedoch einen sehr deutlichen Unterschied hinsichtlich der realisierbaren Methanerträge (vgl. Tabelle 4.2, S. 35).

2.5 Bereitstellung von Landschaftspflegegras

Ein wesentlicher Teil der Biogas-Gestehungskosten wird durch die Bereitstellung der Substrate an der Biogasanlage bestimmt. Da in den Biogasanlagen ein Substrat-Mix zum Einsatz kommt, werden dementsprechend die mit der Bereitstellung verbundenen Gesamtkosten summarisch durch die Kosten für Anbau, Ernte, Transport und Lagerung der jeweiligen Substrate gebildet. Interessant ist hierbei vor allem der Blick auf das Landschaftspflegegras, da dieses im Rahmen von landschaftspflegerischen Maßnahmen anfallende Substrat scheinbar kostengünstig zur Verfügung stehen könnte.

Vor diesem Hintergrund widmet sich dieses Kapitel in erster Linie der Darstellung der Untersuchungsergebnisse zum Bereitstellungsprozess von Landschaftspflegegras von Streuobstwiesen, im Vergleich zu den bereits genannten gängigen Basissubstraten. Dabei richtet sich die Betrachtung ausschließlich auf die mit der Bereitstellung verbundenen Kosten. Hierbei wurden hinsichtlich der Bereitstellung von Landschaftspflegegras von Streuobstwiesen die beiden nachfolgend aufgeführten Varianten (s. Abbildung 2.4) untersucht:

- Variante 1: das am Aufkommensort geschwadete Landschaftspflegegras wird mittels eines Ladewagens (inkl. Zerkleinerung über Schnittmesser) erfasst und zur Biogasanlage transportiert und in das dort vorhandene Fahrсило eingebracht.
- Variante 2: das am Aufkommensort geschwadete Landschaftspflegegras wird mittels Rundballenpresse zu Silage-Wickelballen aufbereitet, zwischengelagert und zur Biogasanlage transportiert.

Die Möglichkeit, das Gras in Form von Wickelballen bereitzustellen, stellt im Vergleich zur „klassischen“ Bereitstellung mit dem Ladewagen aufgrund einiger Vorteile (z.B. einfaches Handling, dezentrale Lagerung und bedarfsgerechte Nutzung) eine interessante Alternative dar.

Bevor auf die Bereitstellungskosten der hier betrachteten Biogas-Substrate näher eingegangen wird, werden im folgenden Kapitel die der techno-ökonomischen Analyse zu Grunde liegenden Annahmen dargelegt und die einzelnen Arbeitsprozesse ausführlicher beschrieben.

Wie bereits erwähnt, wurde für die vorliegende Untersuchung auch Rindergülle als Basissubstrat ausgewählt. Da jedoch davon ausgegangen wurde, dass die Rindergülle direkt am Hof (bei der Biogasanlage) anfällt, d.h. nicht transportiert werden muss bzw. frei Hof angeliefert wird, wurde bei den nachfolgenden Ausführungen zur Bereitstellung die Rindergülle nicht mit berücksichtigt. Dies gilt jedoch keinesfalls für die in Kapitel 4 (S. 33 ff) durchgeführten techno-ökonomischen Untersuchungen zur Biogaserzeugung.

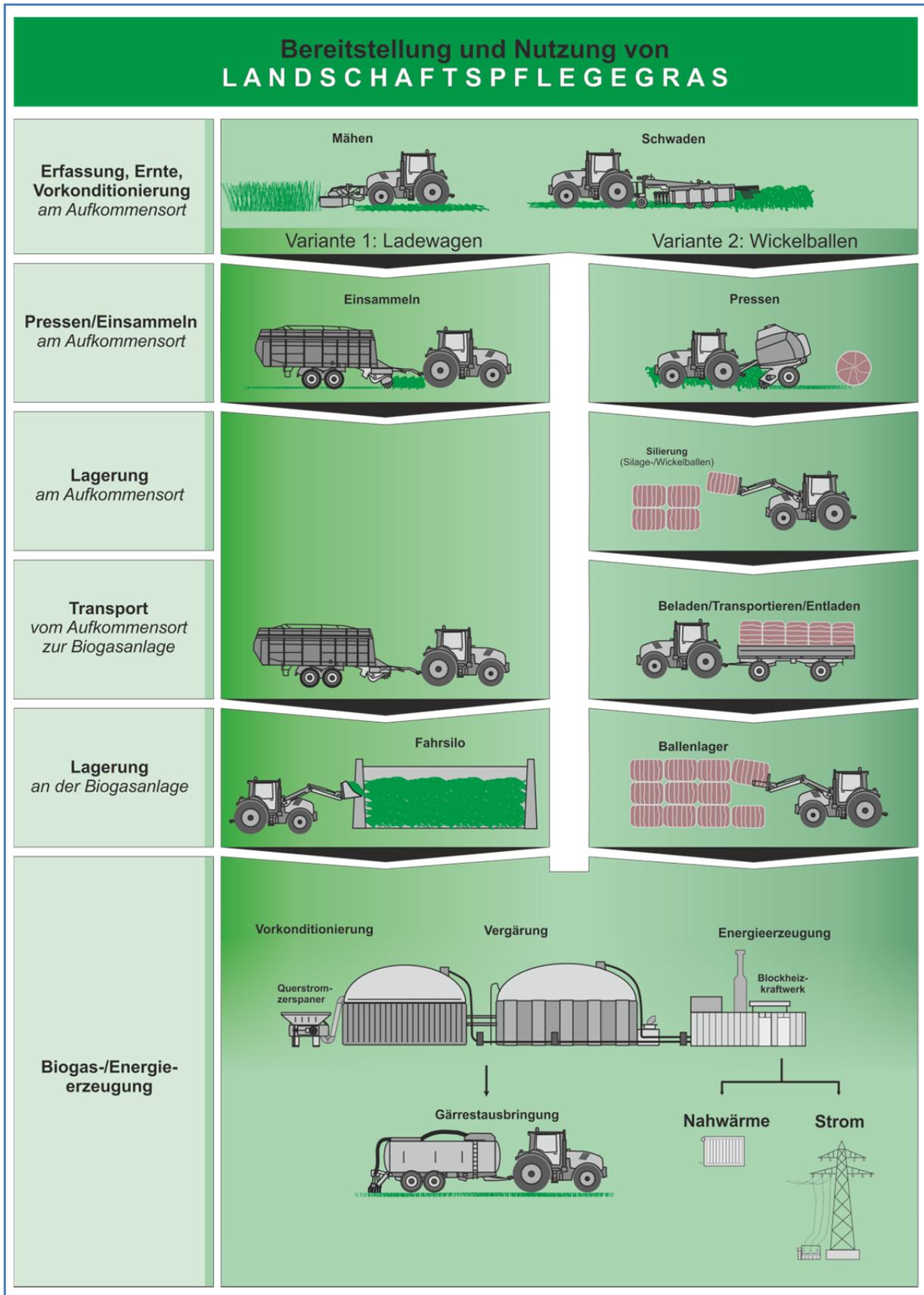


Abbildung 2.4: Verfahrensschema zu Bereitstellung und Nutzung von Landschaftspflegegras in Biogasanlagen

2.5.1 Grundannahmen und Beschreibung der Bereitstellungspfade/-kosten

Die Bereitstellung der hier betrachteten Basis-Substrate (Maissilage, Winterweizen-GPS, Grassilage von Dauergrünland) lehnt sich im Wesentlichen an die Produktionsverfahren nach KTBL (2006) an, bezüglich des Landschaftspflegegrases insbesondere an KTBL (2014a). Es ist generell anzumerken, dass es sich hier, außer im Falle des Landschaftspflegegrases, um Referenzbereitstellungspfade handelt, denen teilweise ein optimaler Maschinen-/Personaleinsatz zu Grunde gelegt ist.

Die wesentlichen Grundannahmen zur Beschreibung der Bereitstellungspfade frei Anlage stellen sich wie folgt dar:

- Dem Anbau auf dem Acker (s. Mais, Winterweizen) bzw. Dauergrünland wird eine Schlaggröße von 5 Hektar zu Grunde gelegt. Beim Landschaftspflegegras hingegen wird von einem Schlag von 1 Hektar ausgegangen.
- Die Entfernung zwischen Feld und Biogasanlage beträgt für die Basissubstrate 2 km (150 kW_{el}-Biogasanlage) bzw. 5 km (500 kW_{el}-Biogasanlage). Bei Bereitstellung von Landschaftspflegegras (Ladewagen oder Wickelballen) wurde unterstellt, dass die Entfernung Feld-Biogasanlage 5 km (bei der 150 kW_{el}-Biogasanlage) bzw. 10 km (bei der 500 kW_{el}-Biogasanlage) beträgt. Die hier angenommenen Transportentfernungen wurden teilweise in Anlehnung an die Auswertung der Befragung von Biogasanlagenbetreibern in Baden-Württemberg festgelegt (Stenull et al., 2009).
- Bei Dauergrünland wird von 4-5 Schnitten, bei Landschaftspflegegras von 2 Schnitten pro Jahr ausgegangen.
- Für alle Substrate wurde die Düngung nach Entzug kalkuliert. Der Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumgehalt der Basissubstrate und damit der Düngungsbedarf sind Tabelle 2.1 (S. 14) zu entnehmen. Es wurde hierbei davon ausgegangen, dass die Gärreste aus der Biogasanlage auf die Felder bzw. den Aufkommensort zurückgeführt und bei Bedarf durch Mineraldünger ergänzt werden.
- Bei Silomais, Winterweizen und Dauergrünland wurden die durchschnittlichen Hektarerträge (frei Feld) nach KTBL (2006) angesetzt (vgl. Tabelle 2.2). Die Angaben zum Landschaftspflegegras von Streuobstwiesen basieren auf eigenen Annahmen. Der Trockensubstanzgehalt und die Lagerungsverluste der jeweiligen Substrate bei der Ernte und „frei Anlage“, d.h. nach der Silierung (Silomais, Winterweizen-Ganzpflanzen und Gras), sind der Tabelle 2.2 zu entnehmen.
- Die Lagerung (Fahrsilo) der Biogas-Substrate befindet sich direkt an der Anlage. Dies gilt nicht für die Wickelballen – diese werden während der Zeit der Silierung am Ort des Aufkommens gelagert.

Tabelle 2.2: Erträge und Lagerungsverluste der Biogas-Substrate

Parameter	BASISSUBSTRATE			Gras (Landschaftspflege) 2 Schnitte
	Silomais	Winterweizen	Gras (Dauergrünland) 4-5 Schnitte	
Konditionierungsform	Ganzpflanzen-silage (GPS)	Ganzpflanzen-silage (GPS)	Silage	Silage
Ertrag frei Feld [t FM/(ha *a)]	50,0	40,0	28,6	13,9
TS-Gehalt [% FM]	33,0	34,0	35,0	36,0
Ertrag frei Feld [t TM/(ha*a)]	16,5	13,6	10,0	5,0
Lagerungsverluste [% FM]	12,0	12,0	12,0	12,0
Ertrag frei Biogasanlage [t FM/(ha*a)]	44,0	35,2	25,2	12,2
Ertrag frei Biogasanlage [t TM/(ha*a)]	14,5	12,0	8,8	4,4

Quellen: Eigene Zusammenstellung, aufbauend auf Eltrop et al. (2013).

Die Bereitstellungspfade aller hier betrachteten Biogas-Substrate frei Anlage können grundsätzlich in drei Teil-Prozesse untergliedert werden:

- (1) Anbau und Ernte: Dies beinhaltet alle Arbeitsprozesse auf dem Feld, einschließlich Ernte bzw. Erfassung der Substrate.
- (2) Transport: Dieser beinhaltet alle Transportvorgänge einschließlich Be-/Um-/Entladen, sowie falls erforderlich die Einlagerung der transportierten Biogas-Substrate.
- (3) Lagerung und Einbringung: Dies beinhaltet alle Vorgänge, die der Lagerung zuzurechnen sind, sowie die Einbringung der Substrate in die Biogasanlage.

In den nachfolgenden, nach diesen Teilprozessen geordneten Tabelle 2.3 bis Tabelle 2.5 sind die Annahmen bzw. die Arbeitsprozesse zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 2.3: Beschreibung der Anbau- und Ernteprozesse für Biogas-Substrate

(1) ANBAU UND ERNTE		
Biogas-Substrat	Beschreibung der Prozesse	Charakteristik und Datengrundlage
Mais-Silage Winterweizen (GPS)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Düngen (Gärrest + Mineraldünger) ▪ Eggen ▪ Säen ▪ Herbizidausbringung ▪ Unkraut und Bestandesbonitur ▪ Häckseln ▪ Kalk streuen ▪ Stoppelgrubbern 	Ressourcenverbrauch: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Düngemittel* ▪ Herbizide* ▪ Saatgut* ▪ Maschinen: Traktor, landwirtschaftliches Gerät allgemein, landwirtschaftliches Gerät für Bodenbearbeitung, Erntemaschine (Arbeitszeiten der Maschinen in den Anbauprozessen nach <i>KTBL (2006)</i>) Gras aus der Landschaftspflege nach <i>KTBL (2014a)</i>
Gras-Silage (Dauergrünland)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Düngen (KAS, Kali, Phosphat) ▪ Walzen ▪ Striegeln ▪ Ernte (4 bis 5 Schnitte) jeweils: Mähen, Wenden, Schwaden, Bergen 	
Gras-Silage (Landschaftspflege)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Düngen (Gärrest) ▪ Ernte (2 Schnitte) jeweils: Mähen, Wenden, Schwaden, <u>Bergen</u>: <ul style="list-style-type: none"> ▪ mit Ladewagen, <u>oder</u> ▪ Pressen von Wickelballen mit Rundballenpresse 	

Tabelle 2.4: Transportentfernungen und -charakteristik für Biogas-Substrate in Abhängigkeit von der Anlagengröße

(2) TRANSPORT			
Biogas-Substrat	Biogasanlagen (Leistung in kW _{el})	Transportentfernung zur Anlage	Charakteristik
Mais-Silage Winterweizen (GPS) Gras-Silage (Dauergrünland)	150 kW _{el}	2 km	Transport berücksichtigt sowohl Leer- als auch Vollfahrten zum Lagerungsort. Transportmittel: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Traktor + 2 Anhänger bzw. 1 Ladewagen ▪ Traktor 67 bzw. 83 kW ▪ Max. Nutzlast pro Anhänger: 10 t ▪ Max Beladung mit Silomais bzw. Gras: 10 t
	500 kW _{el}	5 km	
Gras-Silage (Landschaftspflege)	150 kW _{el}	5 km	
	500 kW _{el}	10 km	

Tabelle 2.5: Lagerung und Einbringung der Biogas-Substrate

(3) LAGERUNG UND EINBRINGUNG		
Biogas-Substrat	Lagerungsart	Charakteristik
Mais-Silage Winterweizen (GPS) Gras-Silage (Dauergrünland) Gras-Silage (Landschaftspflege)	Traunsteiner Silo Entnahme vom Flachsilo in die Biogasanlage	Fassungsvermögen 875 m ³ Siloplatte 35 x 10 m mit Traunsteinerwand (2,5 m) Einlagerung und Entnahme mit Radlader
Gras-Silage (Landschaftspflege)	(Kostenneutrales) Freilagern von Wickelballen am Aufkommensort	

Für die Berechnung der Kosten der einzelnen Bereitstellungspfade wurde nach betriebswirtschaftlicher Praxis von einer Unterteilung in fixe und variable Kosten ausgegangen, wobei die Personalkosten ersteren zugerechnet wurden. Eine genauere Beschreibung der hier angesetzten fixen und variablen Kosten ist der Tabelle 2.6 zu entnehmen. Die fixen Maschinenkosten sowie die variablen Kosten für Anbau, Ernte und Transport lehnen sich überwiegend an KTBL (2009) bzw. KTBL (2014a) an, wobei ein Zinssatz von 6 % angenommen wurde. Die Annahmen für die Lagerungskosten und Personalkosten basieren auf KTBL (2006).

Tabelle 2.6: Fixe und variable Kostenkomponenten der Biogassubstrat-Bereitstellung

	1. ANBAU UND ERNTE	2. TRANSPORT	3. LAGERUNG
Fixe Kosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maschinenkosten (Abschreibung, Versicherung, Zinskosten, Reparatur und Wartung, technische Überwachung, Unterbringungskosten) ▪ Hagelversicherung ▪ Pachtkosten ▪ Personalkosten <p><i>Anmerkung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bei Landschaftspflegegras ohne Kosten für Hagelversicherung und Pacht. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maschinenkosten (Abschreibung, Versicherung, Zinskosten, Reparatur und Wartung, technische Überwachung, Unterbringungskosten) ▪ Personalkosten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lagerkosten (Abschreibung, Unterhalt und Versicherung von Gebäude) ▪ Maschinenkosten (Abschreibung, Versicherung, Zinskosten, Reparatur und Wartung, technische Überwachung, Unterbringungskosten) ▪ Personalkosten
Variable Kosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kosten für Saatgut, ▪ Kosten für Kalk, ▪ Mineraldüngerkosten (KAS, P₂O₅, K₂O) ▪ Pflanzenschutzmittel, ▪ Variable Maschinenkosten (Diesel, Schmieröl) <p><i>Anmerkung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bei Landschaftspflegegras ohne Kosten für Saatgut, Kalk, Mineraldünger und Pflanzenschutzmitteln 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Variable Maschinenkosten (Diesel, Schmieröl) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Variable Kosten: Folie für Traunsteinersilo ▪ Variable Maschinenkosten (Diesel, Schmieröl)

2.5.2 Bereitstellungskosten unterschiedlicher Biogas-Substrate im Vergleich

Die Kosten für die Bereitstellung von Biogas-Substraten hängen nicht nur von der Art des Substrates und dem eingesetzten Transportmittel ab, sondern insbesondere auch von der Leistung der Biogasanlage. Schließlich steigt mit zunehmender Anlagenleistung auch der Aufwand für die Beschaffung des Substrates, d.h. die durchschnittlichen Transportentfernungen steigen entsprechend mit an. Wie Tabelle 2.7 zeigt, wurden bei Berechnung der Bereitstellungskosten zum Landschaftspflegegras diese Entfernungen höher angesetzt als bei der vergleichbaren Gras-Silage-Bereitstellung. Dies begründet sich damit, dass die Flächen auf denen das Landschaftspflegegras anfällt im Allgemeinen sehr inhomogen bzw. weiträumig verteilt sind.

Tabelle 2.7: Bereitstellungskosten für Biogas-Substrate

Parameter	Biogas-Modellanlage	
	150 kW _{el}	500 kW _{el}
Transportentfernung (Aufkommensort - Biogasanlage)	2 km	5 km
Mais-Silage	139,7	144,7
Winterweizen-GPS	153,0	157,7
Gras-Silage	149,1	153,7
Transportentfernung (Aufkommensort - Biogasanlage)	5 km	10 km
Landschaftspflegegras-Silage	156,2	188,6

Anmerkung: Bei der Bereitstellung von Landschaftspflegegras müssen größere Entfernungen zurückgelegt werden, da die hierfür nutzbaren Flächen einen geringeren Anteil besitzen und stärker über die Gesamtfläche verteilt sind.

Beim direkten Vergleich der Bereitstellungskosten frei Biogasanlage (500 kW_{el}) zeigt sich, dass die Mais-Silage mit rund 145 €/t TM am günstigsten bereitgestellt werden kann (s. Tabelle 2.7). Die drei anderen Substrate hingegen liegen deutlich darüber, in einem Bereich von rund 154 bis 158 €/t TM, wobei die Bereitstellung von Winterweizen-GPS am teuersten ist. Der Blick auf die einzelnen Kostenbestandteile (s. Abbildung 2.5) zeigt, dass für Silomais, Winterweizen-GPS und Grasschnitt (Dauergrünland) die Bereitstellungskosten insbesondere durch die variablen Kosten (für Saatgut bzw. zusätzliche Düngung) dominiert werden.

Da das Landschaftspflegegras nicht eigens zum Zwecke der Biogaserzeugung angebaut wird, sondern vielmehr als Nebenprodukt bzw. Reststoff bei landschaftspflegerischen Maßnahmen anfällt, wurden im Falle des Landschaftspflegegrases keine Kosten für Saatgut und zusätzliche Düngung mit einberechnet. Im direkten Vergleich führt dies dann zu den insgesamt niedrigsten variablen Kosten, welche hierbei lediglich auf die variable Maschinenkosten (v.a. Kraftstoff) zurückzuführen sind. Aus dem genannten Grund wurden ebenfalls auch keine Kosten für Pacht mit einberechnet. Die Kosten für die Bereitstellung von Landschaftspflegegras liegen rd. 31 bis 44 €/t TM über denen anderer Substrate (s. Abbildung 2.5).

Auffällig ist im Falle des Landschaftspflegegrases der hohe Anteil an Personalkosten und fixen Kosten für Anbau und Ernte. Dies ist in erster Linie auf den mit der Bereitstellung von Landschaftspflegegras verbundenen hohen Arbeitszeitbedarf zurückzuführen. Dadurch bedingt steigen neben den Personalkosten auch die mit dem Einsatz von Maschinen verbundenen Kosten.

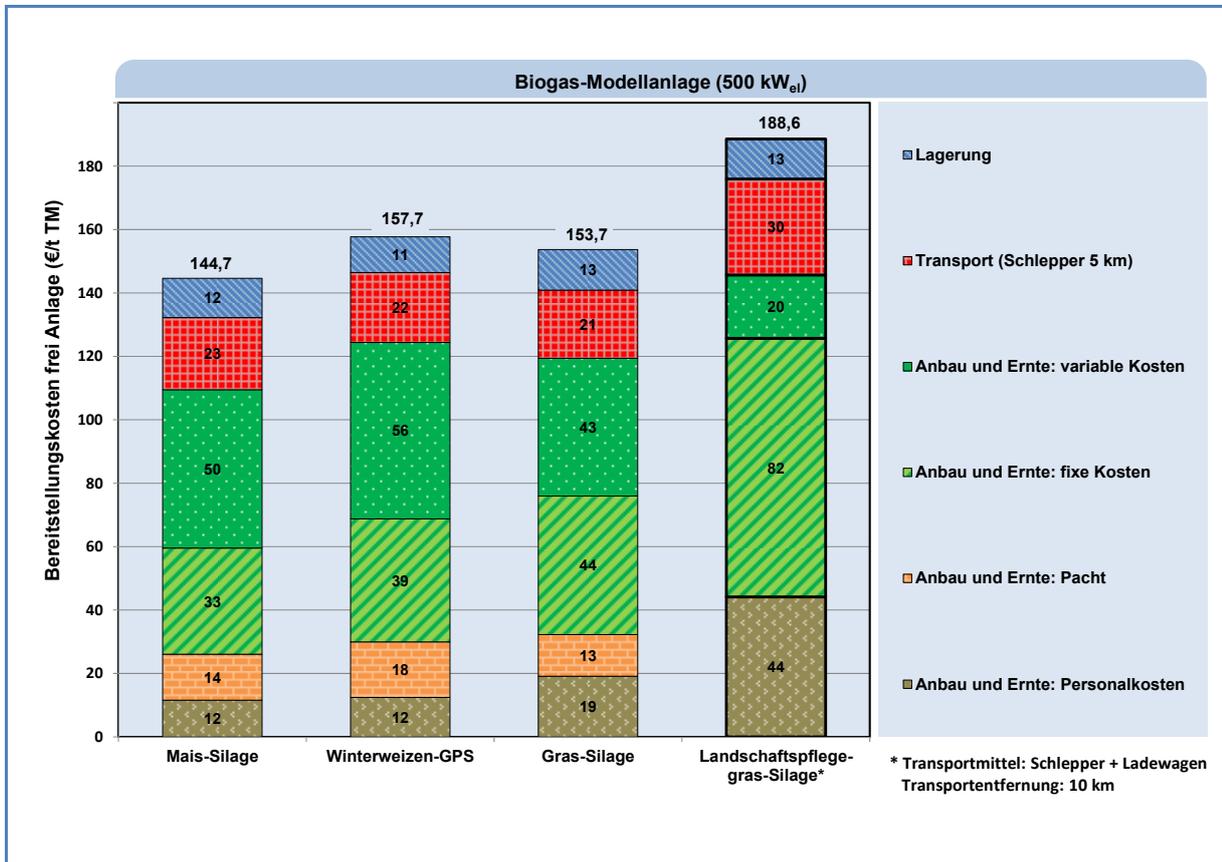


Abbildung 2.5: Bereitstellungskosten der Substrate (mit Gärrestnutzung) frei Biogasanlage

2.5.3 Bereitstellungskosten von Landschaftspflegegras unterschiedlicher Bereitstellungsvarianten

Während im vorherigen Kapitel die Bereitstellungskosten der hier betrachteten unterschiedlichen Biogas-Substrate in einen Vergleich gesetzt wurden, richtet sich der Focus in diesem Kapitel ausschließlich auf die Bereitstellung von Landschaftspflegegras-Silage. Dabei wurden diese wiederum in Abhängigkeit der beiden in der Untersuchung gewählten Biogas-Modellanlagen (150 bzw. 500 kW_{el}) betrachtet. Wie bereits erwähnt, wurde hierbei zusätzlich zwischen den beiden Bereitstellungsvarianten Ladewagen und Wickelballen unterschieden.

Wie aus Tabelle 2.8 ersichtlich, bestehen in Abhängigkeit der hier betrachteten Annahmen deutliche Unterschiede in den Bereitstellungskosten. Erwartungsgemäß steigen die Kosten mit zunehmender Entfernung von Aufkommensort und Biogasanlagen. In den hier betrachteten Fällen führt die 5 km weitere Strecke zu rund 20 % höheren Gesamtkosten. Je nach Anzahl der Schnitte muss diese Strecke mehrfach zurückgelegt werden.

Wie schon bei den Erläuterungen zu Abbildung 2.5 ausgeführt, wird auch aus Tabelle 2.8 ersichtlich, dass die fixen Kosten in Kombination mit den Personalkosten den dominierenden Kostentreiber darstellen. Dies ist, wie bereits erwähnt, auf den mit der Erfassung verbundenen hohen Arbeitszeitbedarf und dessen unmittelbare Auswirkung auf die Maschinen- und Personalkosten zurückzuführen.

Tabelle 2.8: *Bereitstellungskosten für Landschaftspflegegras in Abhängigkeit der Biogas-Modellanlagen und Erfassungsvarianten*

Parameter		Biogas-Modellanlage			
		150 kW _{el}		500 kW _{el}	
Transportentfernung (Aufkommensort – Biogasanlage)		5 km		10 km	
Art der Erfassung bzw. des Transports		<i>Variante 1: Ladewagen</i>	<i>Variante 2: Wickelballen</i>	<i>Variante 1: Ladewagen</i>	<i>Variante 2: Wickelballen</i>
Erfassung/ Ernte	<i>Personalkosten</i>	34,9	30,9	44,2	36,9
	<i>Fixe Kosten</i>	66,2	65,0	81,5	76,4
	<i>Variable Kosten</i>	15,6	14,5	20,0	17,4
Transportkosten		27,1	18,2	30,3	20,0
Lagerungskosten		12,7	-	12,6	-
Bereitstellungskosten		156,5	128,6	188,6	150,7

Anmerkung: Die für die Erfassung angegebenen Kostenabschätzungen basieren auf Daten von KTBL (2014a). Die dort getroffenen Annahmen gehen von günstigen Gegebenheiten beim Maschinen- bzw. Personaleinsatz aus.

Richtet sich die Betrachtung ausschließlich auf die Erfassungskosten, so zeigen sich für beide Bereitstellungs-Varianten (Wickelballen bzw. Ladewagen) nur geringe Unterschiede in den einzelnen Kostenbestandteilen. Das heißt, es ist hinsichtlich der Systemkosten nicht sonderlich von Belang, ob die Erfassung des Grases vor Ort mit einem Ladewagen oder mit der Rundballenpresse erfolgt.

Deutliche Unterschiede ergeben sich allerdings bezüglich der Transportkosten. So liegen die Kosten für den Transport des Grases zur Biogasanlage (Fahrsilo) mit dem Ladewagen deutlich über denen des Transports von Wickelballen mit zwei landwirtschaftlichen Anhängern. Grundsätzlich ist dies bedingt durch den Umstand, dass die Maschinenkosten für den Ladewagen über denen der Anhänger liegen. Dies ist insbesondere aber auch darauf zurückzuführen, dass der Transportvorgang (Hin- und Rückfahrt) in Abhängigkeit der Anzahl der Schnitte mehrfach durchgeführt wird und durch das geringe Landschaftspflegegras-Aufkommen vor Ort gleichzeitig die Ladekapazität des Ladewagens nur unvollständig ausgenutzt wird. Der für diese Mehrfachfahrten benötigte Zeitbedarf bzw. Mehraufwand liegt deutlich über dem, der für das aufwändige Be- und Entladen der einzelnen Wickelballen

benötigt wird. Letztlich liegen die Kosten für die Bereitstellung von Landschaftspflegegras mittels Ladewagen deutlich über der Ballenvariante, da bei letzterer zudem auch keine Lagerungskosten anfallen.

Sowohl bei Einsatz eines Ladewagens als auch der Ballenpresse besteht die Möglichkeit, durch die an der Walze vorhandenen Schnittmesser, das Landschaftspflegegras bereits bei der Erfassung vorzuzerkleinern. Inwieweit diese Vorzerkleinerung den Einsatz eines Querstromzerspanners (vgl. Kapitel 3, S. 25ff) erübrigt bzw. begünstigt, ist fraglich. Auf diesen Zusammenhang soll in dieser Untersuchung nicht näher eingegangen werden.

Die in der Tabelle 2.8 aufgelisteten Kosten beinhalten auch die Kosten für das Mähen; diese belaufen sich für alle Varianten auf rund 18 €/t TM. Da jedoch, wie bereits erwähnt, das Landschaftspflegegras aus Streuobstwiesen nicht eigens zum Zwecke der Biogaserzeugung angebaut wird, und diese landschaftspflegerische Maßnahme in jedem Falle auszuführen ist, könnten die Bereitstellungskosten theoretisch noch um diesen Betrag reduziert werden. In der Praxis dürften die Kosten für das Mähen zudem noch über den hier genannten liegen, da den für die vorliegende Kostenabschätzung verwendeten KTBL-Daten stark rationalisierte Arbeitsprozesse zugrunde liegen.

2.5.4 Schlussfolgerungen

Der Prozess der Bereitstellung von Landschaftspflegegras-Silage unterscheidet sich nicht wesentlich von der klassischen Grassilagebereitung vom Dauergrünland. Insofern ist der den techno-ökonomischen Analysen zugrunde gelegte Prozess bzw. die bei der Bereitstellung eingesetzte Technologie mehr oder weniger Stand der Technik. Wie die Analysen zeigen, ist die Bereitstellung über Silageballen eine ökonomisch interessante Alternative zur klassischen Bereitstellung des Grasschnitts mit dem Ladewagen und dessen anschließender Silierung im Fahrсило. Hierbei führen insbesondere das verbesserte Handling, die Möglichkeit der Silierung und Zwischenlagerung im Feld, sowie ein optimierter Transportprozess zu einem insgesamt geringeren Zeitbedarf und Kostenaufwand.

Da das Landschaftspflegegras nicht eigens zum Zwecke der Biogaserzeugung angebaut wird, sondern vielmehr als Nebenprodukt bzw. Reststoff bei landschaftspflegerischen Maßnahmen anfällt, kommen hierbei bestimmte Kostenbestandteile (z.B. Pacht) nicht zum Tragen. Wie sich zeigte, liegen trotz dieser Gründe die Kosten für die Bereitstellung von Landschaftspflegegras nicht unwesentlich über denen von anderen Biogas-Substraten. Allerdings ergeben sich in der Praxis vor Ort oft besondere Umstände, die einen effektiven Maschineneinsatz behindern. So muss beispielsweise bei der Bewirtschaftung einer Streuobstwiese von einem vergleichsweise hohen Arbeitszeitbedarf für alle mit der Bewirtschaftung zusammenhängenden Arbeitsprozesse (z.B. Mähen) ausgegangen werden. Auch in Hinblick auf den ortsspezifisch sicherlich stark schwankenden Grasertrag pro Hektar ist es deshalb schwer abzuschätzen, wie sich die tatsächliche Kostenstruktur in der Praxis vor Ort konkret gestalten wird. Um eine belastbare Grundlage für Kostenkalkulationen zu erhalten, müssten bei Bewirtschaftungsmaßnahmen Praxisdaten erfasst und dokumentiert werden.

3.1 Ziele und Verfahren

Wie bereits in Kapitel 2.4 (S. 11) ausführlich dargelegt, zeichnet sich Landschaftspflegegras durch einen relativ hohen Lignozellulose-Gehalt und eine faserreiche Struktur aus und kann so aufgrund der geringen spezifischen Substratoberfläche ohne Vorbehandlung nicht optimal im Biogasprozess genutzt werden. Diese Eigenschaften bedingen, dass Biogas nur langsam und in geringeren Mengen gebildet wird. Zusätzlich führen solch faserreiche Substrate häufig zu Schwimmschichten im Biogasreaktor und Verstopfungen, wodurch der Durchmischungsaufwand deutlich erhöht wird. Deshalb ist eine Aufbereitung von lignozellulose- bzw. faserreichen Substraten anzustreben, um dieses Material für die im Biogasprozess beteiligten Mikroorganismen besser zugänglich zu machen und verfahrenstechnische Schwierigkeiten zu verringern (Oechsner und Lemmer, 2009; Kaltschmitt et al., 2009). Die Substratvorbehandlung soll vorhandene Schutzschichten und mikrobiell nicht angreifbare Verbindungen (Lignozellulosekomplexe) zerstören bzw. auftrennen, sowie die Substratoberfläche vergrößern (Schumacher et al., 2007; Kaltschmitt et al., 2009; Schwarz et al., 2009).

Abbildung 3.1 gibt einen Überblick zu den prinzipiellen Möglichkeiten der Vorbehandlung von Substraten. Grundsätzlich wird hierbei unterschieden in physikalische, chemische und biologische Verfahren. Die physikalischen Aufbereitungsverfahren können in mechanische und thermische Verfahren untergliedert werden. Bei den mechanischen Vorbehandlungen stehen die Zerkleinerung des Substrats sowie die Vergrößerung dessen spezifischer Oberfläche im Vordergrund. Hierfür kommen z.B. Dissolver (sehr schnell rotierende Messerscheibe), Extruder (Schneckenförderer), Prallreaktoren (wie der Querstromzersetzer) und Mühlen in Frage (Schumacher et al., 2014).

Zu den thermischen Verfahren zählt beispielsweise die „Steam Explosion“. Bei diesem Verfahren wird die Biomasse unter Druck mit gesättigtem Wasserdampf beaufschlagt. Durch schlagartige Druckentspannung wird die Lignozellulosestruktur aufgeschlossen, die Hemicellulose hydrolysiert und eine Depolymerisation der Ligninbestandteile erreicht. Dies führt dazu, dass der ursprünglich nahezu unabbaubare Lignozellulosekomplex nun von Mikroorganismen angegriffen und zersetzt werden kann (Lindorfer et al., 2010). Bei Untersuchungen von Schumacher (2008) konnte durch Steam-Explosion von Triticale-Ganzpflanzen und Triticalestroh eine Erhöhung des Methanertrages im Biogasversuch um 18-34 % gezeigt werden, die den Energieaufwand für die Aufbereitung übertraf.

Nach Schwarz et al. (2009) besitzen die chemischen Verfahren beim Substrataufschluss das größte Potenzial, da sie theoretisch nahezu die gesamte chemische Energie unterschiedlichster Substrate freisetzen können. Jedoch benötigen sie, im Vergleich zu den biologischen und physikalischen Verfahren, den höchsten technischen und energetischen Aufwand. Die chemische Aufbereitung kann mit Säuren, Laugen oder Oxidationsmitteln, wie Ozon oder Wasserstoffperoxid, erfolgen. Hierbei kommt es zum Abbau von Lignin, zur Herabsetzung des Polymerisationsgrades und der Kristallinität von Zellulose, sowie zur Aufquellung und Erhöhung der Porosität der Substrate (Lindorfer et al., 2010).

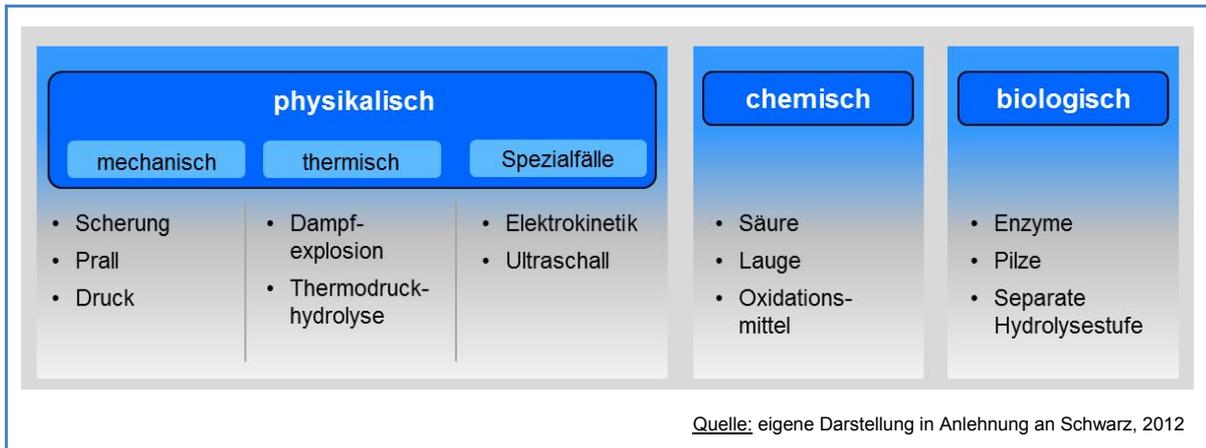


Abbildung 3.1: Überblick zu den prinzipiellen Möglichkeiten einer Substratvorbehandlung

Biologische Aufbereitungsverfahren nutzen die natürliche Aufschlussleistung von Mikroorganismen und Enzymen. Enzyme verbinden sich hierbei als Biokatalysatoren reversibel mit dem eingesetzten Substrat und führen so beim darauf folgenden Aufschluss zu einem geringeren energetischen Aufwand. Beispielsweise können Pilze eingesetzt werden, um Lignin abzubauen und somit die Zellulose für den Abbau besser zugänglich zu machen. Des Weiteren kann der Einsatz von Enzymen zu einer Zuckerfreisetzung führen, wobei dieser Effekt bei schwer abbaubaren Substraten abnimmt und zu dessen Wirksamkeit bisher nur konträre Angaben vorliegen (Wartell et al., 2012). Untersuchungen von Brulé et al. (2008 und 2014) zeigten jedoch keinen signifikanten Einfluss der Enzymzugabe auf den Methanertrag im kontinuierlichen Laborversuch bei praxisüblichen Enzymdosierungen.

Aufgrund des geringen apparativen und energetischen Aufwands scheint auch der Einsatz von Enzymen zum Aufschluss von Landschaftspflegegras vielversprechend (Schwarz et al., 2009). Die Wirksamkeit geeigneter Enzympräparate für diesen Anwendungsfall muss jedoch noch untersucht und nachgewiesen werden.

Zur Behandlung von langfaserigen biogenen Substraten, wie Landschaftspflegegras, stellen derzeit die mechanischen Aufbereitungsverfahren den Stand der Technik dar. Hierunter fallen beispielsweise die Substratvorbehandlung mit einem Extruder oder einem Querstromzersetzer. An der Universität Hohenheim bestehen langjährige Erfahrungen mit der Querstromzersetzung, wobei hier insbesondere Weizenstroh und Pferdemist als Substrate eingesetzt wurden (Oechsner und Mönch-Tegeder, 2012; Mönch-Tegeder et al., 2013ab; Mönch-Tegeder et al., 2014). Die Anschaffung, Einbindung und insbesondere der Betrieb solcher Anlagenkomponenten ist mit zusätzlichen Investitionen und Betriebskosten verbunden, welche die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage wesentlich beeinflussen können.

3.2 Querstromzerspannung von Landschaftspflegegras

3.2.1 Techno-ökonomische Beschreibung

Im Rahmen dieses Projekts wurde das in den Versuchsreihen eingesetzte Landschaftspflegematerial mit dem an der Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“ vorhandenen Querstromzerspanner (Bio-QZ) mechanisch aufbereitet. Dieser Querstromzerspanner war im Recycling-Bereich zum Materialaufschluss von Verbundwerkstoffen (u.a. Elektroschrott) von der Fa. MeWa entwickelt worden. Dieser Querstromzerspanner (Modell Bio-QZ 900) verfügt über eine Nennleistung von 55 kW_{el}; im Betriebszustand rotieren die Ketten mit einer Drehzahl von 1.200 Umdrehungen pro Minute. Durch diese rotierenden Ketten wird das eingebrachte Material aufgewirbelt. Es prallt aufeinander und wird somit durch Zerreißen bzw. Zerfasern aufgeschlossen. Diese Aufbereitungstechnik ist sehr robust und einfach gehalten, so dass eine geringe Störanfälligkeit und somit geringe Kosten für Wartung und Instandhaltung zu erwarten sind. Nähere Angaben zur Funktionsweise des Querstromzerspanners und zu seiner Betriebsweise können Kapitel 5.2 (S. 60) entnommen werden (Mönch-Tegeder, 2014).

Die wesentlichen Kenndaten und Annahmen zur techno-ökonomische Beschreibung der Querstromzerspannung von Landschaftspflegegras sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Diese Kenndaten bauen im Wesentlichen auf den durchgeführten verfahrenstechnischen Untersuchungen auf (s. Kapitel 5.2, S. 60). Zum Vergleich wurden Werte aus einer Literaturrecherche in die Tabelle mit aufgenommen, um die Belastbarkeit der eigenen Annahmen aufzuzeigen.

Generell sind in der Literatur nur wenige detaillierte techno-ökonomische Kenndaten zur Aufbereitung von Landschaftspflegegras mittels Querstromzerspannung oder anderer Aufbereitungsverfahren verfügbar. Daher basieren die in der Tabelle 3.1 aufgeführten technischen Kenndaten als auch alle weiteren, insbesondere die Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen betreffenden Annahmen, sowohl auf den am Unteren Lindenhof durchgeführten Versuchsreihen (vgl. Kapitel 5.2, S. 60) als auch auf aktuellen Erfahrungswerten aus den wenigen Literaturangaben (v.a. Brückner und Sawatzki, 2011; Schwarz, 2012). Bei den im Rahmen dieser Studie durchgeführten Analysen wurde angestrebt, dass diese sich an praxisnahen Biogas-Modellanlagen orientieren sollen.

Für die vorliegende techno-ökonomische Analyse wurde die Einbindung eines Querstromzerspanners in eine 500 kW_{el}-Biogasanlage unterstellt (vgl. Kapitel 4.2, S. 37), die mit einer Volllaststundenzahl von 8.000 h im Jahr betrieben wird. Weitere Details zu dieser Biogasanlage können Kapitel 4 entnommen werden, in dem eine solche Biogas-Modellanlage mit ihren Anlagenkomponenten beschrieben wird. Unterstellt man bei einer solchen Anlage einen Landschaftspflegegras-Anteil von 10 % (in % FM) an der insgesamt eingesetzten Substratmenge, dann werden rd. 1.060 t FM an Landschaftspflegegras im Jahr im Querstromzerspanner durchgesetzt und zerkleinert. Für kleinere Biogasanlagen, mit elektrischen Leistungen von deutlich unter 500 kW_{el}, sind höhere Aufbereitungskosten zu erwarten, da sich in diesem Fall die fixen Aufbereitungskosten (insbesondere die Kapital- und Wartungskosten) auf weniger durchgesetztes Material verteilen. Hieraus leitet sich die Notwendigkeit ab, für kleinere Biogasanlagen angepasste und kostengünstige Aufarbeitungskonzepte zu entwickeln.

Tabelle 3.1: Techno-ökonomische Kenndaten zur Aufbereitung von Landschaftspflegematerial im Querstromzerspanner

Parameter	Einheit	Quellen			
		Aus dem Projekt: Versuchsanlage „Unterer Lindenhof“ Mönch-Tegeeder (2014)	Aus der Literatur:		
			Brückner und Sawatzki (2011)	Schwarz (2012)	
Investitionen					
Anschaffung (ohne MwSt.)	[€]	104.800	k.A.	140.000	180.000
Einbindung in Biogasanlage (inkl. Steuerung)	[€]	5.200 ^{a)}			
Gesamtinvestition	[€]	110.000			
Elektr. Leistungsbereich der Biogasanlage	[kW _{el}]	150 bis 500	410	250	350
Spezifische Investitionen	[€/kW _{el}]	733 bis 220	260	560	514
Nutzungsdauer	[a]	8	7	10	
Betriebskosten					
Reparatur und Wartung					
Wartungskosten, jährlich	[€/a]	2.200 bis 3.300 ^{a)}	1.998	k.A.	
Strombedarf					
Eingesetztes Substrate		Landschaftspflegegras	Kosubstrat ^{b)}	Einsatzstoff ^{c)}	
Durchsatz an Substraten	[t FM/a]	nach Substratanteil ^{d)}	4.060	k.A.	
Strombedarf im Betrieb	[kWh _{el} /t FM]	12	15	k.A.	
Strompreis	[€/kWh _{el}]	0,10	0,16	k.A.	
Personalbedarf					
Stundensatz Personal	[€/h]	27,8		k.A.	
Zerkleinerungszeit	[s/Charge]	15	0 bis 8 ^{e)}	k.A.	
Betriebsstunden	[h/a]	nach Substratanteil ^{d)}			

k.A. = keine Angabe

^{a)} Jeweils eigene Annahmen; bei den Wartungskosten wird je nach Auslastung der Aufbereitungsanlage ein Wert im Bereich von 2 bis 3 % der Investitionen angenommen.

^{b)} Beim Co-Substrat handelt es sich um ein Gemisch aus Maissilage, Roggen-Ganzpflanzensilage, Grassilage und Getreide, welches mit Rindermist vermischt und aufgearbeitet wird.

^{c)} Schwarz (2012) betrachtet als Einsatzstoff zum einen Stroh, zum anderen ein Gemisch aus Grassilage, Landschaftspflegematerial und Festmist.

^{d)} Hierbei handelt es sich um den jeweils variablen Anteil von Landschaftspflegegras an der Gesamtsubstratmenge pro Jahr.

^{e)} Neben der Zerkleinerungszeit werden von Brückner und Sawatzki (2011) auch eine Einfüllzeit von 8 s und eine Nachlaufzeit von 4 s angenommen.

Wie bereits angeführt, wurde für die Aufbereitung des Landschaftspflegegrases der an der Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“ installierte Bio-QZ 900 verwendet. Die Investition für den Bio-QZ an der Biogasanlage betrug 104.800 € (ohne Steuer). Hinzu kommen Investitionen für die Einbindung in die Biogasanlage und in deren Steuerung, so dass insgesamt von einer Investition in Höhe von 110.000 € ausgegangen wird. Dies liegt im Vergleich zu den verfügbaren Literaturwerten im eher günstigeren Bereich. Bei den Wartungskosten wird eine Bandbreite von 2-3 % der Investition angenommen, je nach Auslastung des Querstromzerspanners.

Wie die Versuchsergebnisse zeigen (vgl. Kapitel 5.2, S. 60), liegt der Stromverbrauch der mechanischen Aufbereitung von Landschaftspflegegras deutlich oberhalb der vom Hersteller für den Normalbetrieb genannten Werte (11-13 kWh_{el}/t FM). Die Ursache für diese Abweichungen sind der hohe TS-Gehalt und das geringe Eigengewicht des Landschaftspflegegrases.

Aufgrund der hohen TS-Gehalte war die Aufbereitung von Landschaftspflegegras im QZ folglich problematisch und nicht so effizient wie erwartet, da diese Substrate zum Auffliegen im Prallreaktor neigten. Aufgrund der langfaserigen Struktur des Landschaftspflegematerials ist eine Zerkleinerung vor dem Eintrag in den Fermenter zwingend erforderlich, da es sonst zu massiven Schwimmschichten und Behinderung des Vergärungsverfahrens bis hin zur Blockierung der Substratüberläufe/-Pumpen kommen könnte. Da die Aufbereitung aufgrund der oben genannten Substrateigenschaften nicht optimal erfolgte, konnte im Labor keine Steigerung des spezifischen Methanertrages erzielt werden (Kapitel 5.2.2, S. 62).

Die Aufbereitung von solch trockenen und somit sehr leichten Substraten im Bio-QZ würde zuvor eine Vermischung mit feuchteren Substraten erfordern, insbesondere um die Durchsatzmenge zu erhöhen. Daher wurde für die weiteren Berechnungen der vom Hersteller genannte Strombedarf des Normalbetriebs in Höhe von 12 kWh_{el}/t FM unterstellt, bei den verfahrenstechnischen Untersuchungen (s. Kapitel 5.2.2, S. 62) wurden deutlich höhere Strombedarfe gemessen. Eine Option wäre es auch, das Landschaftspflegematerial im feuchteren Zustand zu ernten, um so eine effiziente Aufarbeitung im QZ zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass der Strombedarf für die Aufarbeitung anderer Substrate deutlich von der hier getroffenen Annahme abweichen kann, da der Strombedarf stark von den Eigenschaften des jeweils eingesetzten Substrats abhängt. Beispielsweise haben ebenfalls an der Universität Hohenheim durchgeführte Versuche gezeigt, dass der Strombedarf zur Zerkleinerung von Pferdemist zwischen 10 und 12 kWh_{el}/t FM liegt (Oechsner, 2014).

Wie im Kapitel 5.2 beschrieben, wurde der Bio-QZ im Batch-Betrieb gefahren. Die Verweildauer bzw. Zerkleinerungszeit des Landschaftspflegegrases betrug 15 s. Aus dieser Verweildauer wurde der Personalbedarf für den Betrieb des Querstromzerspanners abgeleitet. Es wurde davon ausgegangen, dass während dieses Zeitraumes Personal zur Beaufsichtigung des Zerspanners notwendig ist. Insbesondere während der Inbetriebnahme bzw. in der ersten Betriebszeit ist von einem erhöhten Personalbedarf für den Anlagenbetreiber auszugehen. Nachdem der Betreiber erste Erfahrung in der Betriebsführung gesammelt hat, sollte sich der Personalbedarf deutlich reduzieren lassen.

Für die Gewinnung von Biogas deuten sich weitere verfahrenstechnische Vorteile durch die Zerkleinerung des Substrats an, die im Gesamtprozess zu Vorteilen führen könnten. Beispielsweise sollte sich durch die Zerkleinerung des Substrats der Rühraufwand und somit der hier erforderliche Strombedarf reduzieren lassen. Da im Rahmen dieses Projekts der Strombedarf für das Rühren jedoch nicht gemessen bzw. erfasst wurde, können hierzu keine quantitativen Angaben gemacht werden.

3.2.2 Kosten der Querstromzerspannung

Wie die Literaturrecherche im vorherigen Kapitel 3.2.1 zeigt, sind die mit einer Querstromzerspannungsanlage verbundenen Investitionen nicht proportional zur Größe (kW_{el}) einer Biogasanlage, vielmehr bewegen sich die spezifischen Investitionen in einer großen Bandbreite. So liegt es nahe, dass der Anteil des zu zerkleinernden Substrats am Gesamtsubstrat, im hier betrachteten Fall Landschaftspflegegras, eine für die Wirtschaftlichkeit bestimmende Größe eines solchen Aufarbeitungsmoduls darstellt.

Für kleinere Biogasanlagen sind etwas höhere Aufbereitungskosten zu erwarten, da sich dann die fixen Kosten (Kapital- und Wartungskosten) auf eine geringere Menge an durchgesetztem Substrat aufteilen. Hieraus leitet sich die Notwendigkeit ab, für kleinere Biogasanlagen angepasste und kostengünstige Aufarbeitungskonzepte zu entwickeln. Im vorherigen Kapitel 3.2.1 wurde ferner auf die hohe Unsicherheit beim Ansatz für den Personalaufwand eingegangen. Mit zunehmender Erfahrung des Anlagenbetreibers lassen sich sicherlich noch deutliche Kostenreduzierungen im Personalbereich erreichen.

Auf Basis dieser Vorüberlegungen wurden zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit sowohl der Substratanteil von Landschaftspflegematerial am insgesamt in der Biogasanlage eingesetzten Substrat als auch der Ansatz für den Personalaufwand variiert und nachfolgend in Form einer Sensitivitätsanalyse dargestellt. Beim Substratanteil wurden im günstigsten Fall ein Anteil von 90 % L-Gras an der insgesamt eingesetzten Frischmasse angenommen, im ungünstigsten Fall nur ein Anteil von 10 % L-Gras. Wegen der besonderen Bedeutung wurde auch der Fall einer 50 %-igen Beimischung von Landschaftspflegematerial zum Gesamtsubstrat in die Betrachtungen mit eingezogen. Bei den Personalkosten wurde im ersten Ansatz davon ausgegangen, dass der gesamte Betrieb des Querstromzerspanners beaufsichtigt werden muss, d.h. es wird von zusätzlichem Personalaufwand während der gesamten Zerkleinerungszeit ausgegangen. In einem optimistischeren Ansatz wird von einer Halbierung dieses Personalbedarfs ausgegangen.

Tabelle 3.2: Aufbereitungskosten von Landschaftspflegematerial im Querstromzerspanner

Personalbedarf ^{b)}	Landschaftspflegegras-Substratanteil ^{a)}		
	10 % Substratmenge: 1.060 t FM/a	50 % Substratmenge: 5.300 t FM/a	90 % Substratmenge: 9.540 t FM/a
100 %-Ansatz	21,5 €/t FM	7,2 €/t FM	5,6 €/t FM
50 %-Ansatz	20,4 €/t FM	6,1 €/t FM	4,5 €/t FM

^{a)} Eigene Annahme: Der Substratanteil entspricht dem Anteil des durchgesetzten Landschaftspflegegrases am insgesamt in der Biogasanlage eingesetzten Substrat von rd. 10.600 t FM.

^{b)} 100 %-Ansatz bedeutet eine Anwesenheit von Personal während des gesamten Zerkleinerungsvorgangs. Im optimistischeren 50 %-Ansatz wird von einer Halbierung dieses Personalaufwands ausgegangen.

Die bei den Berechnungen gewonnenen Aufbereitungskosten stellen typische Werte für die Querstromzerspannung von Landschaftspflegematerial dar, die sich jedoch ohne eine genaue Überprüfung der individuellen Randbedingungen einer jeweiligen Biogasanlage nur bedingt auf einzelne Vorhaben in der Praxis übertragen lassen, da im Einzelfall diese Randbedingungen stark von den in dieser Studie getroffenen Annahmen abweichen können.

Tabelle 3.2 zeigt das Ergebnis dieser Sensitivitätsanalyse. In der Ergebnismatrix sind jeweils die spezifischen Aufarbeitungskosten in €/t FM aufgeführt, bezogen auf die durchgesetzte Menge an Landschaftspflegematerial.

Aus der Tabelle wird die Bandbreite der Aufbereitungskosten ersichtlich, sie können für das Landschaftspflegematerial zwischen 4,5 und 21,5 €/t FM betragen. Wie die Ergebnisse zeigen, ist der Anteil an eingesetztem bzw. zu aufbereitendem Landschaftspflegematerial die bestimmende Größe für die Wirtschaftlichkeit einer solchen Aufbereitungsanlage. Im Gegensatz dazu haben die Personalkosten nur einen geringen Einfluss.

Zur Einschätzung der Bedeutung der Aufbereitungskosten lag ein Vergleich mit den Bereitstellungskosten (frei Biogasanlage) von Landschaftspflegegras nahe (vgl. Kapitel 2.5, S. 15). In Abbildung 3.2 sind hierzu die bei der Zerkleinerung im Querstromzerspanner anfallenden Kosten zusätzlich zu den Bereitstellungskosten von L-Gras für eine 500 kW_{el}-Biogasanlage aufgetragen. In der Abbildung sind die Kosten jedoch auf die Tonne Trockenmasse bezogen und nicht wie bisher auf die Frischmasse. Beim Landschaftspflegegras wird ein TS-Gehalt von 31,6 % an Frischmasse unterstellt; hierbei sind Lagerungsverluste bei der Silage in Höhe von 12 % bereits berücksichtigt.

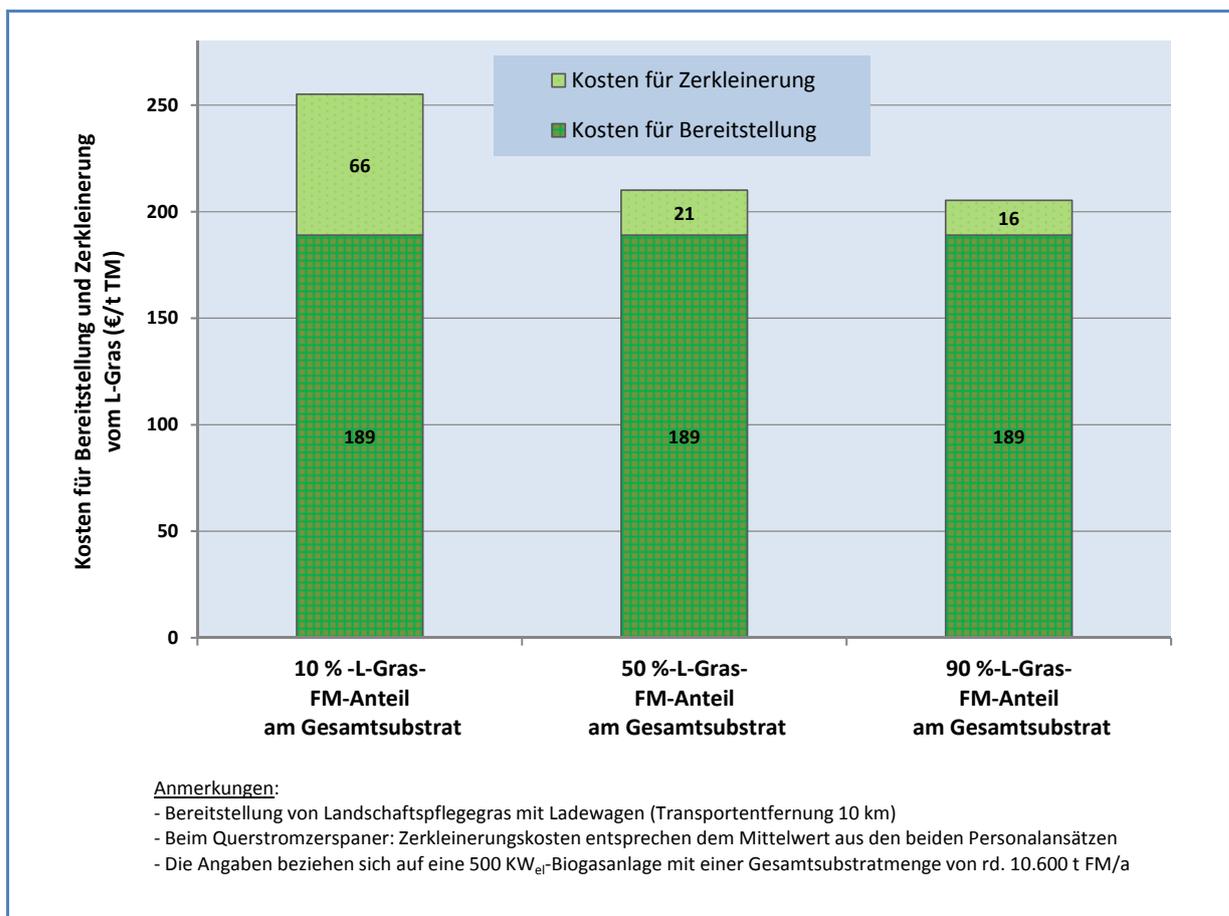


Abbildung 3.2: Bereitstellungs- und Zerkleinerungskosten von L-Gras

Wie Abbildung 3.2 zeigt, können die Aufarbeitungskosten für L-Gras mittels Querstromzerspannung zu einer deutlichen Erhöhung der Bereitstellungskosten führen. Auch hier zeigen sich deutliche Unterschiede, die auf die Auslastung bzw. den Durchsatz des Querstromzerspanners zurückzuführen sind. Bei geringem Durchsatz an L-Gras und damit geringer Aus-

lastung des Querstromzerspanners können die Kosten um bis zu 35 % gegenüber den Bereitstellungskosten insgesamt frei Biogasanlage steigen. Im günstigen Fall liegen die zusätzlichen Kosten für die Zerkleinerung des Materials knapp unter 10 %.

Dies ist verbunden mit der zentralen Frage, ob mit der Aufbereitung eine deutlich höhere Methanausbeute realisiert werden kann, die dann auch eine zusätzliche Investition in die Substrataufbereitung und den erhöhten Energieaufwand rechtfertigen würde.

Wie im Kapitel 5.2 dargelegt wird, variieren die spezifischen Methanerträge der untersuchten Materialien zwischen 0,240 und 0,297 m³ CH₄/kg oTS. Im Vergleich zum nicht aufgearbeiteten L-Gras konnte durch die Aufbereitung keine signifikante Steigerung der Abbaubarkeit bzw. der spezifischen Methanerträge der eingesetzten Substrate durch die mechanische Aufbereitung beobachtet werden (vgl. Abbildung 5.11, S. 64).

3.2.3 Schlussfolgerungen

Obwohl die Datenbasis und die darauf aufbauende techno-ökonomische Analyse und Bewertung der Aufbereitung von Landschaftspflegegras im Querstromzerspanner noch mit einer hohen Unsicherheit behaftet sind, deuten sich doch einige Schlussfolgerungen an.

Wie die Analyse zeigt, ist der Substratanteil an eingesetztem bzw. aufzubereitendem Landschaftspflegegras und somit die Auslastung einer Aufbereitungsanlage eine bestimmende Größe für deren wirtschaftlichen Betrieb an einer Biogasanlage. Durch Steigerung des Durchsatzes an Landschaftspflegegras und somit durch eine verbesserte Auslastung lassen sich die hohen Kapitalkosten verteilen und somit die spezifischen Aufarbeitungskosten deutlich reduzieren.

Am Beispiel des Landschaftspflegegrases zeigt sich, dass die Aufbereitungskosten für Substrate einen entscheidenden Einfluss auf die Erzeugungskosten von Biogas haben können und dass eine zusätzliche Investition in ein Aufbereitungsverfahren zunächst gründlich zu prüfen ist. So ist vor einer Investitionsentscheidung zunächst experimentell zu ermitteln, ob ein höherer Methanertrag erzielt werden kann und die zusätzliche Investition in die Aufbereitung und die damit verbundenen Betriebskosten und den Energieaufwand rechtfertigen.

Im Fall von Landschaftspflegegras hat die zusätzliche Zerkleinerung im Querstromzerspanner zu keiner wesentlichen Effizienzsteigerung der Biogaserzeugung geführt. Aufgrund der geringen Effekte auf die Methanausbeute deutet es sich an, dass die Querstromzerspannung kein geeignetes Verfahren zur Aufbereitung von L-Gras darstellt. Hier scheint somit der erhöhte Investitions- und Energieaufwand für die Querstromzerspannung nicht gerechtfertigt zu sein. Vielmehr müssten alternative Aufschlussverfahren untersucht werden, um ein geeignetes Verfahren für L-Gras zu entwickeln.

Wie Untersuchungen der Universität Hohenheim jedoch zeigen, können sich für bestimmte Substrate durch die Querstromzerspannung deutliche Steigerungen der Methanausbeute ergeben (Oechsner, 2014). Dies hängt ganz von den Eigenschaften des Substrats ab. Insbesondere bei sehr inhomogenem Material, wie beispielsweise Pferdemist, kann die mechanische Aufbereitung deutlich höhere Ausbeuten an Methan bewirken und deren Einsatz scheint hier gerechtfertigt zu sein. Generell ist für einen wirtschaftlichen Betrieb eines Aufbereitungsverfahrens zunächst die sorgfältige Abstimmung eines möglichen Aufschlussverfahrens auf das aufzubereitende Substrat notwendig.

4.1 Einleitung und methodisches Vorgehen

Wie bereits einleitend erwähnt, bauen die Verfahrensvergleiche der Verwendung von Landschaftspflegegras in Biogasanlagen sehr eng auf der bereits durchgeführten „Systemanalyse zur Erzeugung und Nutzung biogener Gase in Baden-Württemberg“ auf (Eltrop et al., 2013), an der die Autoren dieses Berichts federführend mitwirkten. Hierdurch sollen direkte Vergleichsmöglichkeiten mit diesen bereits durchgeführten Untersuchungen ermöglicht werden. Hierbei wurde von der zentralen Annahme ausgegangen, dass für bereits bestehende Biogas-Modellanlagen (= Referenzanlagen) geprüft werden soll, ob sich durch die teilweise Substitution des Substrat-Mix durch Landschaftspflegegras-Silage – nachfolgend mit L-Gras abgekürzt – Kostenvorteile erschließen lassen. Da mit der Querstromzerspannung beim L-Gras keine merkliche Erhöhung des Methanertrags erzielt werden konnte (vgl. Kapitel 3.2, S. 27), wurde diese Substratvariante bei den nachfolgenden techno-ökonomischen Betrachtungen nicht mit berücksichtigt. Die technische Ausstattung der Biogasanlagen als auch die Gesamtmenge des Substrat-Mix (t FM/a) wurden für die ökonomischen Vergleiche als gegeben bzw. als konstant unterstellt. Den Autoren ist bewusst, dass sich bei der Verwendung von L-Gras noch techno-ökonomische Anpassungen erschließen lassen, inwieweit dies für den gesamten Verfahrensablauf insgesamt zu Kostenvorteilen führt, scheint aber noch unklar zu sein.

4.1.1 Ausgewählte Anlagengrößen und Biogas-Substrate

Die getroffenen Festlegungen zu den untersuchten Anlagengrößen und Substraten bzw. Substratanteilen können Tabelle 4.1 entnommen werden. Die Biogasanlagen, bei denen kein L-Gras als Substrat eingesetzt wird, stellen hierbei jeweils die Referenzanlagen für die Vergleiche dar.

Mit Blick auf die Biogasproduktion wurden zwei für Baden-Württemberg typische Anlagengrößen untersucht (vgl. Härdtlein und Eltrop, 2013). Bei der kleineren Biogasanlage (150 kW_{el}) werden neben Maissilage, Winter-Weizen-Ganzpflanzen-Silage, Gras- und Landschaftspflegegras-Silage auch Rindergülle, mit einem Anteil von 35 % (in % der FM), als Substrat eingesetzt (vgl. Tabelle 4.1). Im Gegensatz dazu wird bei der 500 kW_{el}-Biogasanlage nur eine Verwendung von 10 % Rindergülle unterstellt; der Anteil von Maissilage beträgt hier aber 70 %. Bei der kleineren Anlage beträgt der Maissilage-Anteil nur 50 %. Diese unterstellten Substratanteile stellen jeweils die Referenz für den anschließenden Vergleich einer anteiligen Verwendung von L-Gras als Biogassubstrat dar. Wird L-Gras aus der 2-schürigen Pflege von Streuobstwiesen anteilig als Substrat eingesetzt, so wird bei beiden Anlagengrößen unterstellt, dass hierdurch entsprechende Mengenanteile (in % der FM) an Maissilage und W-Weizen-GPS ersetzt werden. Der jeweilige Anteil an Rindergülle wurde beibehalten, ausgehend von der Annahme, dass es sich hierbei um betriebseigene Mengen bzw. zugesicherte Abnahmemengen handelt, die deshalb kurz- und mittelfristig nicht ersetzt werden können. Darüber hinaus trägt die Rindergülle zur Prozess-Stabilisierung der Biogasanlage bei.

Tabelle 4.1: Anlagengrößen, Substratanteile und -durchsätze der Biogas-Modellanlagen

Parameter	Einheit	Biogasanlagen (Leistung in kW _{el})			
		150		500	
		ohne L-Gras (Referenz)	mit L-Gras	ohne L-Gras (Referenz)	mit L-Gras
Substrate /Substratanteile					
Rindergülle		35		10	
Co-Substrate:					
<i>Maissilage</i>	[Massen-% (FM)]	50	40	70	60
<i>W-Weizen-GPS</i>		5	–	10	–
<i>Grassilage (4-5 Schnitte/a)</i>		10	5	10	20
<i>L-Gras-Silage (2 Schnitte/a)</i>		–	20	–	10
Durchsatz pro Jahr					
	[t FM/a]	1.513		1058	
Rindergülle	[t oTS/a]	85		60	
	[GV/a]	84		59	
Co-Substrate, insges.	[t FM/a]	2.809		9.524	
	[t FM/a]	4.322		10.582	
Rindergülle + Co-Substrate	[t TS/a]	1.051	1.071	3.254	3.296
	[t oTS/a]	982	993	3.096	3.122
<i>davon L-Gras-Silage</i>	[% der oTS/a]	–	29,1	–	11,3

Für die jeweiligen Anlagengrößen (150 bzw. 500 kW_{el}) wurde die Substratzufuhr insgesamt (in t oTS/a) – mit und ohne L-Gras – annähernd konstant gehalten; die Abweichungen hiervon liegen im 1 %-Bereich. Bei den Biogasanlagen mit L-Gras werden, bemessen an der oTS-Zufuhr insgesamt, bei der 150 kW_{el}-Anlage rd. 29 % und bei der 500 kW_{el}-Anlage rd. 11 % über L-Gras abgedeckt. Folglich ist davon auszugehen, dass aufgrund des geringeren Substratanteils bei der größeren Biogasanlage die L-Gras bedingten Effekte geringer ausgebildet sein werden.

4.1.2 Methan-Ausbeuten

Eine Zusammenstellung der den Kalkulationen in Kapitel 4.2 (S. 37) zugrunde gelegten Methan-Erträge findet sich in Tabelle 4.2. Im Vergleich dazu gibt die nachfolgende Tabelle 4.3 einen Einblick in die große Variationsbreite bei den in Praxis- (P) bzw. in Laboranlagen (L) über die Nassvergärung erzielten Methan- bzw. Biogaserträgen aus Gras, Heu und Weizenstroh. Die eigenen Ansätze (vgl. Tabelle 4.2) lehnen sich hierbei in starkem Maße an den Angaben von KTBL (2013a) an, mit Ausnahme des für L-Gras unterstellten Methanertrags von 250 l_n/kg oTS. KTBL geht hierbei nur von Methan-Erträgen von 100-200 l_n/kg oTS aus. Mit Ausnahme von Rindergülle weist die BiomasseV (2012) im Vergleich dazu tendenziell niedrigere Methanerträge pro kg Substrat aus.

Tabelle 4.2: Methan-Erträge der eingesetzten Biogas-Substrate, ein Vergleich eigener Ansätze mit Literaturwerten

		CH ₄ -Ertrag				
		[l _n /kg FM]	[l _n /kg oTS]	[l _n /kg FM]	[l _n /kg oTS]	[l _n /kg FM]
Quelle		eigener Ansatz für die Kalkulation ^{b)}		KTBL (2013a)		Biomasse-V (2012)
Substrate ^{a)}	Rindergülle	12	209	17	210	17
	Maissilage	107	338	113	340	106
	W-Weizen-GPS	106	329	110	330	103
	Grassilage	105	318	101	320	100
	L-Gras-Silage	84	250	43-85	100-200	43

l_n = Liter Gasvolumen unter Normbedingungen

Anmerkungen:

a) Die Spezifikationen zur Zusammensetzung der Biogas-Substrate finden sich in Tabelle 2.1, S. 14

b) Aufbauend auf den Annahmen von Eltrop et al. (2013); für L-Gras-Silage wurde ein eigener Ansatz getroffen, orientiert an den von Oechsner u. Mitarbeitern im Zusammenhang mit diesem Projekt untersuchten Landschaftspflegematerialien (vgl. Tabelle 5.4, S. 56).

Bezüglich des Gasertrags aus Landschaftspflegematerial beschreibt das ILV Kiel, auf Grundlage der Energiepflanzen Datensammlung des KTBL, eine durchschnittliche Methanausbeute von 200-400 l_n Methan/kg oTS (Döhler et al., 2007). Lemmer (2005) stellt eine starke Abhängigkeit zwischen Ernteterminen und Zusammensetzung der Inhaltstoffe auf den Methanertrag von Grünschnitten fest. Bei Durchflussversuchen im Labor erzielte er für Grünschnitte spezifische Methanerträge bei einschürigen, spät im September gemähten Landschaftspflegeflächen von nur 80 l_n Methan/kg oTS, bei extensiv genutzten zweischürigem Grünland von 220 l_n Methan/kg oTS.

Mit Blick auf Tabelle 4.3, ist bezeichnend, dass sich in der Literatur kaum belastbare Ergebnisse für Praxisanlagen finden, im Gegensatz zu den in vielfältiger Art und Weise durchgeführten Laborversuchen. Die hierbei für Gras und Heu ermittelten Methanerträge pro kg oTS liegen im Bereich von 80 bis 400 l_n, bei mittleren Verweilzeiten der Biogas-Substrate von 14 bis ca. 120 Tagen. Beim kommunalen Grünschnitt (mit Anteilen an Holzschnitt und stark verunreinigt mit inertem Material) konnte über die Trockenfermentation dagegen nur ein Methanertrag von 90 l_n /kg oTS erzielt werden. Die bei Weizenstroh erzielten Methanerträge liegen im Bereich von 180-276 l_n /kg oTS.

Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse ist folglich der bei den nachfolgenden Kalkulationen zur Biogasgewinnung aus L-Gras unterstellte Methanertrag von 250 l_n /kg oTS (Tabelle 4.2) eher als optimistisch einzustufen.

Tabelle 4.3: Spezifische Methan- und Biogaserträge aus Gras, Heu und Weizenstroh, Ergebnisse von Labor- und Praxisversuchen (Nassvergärung)

Biogassubstrat	Praxis (P) Labor (L)	TS- Gehalt [% FM]	oTS- Gehalt [% TS]	Biogas- ertrag [L _N /kg oTS]	Methan- ertrag [L _N /kg oTS]	Reaktorgröße [l bzw. m ³ [Reaktorart]]	Tempe- ratur [in °C]	Mittlere Verweil- dauer [d]	Quellen
Ackergras mischung	(P)	20,8	92	648	k.A.	630 m ³	ca. 30	k.A.	Heiermann et al. (2009)
Grassilage (1. Schnitt)	(P) ¹⁾	25 – 50 ^{**}	70 – 95 ^{**}	550 – 620 ^{**}	k.A. ^{**}	~ 490 m ³ bis ~ 2 x 1076 m ³	k.A. ^{**}	k.A. ^{**}	Genesys Biogas AG (2008) ; (2011)
Grassilage (Grünland, 1. Schnitt, intensiv)	(L)	37,2	86,8	k.A.	390	18 l	35	25	Lemmer (2005)
Grassilage	(L)	25,9	k.A.	600	300 - 360	36 l	38	ca.120	Wichern et al. (2009)
Grassilage (ext. Wiesen)	(L)	26 31	91 92	550 450	k.A.	18 l	35	20	Baserga (1998)
Grassilage (Grünland, extensiv)	(L)	34,5	95,9	k.A.	220	18 l	35	40	Lemmer (2005)
Grassilage (Naturschutzgebiet)	(L)	74,7	93,0	k.A.	80	18 l	35	40	Lemmer (2005)
Grassilage	(L)	50	94	k.A.	260	50 l, Loop-Reaktor	38	ca. 50	Koch et al. (2009)
Gras	(L)	k.A.	k.A.	k.A.	190 - 370	20 l	35	16	Nalithambi (1997)
Weidegras	(L)	22,4	90,7	k.A.	220 - 360	20 l, PE-Container	37	14	Hensgen et al. (2014)
Weidegras	(L)	54,1	k.A.	k.A.	299	500 ml, Serumflasche	36	46	Melts et al. (2013)
Wiesengras	(L)	19,5	k.A.	750	k.A.	2,5 l, Glasfermenter	35	25 - 30	Linke und Vollmer (2002)
Wiesengras	(L)	25,2 - 36,9	k.A.	k.A.	128 - 392	1 l, batch	k.A.	ca. 40	Amon et al. (2005)
Heu	(L)	17,6 - 54,0	83,7 - 84,9	k.A.	250 - 400	5 l, batch	37	42	Zhu et al. (2014)
Grünschnitt , kommunal mit Holzschnitt	(L) ^{a)}	46,3	61,7 ^{b)}	k.A.	90,2	50 l	35	42	Kusch und Oechsner (2004)
Weizenstroh	(L)	92,4	k.A.	484	276	0,25 l, batch	37,5	k.A.	Bauer et al. (2010)
Weizenstroh	(L)	96	k.A.	k.A.	180	25 l, batch	37	31	Nkemka und Murto (2013)

k.A. = keine Angabe ^{a)} Trockenfermentation; ^{b)} stark verunreinigt mit inertem Material

4.2 Kosten der Biogasgewinnung

Die Kosten der Biogasgewinnung werden letztendlich von zwei Kostenblöcken bestimmt. Zum einen sind dies die Kosten der Substratbereitstellung frei Biogasanlage. Der zweite Kostenblock sind die Kosten für den Bau und Betrieb der Biogasanlage.

4.2.1 Substratbereitstellung

Bei den in Tabelle 4.4 aufgeführten Kosten der Substratbereitstellung frei Biogasanlage – jeweils bezogen auf Frischmasse, Trockenmasse und organische Trockensubstanz – sind die Kosten für die Gärrestausbringung mit einbezogen, da diese als Düngungsmaßnahme berücksichtigt wurde (s.a. Kapitel 2.5, S. 15).

Tabelle 4.4: Kosten der Substratbereitstellung frei Biogasanlage (inkl. Gärrestausbringung)

Parameter	Einheit	Biogasanlagen (Leistung in kW _{el})	
		150	500
Kosten, bezogen auf Frischmasse (inkl. Verluste)^{a)}			
Rindergülle		4,2	6,7
Maissilage		46,1	47,7
W-Weizen-GPS	[€/t FM]	52,0	53,6
Grassilage (4-5 Schnitte/a)		52,2	53,8
L-Gras-Silage (2 Schnitte/a) ^{b)}		56,2	67,9
Kosten, bezogen auf Trockenmasse (inkl. Verluste)^{a)}			
Rindergülle		55,7	89,1
Maissilage		139,7	144,7
W-Weizen-GPS	[€/t TM]	153,0	157,7
Grassilage (4-5 Schnitte/a)		149,1	153,7
L-Gras-Silage (2 Schnitte/a) ^{b)}		156,2	188,6
Kosten, bezogen auf organ. Trockensubstanz (inkl. Verluste)^{a)}			
Rindergülle		74,2	118,8
Maissilage		145,6	150,7
W-Weizen-GPS	[€/t oTS]	161,0	166,0
Grassilage (4-5 Schnitte/a)		158,6	163,5
L-Gras-Silage (2 Schnitte/a) ^{b)}		167,9	202,8
„ in % der Maissilage	[%]	115,5	134,6
„ in % der Grassilage	[%]	105,9	124,0

Anmerkungen:

a) Die Kosten der Substratbereitstellung schließen die anteiligen Kosten der Gärrestausbringung mit ein.

b) Für L-Gras wurde von mittleren Transportentfernungen von 5 km (150 kW_{el}-Anlage) bzw. 10 km (500 kW_{el}-Anlage) ausgegangen. Ansonsten wurden 2 km bzw. 5 km unterstellt.

Die Rindergülle stellt sich im Vergleich zu den Co-Substraten Maissilage, W-Weizen-GPS, Grassilage und L-Gras am kostengünstigsten dar. Dass Maissilage mit 140 bzw. 145 €/t TM bei den Co-Substraten die wettbewerbsfähigste Variante ist, wurde in Kapitel 2.5.2, (S. 21) bereits erörtert. L-Gras weist dagegen mit 156 bzw. 189 €/t TM die höchsten Kosten auf (s. auch Tabelle 2.8, S. 23); hierbei wurde jeweils von der Ladewagen-Variante ausgegangen.

Wie die Abschätzungen in Kapitel 2.5.3 (S.22) zeigen, könnten mit der Wickelballen-Variante die Bereitstellungskosten für L-Gras um rd. 28 €/t TM (150 kW_{el} Biogasanlage) bzw. um rd. 38 €/t TM gesenkt werden. Inwieweit dieser Kostenvorteil der Wickelballen-Variante gegenüber der Ladewagen-Variante in einem landwirtschaftlichen Betrieb Bestand hat, müsste jeweils vor dessen Mechanisierungshintergrund, Arbeitskräftebesatz und Flächenausstattung (inkl. Schlaggrößen, Feld-Hof-Entfernungen) überprüft werden.

4.2.2 Bau und Betrieb der Biogasanlagen, ohne und mit Landschaftspflegegras

Die Analysen zur Biogasgewinnung wurden anhand von jeweils zwei Modellanlagen durchgeführt (vgl. Kapitel 4.1.1, S. 33). Deren Anlagengröße und Ausgestaltung wurde so gewählt, dass eine möglichst große Repräsentativität für die Situation in Baden-Württemberg erreicht wird (vgl. Eltrop et al., 2013). Dies betrifft – wie bereits ausgeführt – neben der Anlagengröße (elektrische BHKW-Leistung) auch den Substratmix, der den Anlagen zugeführt wird (vgl. Tabelle 4.1, S. 34). Ausgehend von dieser Basis, wurde anhand der substratspezifischen Methan- und Biogaserträge – unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen hydraulischen Verweilzeit von 120 Tagen – eine Dimensionierung der Fermenter vorgenommen. Die Modellanlagen sind als Nassfermentationsanlagen ausgelegt, ausgestattet mit stehenden Fermentern und einem Nachgärer bzw. gasdichten Gärrestlagern. Bezüglich der Gasreinigung wurde unterstellt, dass die Modellanlagen jeweils mit einer internen biologischen Entschwefelung durch Sauerstoffeintrag ausgestattet sind.

Ein Verfahrensfließbild ist für die 500 kW_{el}-Biogasanlage in Abbildung 4.1 dargestellt.

Wesentliche anlagen- und prozessspezifische Kenndaten bzgl. der den techno-ökonomischen Analysen zugrunde liegenden Biogas-Modellanlagen finden sich in Tabelle 4.5, (S. 41). Alle Anlagen werden bei einer mesophilen Betriebstemperatur (39 °C) einphasig betrieben und stündlich mit Substrat beschickt. In der Praxis kann Art und Intervall der Beschickung deutlich hiervon abweichen. Vor dem Hintergrund einer durchschnittlichen hydraulischen Verweilzeit von 120 Tagen im Fermenter, wurden als substratspezifische Abbaugrade der Inputstoffe bei Rindergülle 41 %, bei Grassilage 65 %, bei WW-GPS 67 %, bei Maissilage 70 % und bei L-Gras 51 % angenommen, jeweils bezogen auf die organische Trockensubstanz der Substrate. Dies korrespondiert mit den unterstellten spezifischen Methanerträgen (Tabelle 4.2, S. 35) der in den Biogas-Modellanlagen eingesetzten Substrate.

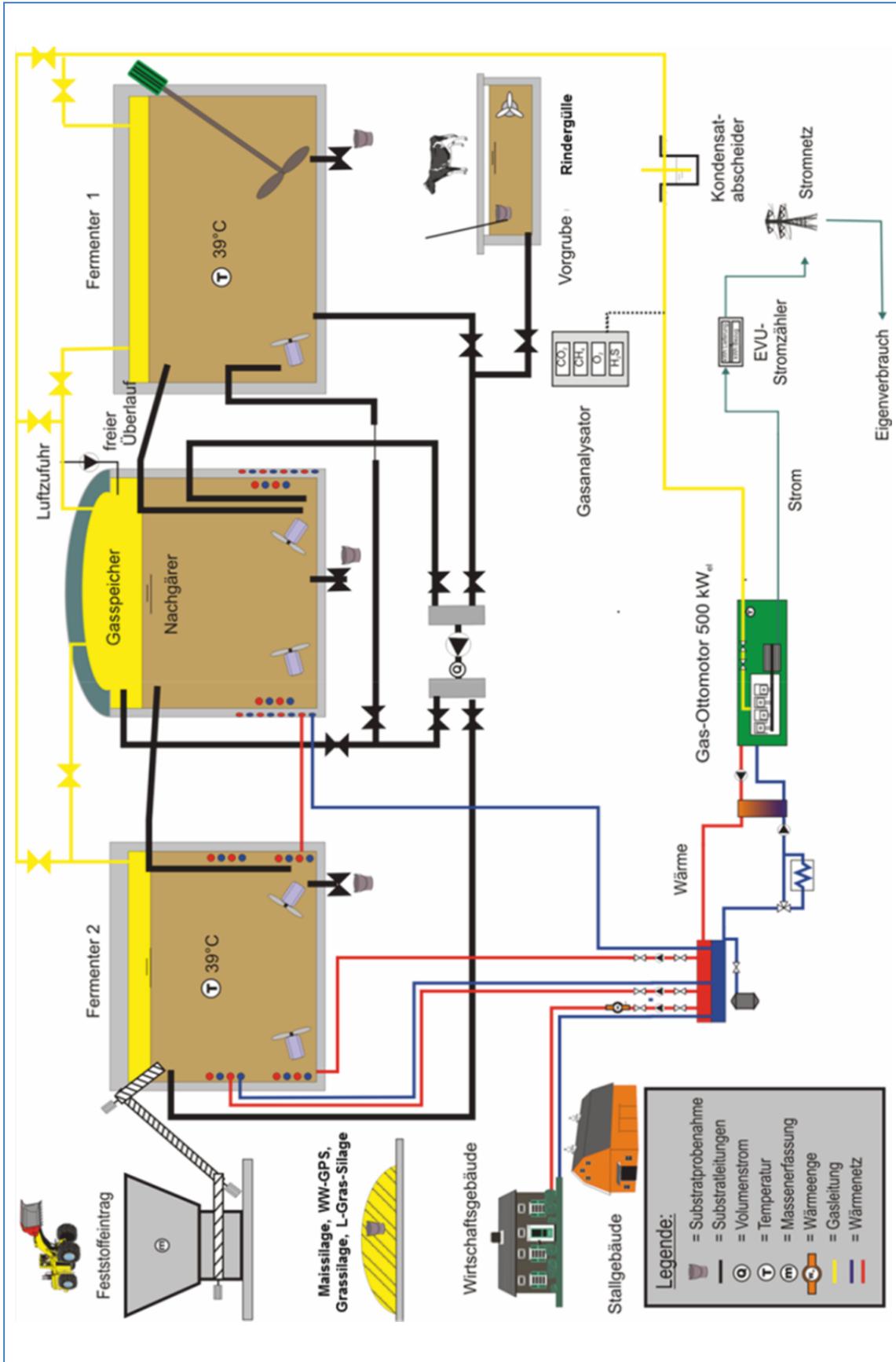


Abbildung 4.1: Verfahrensfliessbild für eine 500 kW_e-Biogasanlage (Eltrop et al., 2013, angepasst)

Ferner sind die Modellanlagen jeweils mit einem BHKW zur Strom- und Wärmebereitstellung ausgerüstet. Zur Deckung des Prozessstrombedarfs der Biogasanlagen wurde unterstellt, dass hierfür 10 % der insgesamt produzierten Strommenge nötig sind. Beim Wärmebedarf wurde von der Annahme ausgegangen, dass bei reinen Gülle-Biogasanlagen 30 % und bei den NaWaRo-Anlagen 20 % der produzierten Wärmemenge benötigt werden – anteilig zum Substrateinsatz wurde für die Modellanlagen dann jeweils der Wärmebedarf ermittelt. Hierbei wurde unterstellt, dass die Biogas-Modellanlagen ihren Prozesswärmebedarf über ihr BHKW decken und die dabei anfallende Strommenge, die über den Prozessstrombedarf der Biogasanlage hinausgeht, zu einem Preis von 100 €/MWh_{el} ins öffentliche Stromnetz einspeisen. Die hierbei seitens des BHKWs anfallenden Kosten wurden jeweils anteilig berücksichtigt.

Bei den elektrischen Wirkungsgraden der Blockheizkraftwerke wurde bei der 150 kW_{el}-Biogasanlage von 37,5 % ausgegangen, bzw. bei der 500 kW_{el}-Anlage von 40 % (vgl. Tabelle 4.5, S. 41). Die Berechnung der Kosten für die Biogas- sowie für die Strom- und Wärmeproduktion wurde auf Basis von Daten aus der Literatur – hier insbesondere von KTBL (2014b; 2013a; 2013b) – vorgenommen, unter Berücksichtigung eigener Festlegungen und ergänzt durch Angaben der Staatlichen Biogasberatung Baden-Württemberg, um den regionalen Bezug zu Baden-Württemberg sicherzustellen.

Welche ökonomischen Konsequenzen mit der Verwendung von L-Gras als Komponente im Substrat-Mix verbunden sind, werden daran gemessen, wie sich hierdurch die Biogasgestehungskosten verändern. In analoger Weise erfolgte dies anhand des Vergleichs der Stromgestehungskosten. Mit Blick auf die bei der Stromproduktion verbleibende Netto-Wärmeleistung (= nach Abzug des Prozesswärmebedarfs) des BHKWs wurde unterstellt, dass hiervon 30 % extern genutzt und mit einem Preis von 30 €/MWh_{th} vergütet werden können.

Der Vergleich mit der jeweiligen Referenz-Biogas-Modellanlage zeigt, dass die Substitution von 20 % (150 kW_{el}-Anlage) bzw. 10 % (500 kW_{el}-Anlage) des Substrats – bei insgesamt konstant bleibender Gesamt-Substratmenge (in t FM/a) – durch L-Gras mit einem Rückgang des Biogas- bzw. Stromertrags von 6,1 % bzw. 2,5 % einhergeht (vgl. Tabelle 4.5, S. 41). Dies scheint auf den ersten Blick gering. Ökonomisch wird dieser Effekt aber noch verstärkt, da die Bereitstellungskosten von L-Gras – verglichen mit der kostengünstigen Maissilage – rd. 15 % (150 kW_{el}-Anlage) bzw. rd. 35 % (500 kW_{el}-Anlage) teurer sind (vgl. Tabelle 4.4, S. 37). Verglichen mit Grassilage (4-5 Schnitte/a) beträgt dieser Unterschied rd. 6 bzw. 24 %.

Tabelle 4.5: Anlagen- und prozessspezifische Kenndaten zu den Biogas-Modellanlagen

Parameter	Einheit	Biogasanlagen (Leistung in kW _{el})			
		150		500	
		ohne L-Gras (Referenz)	mit L-Gras	ohne L-Gras (Referenz)	mit L-Gras
Gärprozess / Fermenter					
Fermenter 1	[m ³] Nettovolumen	671		2121	
Fermenter 2				482	
Nachgärer		654		1.127	
Gärrestlager		1.810		4.172	
Temperatur im Fermenter	[°C]	39			
Raumbelastung Fermenter	[kg oTS/m ³ ·d]	4,00	4,05	4,00	4,03
Abbaugrad der oTS	[%]	66,5	61,7	68,5	66,2
Verweilzeit im Reaktor	[d]	120			
Methangehalt im Biogas	[Vol.-%]	52,5	52,6	52,3	52,4
Biogasertrag					
pro t oTS	[t oTS]	617,2	571,3	635,9	613,5
pro Jahr	[m ³ /a]	605.920	567.497	1.968.755	1.914.939
H _i , pro Jahr	[MWh/a]	3.170	2.977	10.262	10.003
in % der Referenz	[%]	100,0	93,9	100,0	97,5
Verstromung mit BHKW					
BHKW-Leistung insgesamt	[kW _{el}]	150		500	
BHKW-Typ (Gas, Zündstrahl)		Gas			
Anzahl BHKW		1			
BHKW Wirkungsgrad	elektrisch	37,5		40,0	
	thermisch	46,0		43,0	
Betriebsstunden, errechnet	[h/a]	7.925	7.443	8.210	8.002
Stromkennzahl		0,82		0,93	
Verstromungsfaktor	[kW _{el} /m ³ Biogas]	1,96	1,97	2,08	2,09
Strom und Wärmeproduktion					
Prozesswärme-Bedarf		342,7	321,8	926,7	903,3
Prozessstrom-Bedarf		118,9	111,6	410,5	400,1
Stromproduktion	[MWh/a]				
brutto		1.188,8	1.116,5	4.104,8	4.001,2
netto		1.069,9	1.004,9	3.694,3	3.601,1
in % der Referenz	[%]	100,0	93,9	100,0	97,5
Wärmeproduktion	[MWh/a]				
brutto		1.458,3	1.369,5	4.412,7	4.301,3
netto		1.115,6	1.047,7	3.486,0	3.398,0
vergütet ^{a)}		334,7	314,3	1.045,8	1.019,4

^{a)} Es wurde unterstellt, dass 30 % der Netto-Wärmeproduktion eine Vergütung von 30 €/MWh_{th} erzielen können.

Tabelle 4.6: Ökonomische Analysen zu den Biogas-Modellanlagen

Parameter	Einheit	Biogasanlagen (Leistung in kW _{el})			
		150		500	
		ohne L-Gras (Referenz)	mit L-Gras	ohne L-Gras (Referenz)	mit L-Gras
Investitionen					
davon f. Bau		550.000		1.600.000	
davon f. Technik (ohne BHKW)		130.000		300.000	
Summe Investition (ohne BHKW)	[€]	680.000		1.900.000	
Investition für BHKW		120.000		300.000	
Summe Investition (mit BHKW)		800.000		2.200.000	
Fixe Kosten					
Lebensdauer Gebäude	[a]	20			
Maschinen, Anlagen		8			
Abschreibung (bei 6 % Zins), ohne BHKW		64.987		177.176	
Versicherungen, ohne BHKW		3.400		9.500	
Summe Fixe Kosten, ohne BHKW	[€/a]	68.387		186.676	
Summe Fixe Kosten, mit BHKW		87.217		233.752	
Variable Kosten					
Substratkosten (inkl. Transport)		133.148	138.960	484.484	511.322
Reparatur, Wartung		13.600		38.000	
Arbeitskosten (bei 15 €/AKh)	[€/a]	10.500		22.500	
Summe Variable Kosten		157.248	163.060	544.984	571.822
Gesamtkosten					
ohne BHKW	[€/a]	225.635	231.447	731.660	758.498
mit BHKW		246.865	252.677	784.736	811.573
Biogas- und Stromgestehungskosten					
Wärmeerlös	[€/a]	10.040	9.429	31.374	30.582
Biogasgestehungskosten ohne Wärmeerlös	[€/MWh]	88,5	97,2	86,1	91,8
in % der Referenz	[%]	100,0	109,8	100,0	106,7
Stromgestehungskosten ohne Wärmeerlös	[€/MWh _{el}]	210,9	230,3	198,1	210,6
mit Wärmeerlös	[€/MWh _{el}]	201,5	221,0	189,6	202,1
in % der Referenz	[%]	100,0	109,7	100,0	106,6

AKh = Arbeitskraftstunde

Bei der kleineren Biogas-Modellanlage führt der Substratanteil von 20 % L-Gras (vgl. Tabelle 4.1, S. 34; ersetzt werden 10 % Maissilage, 5 % WW-GPS und 5 % Grassilage) zu rd. 10 % höheren Biogas- bzw. Stromgestehungskosten, verglichen mit der Referenzanlage (vgl. Tabelle 4.6). Bei der größeren Biogas-Modellanlage, bei der 10 % Maissilage durch L-Gras und die WW-GPS durch Erhöhung des Grassilageanteils von 10 auf 20 % ersetzt werden, verteuert sich die Biogas- bzw. Stromproduktion um rd. 7 %. In absoluten Werten gesprochen bedeu-

tet dies, dass bei der kleinen Anlage durch die Verwendung von L-Gras die Stromgestehungskosten (inkl. Wärmeerlös) um 19,5 € auf 221,0 €/MWh_{el} ansteigen; bei der größeren Anlage beträgt der entsprechende Anstieg 12,5 € auf 202,1 €/MWh_{el} (vgl. Tabelle 4.6, S. 42).

Wie am Beispiel der Kosten und Kostenanteile der Biogasbereitstellung deutlich wird (s. Abbildung 4.2), tragen die Substratkosten mit rd. 60 % (150 kW_{el}-Anlage) bzw. sogar bis 67 % (500 kW_{el}-Anlage) zu den Biogaskosten bei. Die Kapitalkosten der Biogasanlage tragen mit rd. 28 % bzw. rd. 24 % zu den Biogaskosten bei. Die Kosten für Personal und Sonstiges (Wartung, Reparatur, Versicherung) sind mit einem Beitrag von 3-7 % zu den Gesamtkosten eher von untergeordneter Bedeutung. Dies veranschaulicht sehr klar, dass die Wettbewerbsfähigkeit von Biogasanlagen am stärksten von den Substraten abhängt.

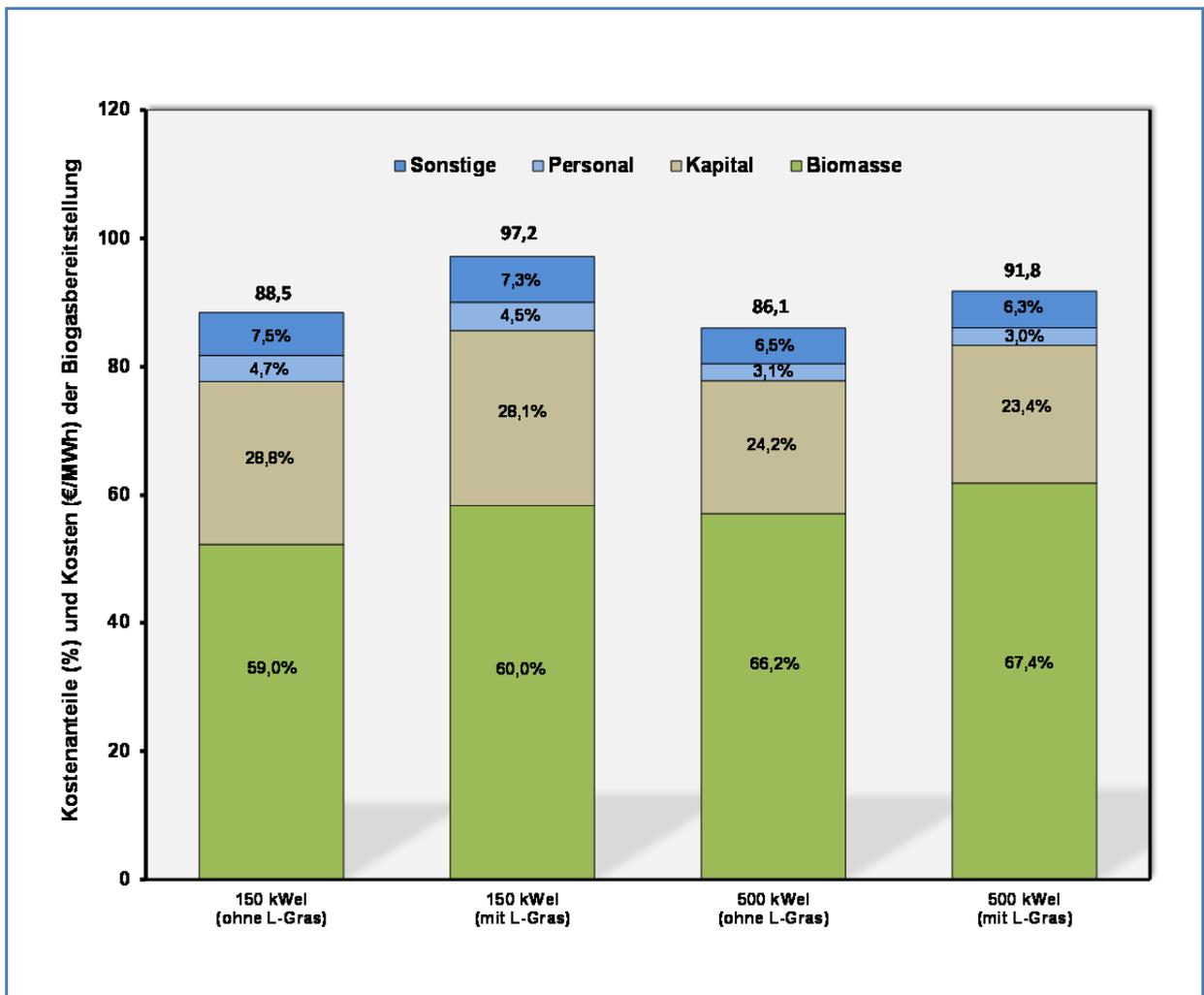


Abbildung 4.2: Kosten und Kostenbestandteile der Biogasbereitstellung ohne und mit L-Gras

Wollte man vor diesem Hintergrund beispielsweise den Kosteneffekt der Substrat-Änderung in den Biogasanlagen komplett (150 kW-Anlage) bzw. anteilig (500 kW_{el}-Anlage) dem L-Gras zurechnen, dann müsste dieses um rd. 7 €/t FM bzw. um rd. 13 €/t FM verbilligt werden (vgl. Tabelle 4.4, S. 37), um zu gleichen Stromgestehungskosten wie bei der jeweiligen Referenzanlage zu kommen. Bezogen auf den ha-Ertrag des L-Grases entspricht dies einer Flächenprämie von rd. 90 bzw. 160 €/ha.

Wird in der 150 kW_{el}-Anlage 50 % L-Gras anstatt 20 % eingesetzt und der Maissilage-Anteil von 40 % auf 10 % reduziert (vgl. Tabelle 4.1, S. 34), dann würde sich die gegenüber der Referenz-Anlage bestehende Kostenunterdeckung von rd. 6.400 € (vgl. Tabelle 4.6, S. 42) auf rd. 19.200 €/a erhöhen. Verglichen mit der Referenz-Anlage entspricht dies einer Erhöhung der Stromgestehungskosten auf rd. 260 €/MWh_{el}, gegenüber bisher rd. 202 €/MWh_{el}. Bei einem L-Gras-Anteil von 20 % lagen die Stromgestehungskosten noch bei 221 €/MWh_{el} (vgl. Tabelle 4.6, S. 42). Folglich würde diese Erhöhung des L-Gras-Substratanteils von 20 auf 50 % bei der 150 kW-Anlage mit Mehrkosten von rd. 40 €/MWh_{el} einhergehen.

In analoger Weise stellt sich die Frage, mit Blick auf den für Praxis-Biogasanlagen als relativ optimistisch eingestuften Methanertrag bei L-Gras von 250 l/kg oTS (vgl. Tabelle 4.2, S. 35), in welchem Maße die Stromgestehungskosten ansteigen, wenn nur von 125 l Methan pro kg oTS ausgegangen wird. Am Beispiel der 150 kW-Anlage, bei dem angeführten L-Gras-Anteil von 20 %, würde dies die Stromgestehungskosten von 221 €/MWh_{el} auf 252 €/MWh_{el} erhöhen. Dies verdeutlicht eingehend, dass Verfahrensoptimierungen vor allem bei der Erzielung höherer spezifischer Methanerträge ansetzen sollten.

Ferner können in der Praxis durch L-Gras (gilt generell für Landschaftspflegematerial) aufgrund der gegebenen betriebsspezifischen Rahmenbedingungen – z.B. durch zusätzliche Investitionen (z.B. Rührwerk), höheren Stromverbrauch, Verschleiß, Sinkschichten (inerte Verunreinigungen), Aussortieren von Störstoffen (Abfällen) – insgesamt höhere Gesamtkosten als hier dargestellt anfallen, die dann zu einer weiteren Verteuerung der Biogas- bzw. Stromgestehungskosten führen. Um diese Unsicherheiten besser einordnen zu können, müssten konkrete Biogasanlagen, die L-Gras bzw. Landschaftspflegematerial als Substrat verwenden, detaillierter untersucht werden.

Bemisst man die in diesem Kapitel diskutierten Ergebnisse zu den Stromgestehungskosten – am Beispiel der 150 kW-Anlage – an den Regelungen des EEG (2014, 2011, 2008) bezüglich Landschaftspflegematerial, so waren nicht einmal die noch relativ günstigen Regelungen des EEG 2008 (gültig ab 01.01.2009) ausreichend, um die bestehende Kostendifferenz zur Referenzanlage auszugleichen. Die dort geforderte Einsatzmenge an Landschaftspflegematerial am Substrat-Mix der Biogasanlage von mindestens 50 %, um eine zusätzliche Vergütung von 20 €/MWh_{el} für die gesamte produzierte Strommenge der Biogasanlage zu erhalten, scheint aufgrund dieser Ergebnisse im Nachhinein doch etwas unrealistisch gewesen zu sein.

Da bei der hier angeführten 150 kW-Biogasanlage der L-Gras-Anteil am Gesamtsubstrat jedoch nur 20 % beträgt, wäre diese Anlage gar nicht in den Genuss der damaligen Förderung nach dem EEG (2008) gekommen. Die nachfolgend aktualisierten Regelungen des EEG (2011, gültig ab 01.01.2012) haben die gezielte Förderung von Landschaftspflegematerial noch weiter eingeschränkt und zwar auf die aus diesem Substrat herrührende Strommenge. In der aktuell ab 01.08.2014 gültigen Version des EEG (2014) ist eine spezifische Förderung für das Landschaftspflegematerial komplett entfallen.

4.2.3 Schlussfolgerungen

Wie anhand der Ergebnisse in Kapitel 4 (S. 33ff) dargestellt und diskutiert, ist die Produktion von Biogas aus L-Gras ein teurer Verwertungsweg, der von den aktuell gültigen Regelungen des EEG (2014) nicht honoriert wird. Es muss folglich gute Gründe dafür geben, diesen Verwertungspfad einzuschlagen. Die Sicherstellung regionaler Wertschöpfungsketten, die z.B. mit der Erhaltung der regionalen Streuobstproduktion und dem damit verbundenen Landschaftsbild einhergeht, könnte beispielsweise hierfür Argumente liefern.

Vor diesem Hintergrund müssen somit alternative Förderungen angeboten und genutzt werden, um die Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Landschaftspflegematerial in Biogasanlagen darstellen zu können. Ansätze hierzu gibt es beispielweise von Seiten regionaler Landschaftspflege- und Naturschutzverbände, oft in Kombination mit regionalen Stromversorgern. Der „Regionalstrom Allgäu-Oberschwaben“ (BUND Ravensburg, 2014) ist hierfür ein typisches Beispiel.

Um eine ökonomisch günstigere Verwendung von lignozellulosereichem L-Gras bzw. Landschaftspflegematerial in Biogasanlagen realisieren zu können, ist die Verbesserung des Abbaugrades der oTS und somit die Erhöhung der spezifischen Methanausbeute sicherlich mit eines der wichtigsten Optimierungsziele. Kostengünstige Aufschlussverfahren des Biogas-Substrates, insbesondere aber auch die Realisierung zweiphasiger Verfahrenskonzepte in der Biogasanlage (räumliche Trennung der Hydrolyse von der Methanogenese) sind sicherlich zentrale Optimierungsansätze (vgl. Lemmer und Oechsner, 2013), um die Raum-Zeit-Ausbeuten des Methanertrags und somit die Wettbewerbsfähigkeit der Biogasgewinnung aus lignozellulosereichen Substraten zu verbessern.

5 VERFAHRENSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN

5.1 Spezifische Methanerträge

Für die Quantifizierung der erzielbaren spezifischen Methanerträge mussten zunächst die eingesetzten Substrate analysiert werden – die Methoden hierzu sind nachfolgend beschrieben. Zur Bestimmung der spezifischen Methanerträge mit diesen Substraten kamen drei verschiedene methodische Ansätze zur Anwendung.

5.1.1 Material und Methoden

Herkunft, TS- und oTS-Gehalt der verwendeten Substrate

Tabelle 5.1: Substrat-Nr., Substratherkunft und -art, TS- und oTS-Gehalte der untersuchten Landschaftspflegematerialien

	Substrat	Charge	Trockensubstanz (TS)	Organische Trockensubstanz (oTS)
Nr.	Herkunft und Art		[% FM]	[% FM]
1	FFH Hanglage, Freudenstadt (krautig)	A	61,2	57,1
2	FFH Plateau, Freudenstadt (Gras, Kräuter)	D	72,7	68,6
3	FFH „Windelschnecke“, Freudenstadt (Gras)		62,5	58,9
4	FFH „Rinkenteich“, Baiersbronn		62,5	58,9
5	FFH „Kohlwald“, Baiersbronn (Gras)	B	42,7	39,0
6	Wiese, Gestüt Marbach, St. Johann	C	39,2	36,2
7	Wiese, Hiller, am Waldrand		38,3	35,5
8	Flughafen Stuttgart (West), Glatthafer, 20 cm hoch geschnitten		49,1	45,5
9	Flughafen Stuttgart (West), Glatthafer, bodennah geschnitten		47,0	43,6
10	Flughafen Stuttgart (Ost), Rotschwingel, 20 cm hoch geschnitten		48,6	45,3
11	Flughafen Stuttgart (Ost), Rotschwingel, bodennah geschnitten		46,4	43,3
12	Sportplatzrand		36,1	29,6
13	Sportrasen		26,6	23,5
14	Golfplatz, Green		21,1	14,4
15	Mohn		44,6	38,4
16	Distel		32,6	30,2
17	Brennnessel/Ackerwinde		22,4	19,3
18	Sauerampfer		14,3	12,7
19	Salbei/Baldrian		31,8	29,3
20	Stroh-Strauch-Schnitt		60,0	55,1
21	Heckenschnitt (kommunaler Sammelplatz)		49,6	45,8

FFH = Schutzgebiete nach der Fauna-Flora-Habitatrichtlinie

A-D = Die Chargen A bis D wurden in der kontinuierlichen Vergärung (s. S. 52) und bei der Querstromzerspannung (s. S. 60) eingesetzt.

Für die Untersuchungen zum spezifischen Methanertrag im HBT (Hohenheimer Biogasertragstest) wurden insgesamt 21 verschiedene Substrate (Tabelle 5.1) ausgewählt, davon fünf von FFH-Flächen. Zusätzlich wurden Grünschnitte von Flächen mit unterschiedlicher Nutzungsintensität gesammelt, von der Wiese am Waldrand (Nr. 7) bis zum Golfplatz-Green (Nr. 14). Des Weiteren wurden krautige (z.B. Distel, Mohn) und verholzte Materialien (Stroh-Strauch-Schnitt, Heckenschnitt) untersucht. Die Struktur und Beschaffenheit der untersuchten Landschaftspflegematerialien unterlag deshalb einer sehr großen Spannweite. Aufgrund der verschiedenen Nutzungsintensitäten und Schnittzeitpunkte waren folglich auch deren TS-Gehalte sehr unterschiedlich.

Für die Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung mit dem Querstromzerspanner wurden die Landschaftspflegematerialien von den FFH-Flächen Hanglage Freudenstadt (Nr. 1) und Kohlwald Baiersbronn (Nr. 5) sowie einer vom Landesgestüt Marbach bewirtschafteten Grünlandfläche am Standort St. Johann (Nr. 6) verwendet. Im kontinuierlichen Biogasprozess (Durchflussversuch) wurden zusätzlich Landschaftspflegematerialien von der FFH-Fläche Plateau Freudenstadt (Nr. 2) eingesetzt. Diese Materialien wurden Anfang Juli 2013 gemäht und in Silowickelballen zur Versuchsstation „Unterer Lindenhof“ der Universität Hohenheim transportiert und dort über einen Zeitraum von sechs Wochen gelagert und siliert.

Bestimmung der TS, oTS, Roh Nährstoffe und Faserbestandteile

Die Bestimmung der Trockensubstanz- (TS) und organische Trockensubstanzgehalte (oTS) wurden nach den Vorgaben des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V. (VDLUFA, 2007) durchgeführt. Die Korrektur der TS-Gehalte der Materialien um die leicht flüchtigen Substanzen wurde nach Weißbach und Strubelt (2008) vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Die Bestimmung der flüchtigen Fettsäuren, Alkohole und Zucker der Substratproben wurden im Analytiklabor der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie mit Gaschromatographen und HPLC-Gerät durchgeführt. Zusätzlich wurden die Roh Nährstoffe entsprechend der Weender Futtermittelanalyse und die Faserbestandteile nach der Methode van Soest der Substrate Nr. 1, 2, 5 und 6 von der Landesanstalt für landwirtschaftliche Chemie der Universität Hohenheim analysiert. Die Ergebnisse zu diesen zusätzlichen Untersuchungen finden sich in Tabelle 5.8 (S. 63).

Drei Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Methanerträge

a) Bestimmung mittels Hohenheimer Biogasertragstest (HBT)

Der Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) ist ein Batch-Gärttest im Labormaßstab nach den VDI-Richtlinien- 4630 (VDI-Gesellschaft Energietechnik, 2006). Das patentierte Verfahren dient der Messung der spezifischen Biogasbildung organischer Substanzen (Helffrich, 2005). Der Gärttest erlaubt sowohl Aussagen über die Biogasquantität, als auch dessen Qualität. Im Gegensatz zu herkömmlichen Batch-Gärttests, ist die benötigte Substratmenge beim HBT deutlich geringer. Mit einem Anteil von weniger als 5 g oTS des zu untersuchenden Substrates, lassen sich konkrete Aussagen über dessen Methanertrag treffen. Um die Genauigkeit des Gasertragstestes zu gewährleisten, war es notwendig, die Landschaftspflegematerialien vor dem Versuchsstart auf eine Partikelgröße von 10 mm zu zerkleinern. Aufgrund des Aufbaus des HBT besteht die Möglichkeit, eine größere Anzahl unterschiedlicher Substrate und Wiederholungen gleichzeitig zu untersuchen (Helffrich und Oechsner, 2003).

Für die Durchführung des HBT werden Glasspritzen (Kolbenprober) als Fermenter verwendet, welche ein Füllvolumen von 100 ml besitzen. Auf den Glasspritzen ist eine 1/1 Graduierung abgebildet, über die das Füll- und Gasvolumen abgelesen werden kann. Der Kolbenprober dient dabei sowohl als Gärraum für das eingesetzte Substrat, sowie als Sammelbehälter für das gebildete Biogas (Abbildung 5.1). Dadurch können insbesondere Gasverluste bei der Überführung in einen Gasspeicher vermieden werden. Um anaerobe Bedingungen zu garantieren, wird der Stopfen mit einem Gleitfett (Silikon) eingerieben. Auf den Kapillaranatz der Glasspritze wird ein Schlauchstück gestülpt, welches durch eine Schlauchklemme abgedichtet werden kann. Durch das Öffnen der Schlauchklemme wird das gebildete Biogas abgeführt und analysiert. Dabei wird der Stopfen in die Glasspritze gedrückt, bis das gesamte Gas entweichen kann (Helffrich und Oechsner, 2003).

Das für die Vergärung der Substrate im Brutschrank benötigte Inokulum stellt das Standardinokulum der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim dar. Dieses Inokulum wird in einem separaten 400 l Fermenter speziell für Gärversuche konditioniert.



Abbildung 5.1: Gefüllter Kolbenprober des HBT mit Inokulum und Testsubstrat

Die gefüllten Kolbenprober werden in eine Halterungsvorrichtung eingeführt (Abbildung 5.2). Diese ist an einen Motor angeschlossen, der die Halterung gleichmäßig rotieren lässt. Dadurch wird eine ständige Durchmischung der Substrate gewährleistet, sodass sich gebildetes Biogas leichter aus dem Gärsubstrat löst. Die gesamte Apparatur ist in einen Brutschrank montiert, in dem die benötigte Gärtemperatur auf $37,0 \pm 0,5 \text{ °C}$ eingestellt wurde. Zusätzlich ist ein Ventilator innerhalb des Brutschrankes installiert, der eine homogene Wärmeverteilung garantiert. Insgesamt können 129 Kolbenprober gleichzeitig inkubiert werden (Helffrich und Oechsner, 2003). Die Biogas- und Methanerträge werden unter Normbedingungen (1013 hPa, 273 K, 0 % Feuchtegehalt) angegeben. Der HBT wird über einen Zeitraum von 35 Tagen durchgeführt.

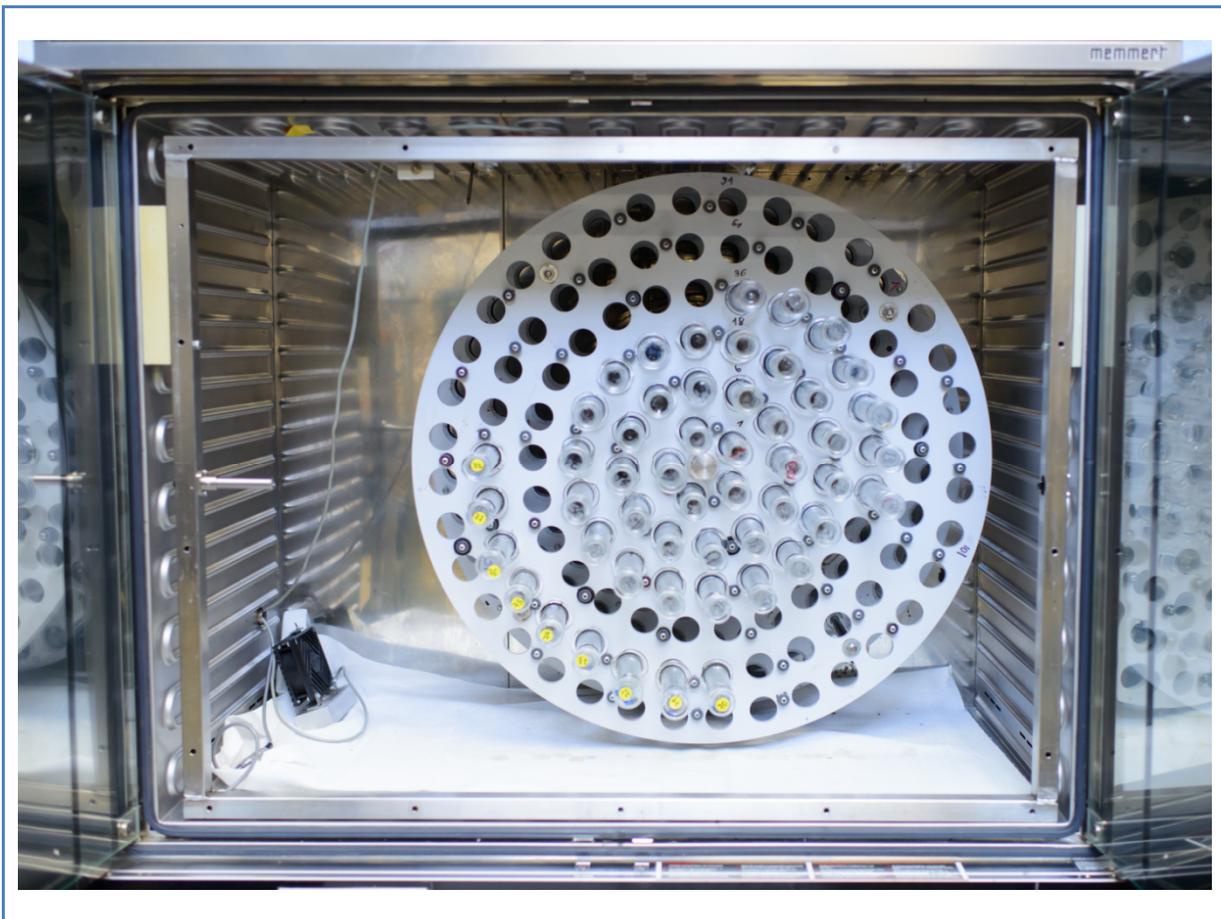


Abbildung 5.2: HBT-Brutschrank mit montiertem Rotor und Ventilator

b) Bestimmung im 2 Liter-Batch-Gärtest

Die 2-Liter-Batch-Anlage der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie, gemäß der VDI-Richtlinie 4630 (VDI-Gesellschaft Energietechnik, 2006), ist in Abbildung 5.3 schematisch dargestellt.

Die 2-Liter-Anlage ist in zwei Ebenen aufgeteilt. In der unteren Ebene befinden sich 24 Glasfermenter, die aus 2-Liter Schott Glasflaschen bestehen. Durch ein Wasserbad werden die Glasfermenter auf $37,0 \pm 0,5 \text{ °C}$ temperiert. Unterhalb des Wasserbades sind unter jedem ein-

zelen Fermenter Magnetrührwerke eingebaut. Mit Hilfe von Magnetstäben (Rührfische) wird eine Durchmischung der in den Fermentern befindlichen Substrate erzielt.

Um das entstehende Gas zu erfassen, führen Kunststoffschläuche aus den Glasfermentern in die obere Ebene der Versuchsanlage. Hier befinden sich 24 Gassammelrohre, 24 Entlastungsvorrichtungen für die Gasglocken, 24 Dreiwegehähne, um das Gas aus dem System zu entlassen, sowie ein Methansensor. Jedes der Gassammelrohre besteht aus einem Kunststoffmesszylinder und einer Gasglocke aus Glas. Um die Glocke herum befindet sich im Zylinder eine Sperrflüssigkeit. Die produzierte Gasmenge kann an der Zylinderskala abgelesen werden. Der Methangehalt des produzierten Biogases mit einem Methansensor bestimmt.

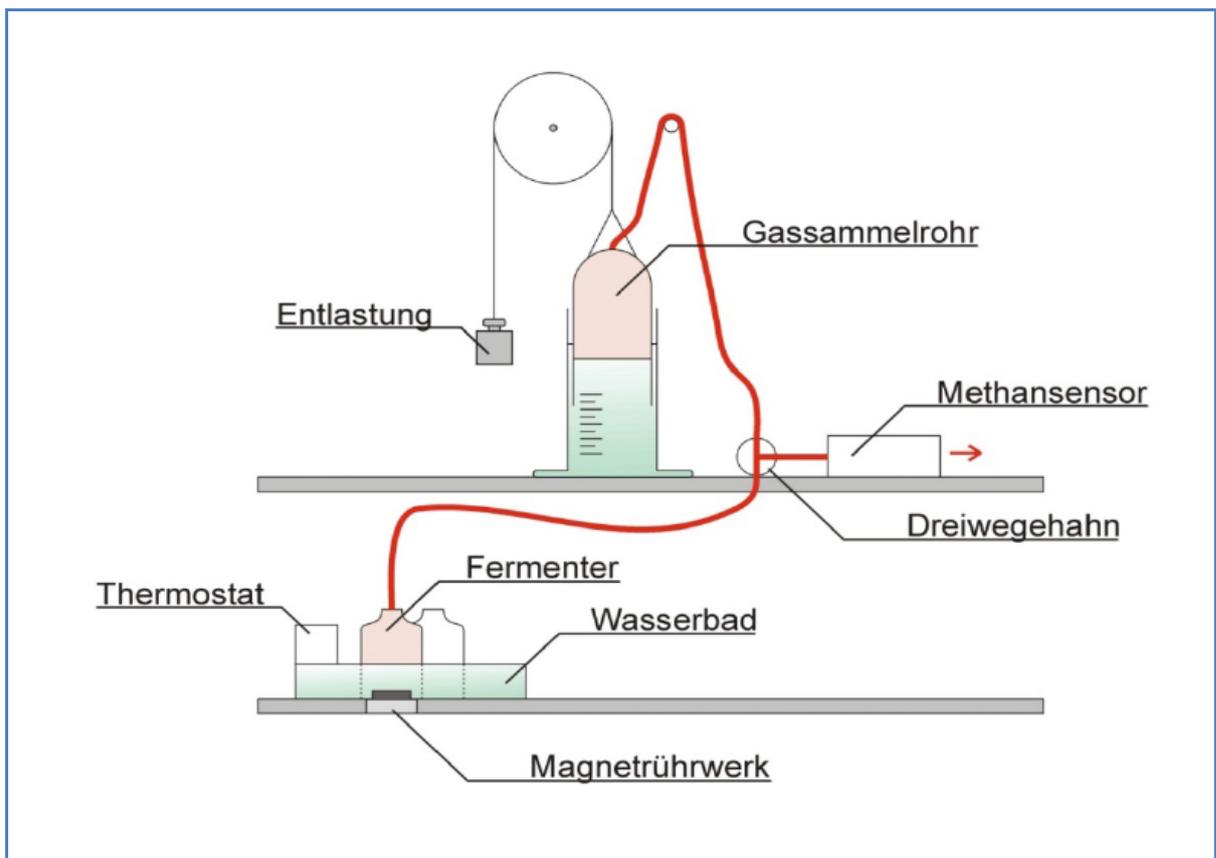


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der 2 Liter-Batch-Anlage



Abbildung 5.4: Aufbau der 2 Liter-Batch-Gärversuchsanlage

Die Biogas- und Methanerträge werden unter Normbedingungen angegeben. Der Batchversuch wurde über 35 Tage nach den Bedingungen der VDI-Richtlinie 4630 (VDI-Gesellschaft Energietechnik, 2006) durchgeführt. Die 2 Liter-Versuchsanlage der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Die in diesem Versuch verwendeten Substrate sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. Hierbei wurde aufbereitetes (mit Bio-QZ) und unaufbereitetes Landschaftspflegematerial untersucht (siehe auch Tabelle 5.1, S. 47).

Tabelle 5.2: Verwendete Substrate und Varianten im 2 Liter-Batch-Gärversuch

Charge (Substrat-Nr.)	Material und Herkunft	Variante	
		unaufbereitet	aufbereitet
		(Kontrolle)	(Bio-QZ, 15 s)
A (1)	FFH, Hanglage, Freudenstadt (krautig)	A	A QZ
B (5)	FFH „Kohlwald“, Baiersbronn (Gras)	B	B QZ
C (6)	Wiese, Gestüt Marbach (Gras)	C	C QZ

Substrat-Nr.: vgl. Tabelle 5.1 (S. 47)

c) Vergärbarkeit im kontinuierlichen Biogasprozess (Durchflussversuch)

Die Verwertbarkeit von Landschaftspflegematerialien im kontinuierlichen Biogasprozess wurde in der kontinuierlichen Versuchsanlage im Biogaslabor der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie untersucht. Diese Versuchsanlage umfasst insgesamt 15 liegende Fermenter, welche ein Faulraumvolumen von jeweils 17 Litern aufweisen. Dies ermöglichte den Ansatz von je drei Wiederholungen je Variante, inklusive der Kontrollvariante, die ausschließlich mit Gülle befüllt wurde. Die Durchmischung des Fermenterinhalt wurde durch horizontale Haspelrührwerke gewährleistet (Abbildung 5.5).

Der Antrieb der Haspelrührwerke erfolgte durch zeitintervallgesteuerte Elektromotoren. Die Prozesstemperatur wurde durch eine mit Wasser gefüllte Ummantlung auf $40,0 \pm 0,5$ °C eingestellt. Das produzierte Biogas wurde in separaten Gassäcken aufgefangen, nachdem es in Waschflaschen abgekühlt und somit das Wasser vom Gas abgesondert wurde.

Die Bestimmung der produzierten Biogasmenge und -qualität wurde täglich über eine automatisierte Gasmessstrecke durchgeführt. Zu diesem Zweck kamen ein Massendurchflussgerät, ein Flügelradanemometer und Infrarot-Gassensoren für die Bestimmung der Gaszusammensetzung (CH_4 , CO_2 und H_2S) zum Einsatz. Für die Umrechnung der Gasmengen in Normbedingungen wurden zusätzlich der Gasdruck und die Gastemperatur erfasst. Die Gasqualitätsbestimmung fand parallel zur Volumenbestimmung statt. In Abbildung 5.6 ist der schematische Aufbau der Versuchsanlage dargestellt.

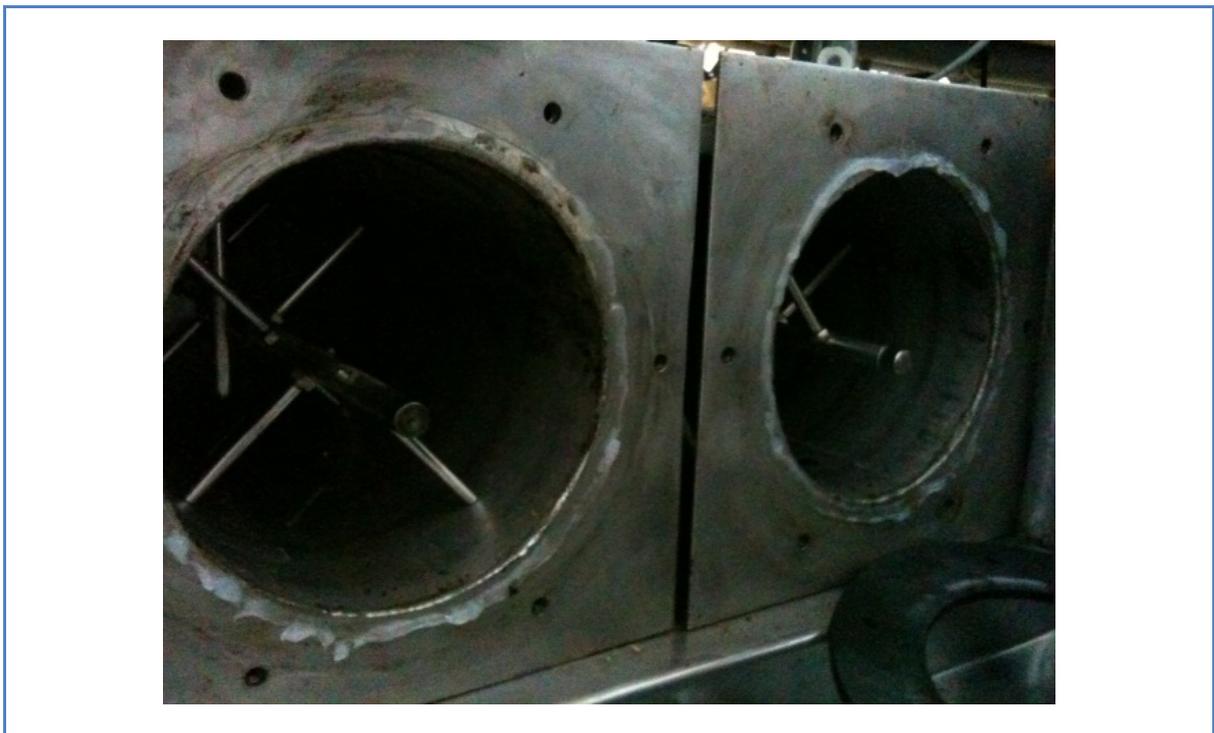


Abbildung 5.5: Fermenter mit Haspelrührwerk des Labor-Durchfluss-Fermenters

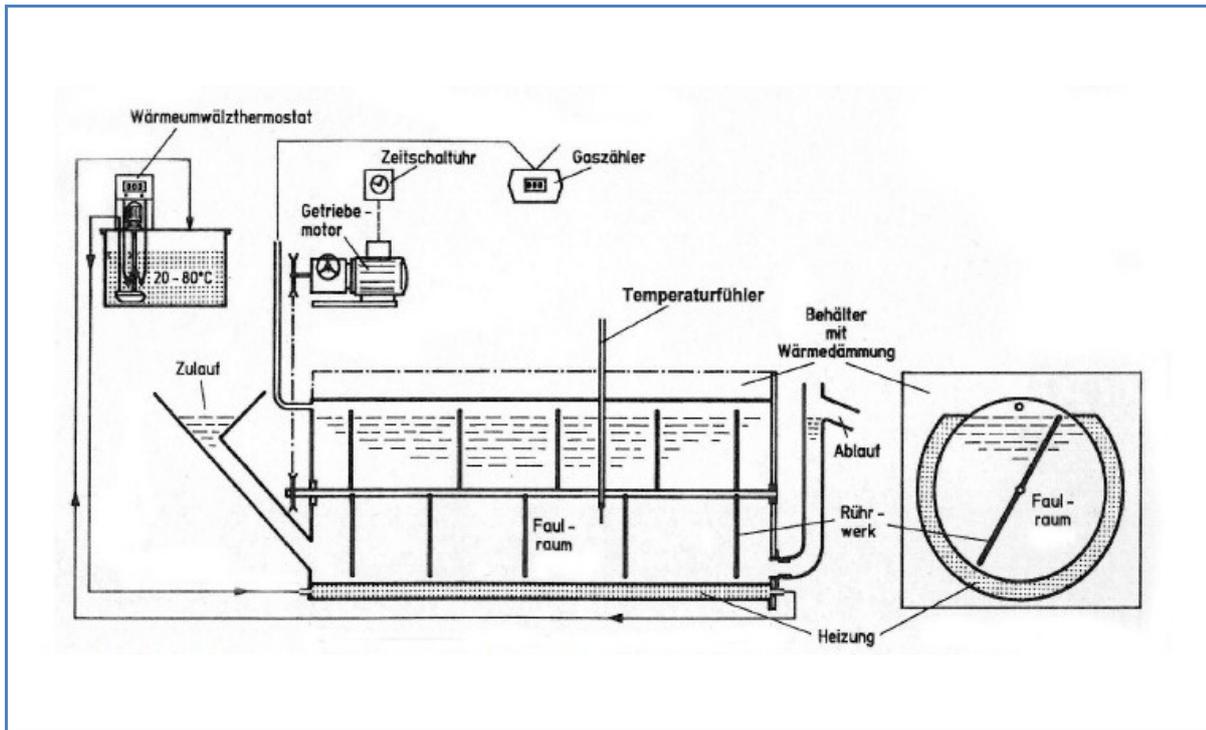


Abbildung 5.6: Schemazeichnung des Labor-Durchfluss-Fermenters mit 17 l Nutzvolumen

Es wurde eine hydraulische Verweilzeit (HRT) von 35 Tagen und eine Faulraumbelastung von 3,5 kg oTS/m³ Faulraum und Tag festgelegt. Als Substrate wurden die jeweiligen Chargen des Landschaftspflegematerials (ohne und mit Bio-QZ), Gülle und Wasser verwendet (s. Tabelle 5.3). In diesem Versuch wurden die im Bio-QZ aufbereiteten Materialien von der Hanglage in Freudenstadt (A), der Fläche Kohlwald Baiersbronn (B), der Wiese des Gestüts Marbach (C) und der Plateaufläche in Freudenstadt (D) verwendet.

Bei den Charge A und D (s. Tabelle 5.3) war eine weitere Vorzerkleinerung notwendig, um einen störungsfreien Versuchsbetrieb zu gewährleisten. Dies wurde mit einem Küchenmixer durchgeführt. Mit dem Faulraumvolumen von 17 Litern und der Hydraulischen Verweilzeit (HRT) von 35 Tagen konnte die tägliche Fütterungsmenge anhand der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\text{Tägliche Fütterungsmenge (vol)} = \frac{\text{Faulraumvolumen}}{\text{Hydraulische Verweilzeit (HRT)}}$$

Mit einer Raumbelastung von 3,5 kg oTS/m³*d und einem Faulraumvolumen von 17 Litern wurde die tägliche oTS-Zugabemenge der Substrate ermittelt. Hierzu wurde folgende Gleichung verwendet:

$$\text{Tägliche organische Trockensubstanzzugabe} = \text{Raumbelastung} \times \text{Faulraumvolumen}$$

Die ermittelten TS- und oTS-Gehalte der Substrate sind somit die Grundlage für die Berechnung der täglichen Frischmassezugabe in den Fermenter. Diese täglichen Fütterungsmengen des Durchflussversuches sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Der kontinuierliche Gärversuch erfolgte über einen Zeitraum von 75 Tagen.

Tabelle 5.3: Tägliche Fütterungsmengen des kontinuierlichen Gärversuches

Charge (Substrat-Nr.)	Substratherkunft und -art	Landschafts- pflegematerial	Gülle	Wasser
		[g FM/d]	[g FM/d]	[g/d]
A (1)	FFH, Hanglage, Freudenstadt (krautig)	63,1	252,5	170,1
B (5)	FFH „Kohlwald“, Baiersbronn (Gras)	89,6	358,2	38,0
C (6)	Wiese, Gestüt Marbach, St. Johann (Gras)	93,8	375,4	16,5
D (2)	FFH, Plateau, Freudenstadt (Gras)	53,3	213,3	219,1
K (Kontrolle)	Nur Gülle	-	486,0	-

Substrat-Nr.: vgl. Tabelle 5.1 (S. 47)

5.1.2 Ergebnisse

In Tabelle 5.4 sind die Ergebnisse zu den spezifischen Methanerträgen der untersuchten Landschaftspflegematerialien (Substrate) dargestellt, ausgehend vom **Hohenheimer Biogasertragstest (HBT)**. Zusätzlich sind hier nochmals zur Einordnung der Substrate deren TS- und oTS-Gehalte (vgl. Tabelle 5.1, S. 47) mit aufgeführt.

Die spezifischen Methanerträge der Flora-Fauna-Habitate (FFH) variieren zwischen 0,258 und 0,307 m³ CH₄/kg oTS. Beim Dauergrünland (Wiese Gestüt Marbach und Wiese am Waldrand) liegen die Erträge zwischen 0,225 und 0,296 m³ CH₄/kg oTS. Bei den Grünschnitten des Flughafens Stuttgart zeigte sich kein wesentlicher Unterschied zwischen bodennahe und hohem Schnitt, weder bei den westlichen noch bei den östlichen Flächen. Auch zwischen den Glatthafer- und Rotschwingelwiesen (West vs. Ost) bestehen kaum Unterschiede. Im Vergleich zu den Naturschutz-, Landschaftspflege- und Flughafenbegleitflächen haben die häufiger geschnittenen und intensiv genutzten Sportflächen höhere spezifische Methanerträge (0,309 bis 0,313 m³ CH₄/kg oTS). Die höchsten spezifischen Methanerträge wurden bei dem Golf-Green (0,340 m³ CH₄/kg oTS) detektiert. Die spezifischen Methanerträge der krautigen Materialien Distel, Brennnessel/Ackerwinde und Sauerampfer liegen zwischen 0,243 und 0,258 m³ CH₄/kg oTS. Deutlich geringer ist der Methanertrag des Salbei-Baldrian-Gemisches, mit 0,165 m³ CH₄/kg oTS. Bei den Substraten Mohn, Stroh-Strauchschnitt und Heckenschnitt liegen die spezifischen Methanerträge unterhalb von 0,20 m³ CH₄/kg oTS.

Tabelle 5.4: TS-, oTS-, Methangehalt und spezifischer Methanertrag (im HBT) der untersuchten Landschaftspflegematerialien

Substrat		TS	oTS	CH ₄ -Gehalt	spezifischer CH ₄ -Ertrag	
Nr.	Herkunft und Art	[% FM]	[% FM]	[Vol.-%]	[m ³ /kg oTS]	
					\bar{x}	SD
1	FFH, Hanglage, Freudenstadt (krautig) A	61,2	57,1	53,0	0,304	0,008
2	FFH, Plateau, Freudenstadt (Gras, Kräuter) D	72,7	68,6	52,1	0,307	0,005
3	FFH „Windelschnecke“, Freudenstadt (Gras)	62,5	58,9	53,6	0,276	0,007
4	FFH „Rinkenteich“, Baiersbronn	62,5	58,9	53,9	0,269	0,006
5	FFH „Kohlwald“, Baiersbronn B	42,7	39,0	54,9	0,258	0,004
6	Wiese, Gestüt Marbach, St. Johann (Gras) C	39,2	36,2	54,5	0,296	0,007
7	Wiese, Hiller, am Waldrand	38,3	35,5	54,1	0,225	0,010
8	Flughafen Stuttgart (West), Glatthafer, 20 cm hoch geschnitten	49,1	45,5	54,6	0,230	0,013
9	Flughafen Stuttgart (West), Glatthafer, bodennah geschnitten	47,0	43,6	53,6	0,238	0,010
10	Flughafen Stuttgart (Ost), Rotschwingel, 20 cm hoch geschnitten	48,6	45,3	53,7	0,258	0,010
11	Flughafen Stuttgart (Ost), Rotschwingel, bodennah geschnitten	46,4	43,3	55,2	0,265	0,009
12	Sportplatzrand	36,1	29,6	54,4	0,313	0,006
13	Sportrasen	26,6	23,5	52,3	0,309	0,021
14	Golfplatz, Green	21,1	14,4	57,5	0,340	0,009
15	Mohn	44,6	38,4	53,7	0,190	0,021
16	Distel	32,6	30,2	55,0	0,235	0,022
17	Brennnessel/Ackerwinde	22,4	19,3	55,8	0,243	0,018
18	Sauerampfer	14,3	12,7	55,3	0,258	0,014
19	Salbei/Baldrian	31,8	29,3	53,7	0,165	0,010
20	Stroh-Strauch-Schnitt	60,0	55,1	55,4	0,173	0,003
21	Heckenschnitt (kommunaler Sammelplatz)	49,6	45,8	52,7	0,152	0,013

FFH = Schutzgebiete nach der Fauna-Flora-Habitatrichtlinie; \bar{x} = Mittelwert; SD = Standardabweichung

A-D = Die Chargen A bis D wurden bei der Querstromzerspannung (s. S. 60) und in der kontinuierlichen Vergärung (s. S. 52) eingesetzt.

Die Ergebnisse zur Vergärbarkeit von Landschaftspflegematerial im **kontinuierlichen Biogasprozess (Durchflussversuch)** sind nachfolgend dargestellt. Die spezifische Methanproduktion, nach Ablauf der Startphase, von vier Substraten (Charge A bis D) aus Landschaftspflegematerial ist in Abbildung 5.7 dargestellt. In diesem Versuch konnte eine Stabilisierung der Methanproduktion nach 35 Tagen festgestellt werden. Für die Auswertung wurden dementsprechend erst die Messergebnisse ab dem 36. Versuchstag berücksichtigt.

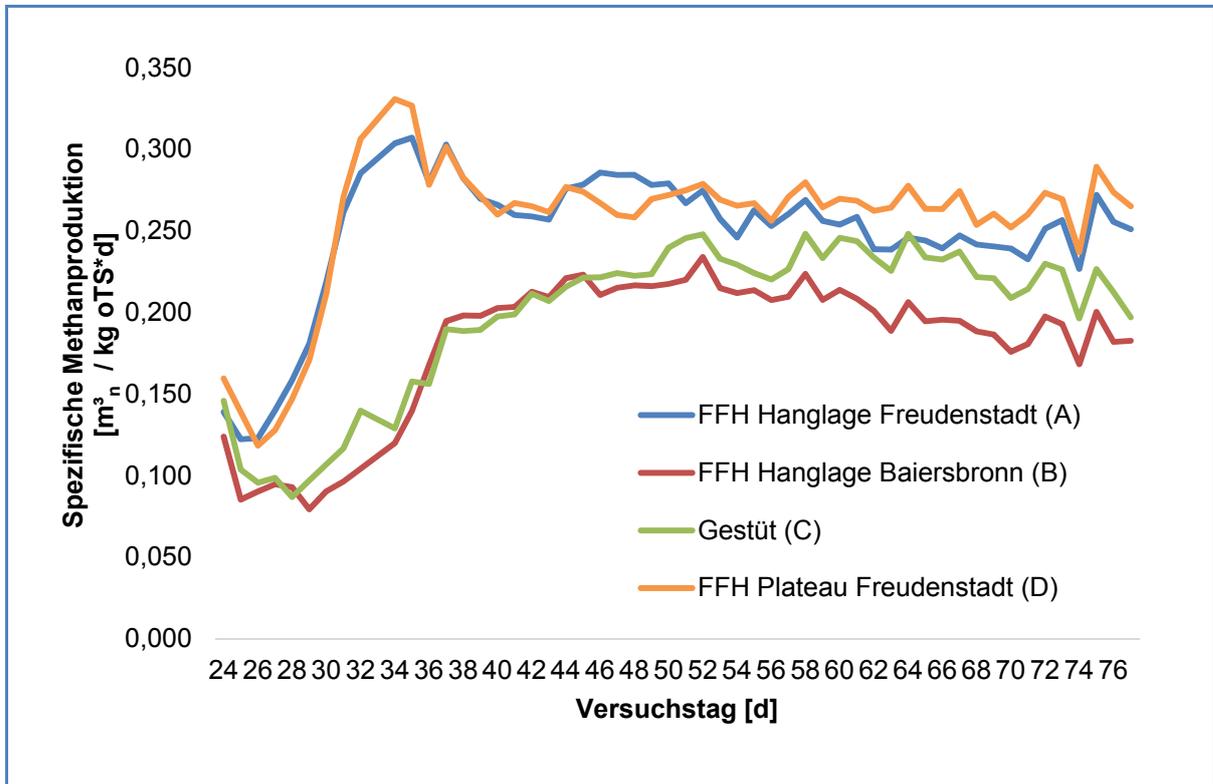


Abbildung 5.7: Tägliche spezifische Methanproduktion von vier Landschaftspflegematerialien im Durchflussversuch, nach Ablauf der Startphase

Die spezifische Methanproduktion der Charge A (Substrat-Nr. 1; FFH, Hanglage Freudenstadt (krautig)) und D (Substrat-Nr. 2; FFH, Plateau, Freudenstadt (Gras)) war in diesem Versuch nahezu identisch. Bei der Charge A wurde eine durchschnittliche spezifische Methanproduktion von $0,267 \text{ m}^3_{\text{n}} \text{ CH}_4/\text{kg oTS}$ erzielt und bei der Charge B $0,258 \text{ m}^3_{\text{n}} \text{ CH}_4/\text{kg oTS}$ (Tabelle 5.5). Etwas geringer war die spezifische Methanproduktion der Charge C (Substrat-Nr. 6; Wiese, Gestüt Marbach, St. Johann (Gras)), mit durchschnittlich $0,225 \text{ m}^3_{\text{n}} \text{ CH}_4/\text{kg oTS}$. Am niedrigsten war die spezifische Methanproduktion in dem kontinuierlichen Biogasversuch bei der Charge B (Substrat-Nr. 5; FFH „Kohlwald“, Baiersbronn (Gras)). Beim Vergleich der Methangehalte des produzierten Biogases sind dagegen keine wesentlichen Unterschiede feststellbar.

Tabelle 5.5: Methangehalt und spezifischer Methanertrag von vier Landschaftspflegematerialien im Durchflussversuch (Mittelwert, nach Ablauf der Startphase; ab Versuchstag 36)

Charge (Substrat-Nr.)	Substratherkunft und -art	CH ₄ -Gehalt		Spezifischer CH ₄ -Ertrag	
		[Vol.-%]		[m ³ _n /kg oTS]	
		\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
A (1)	FFH, Hanglage, Freudenstadt (krautig)	50,8	1,3	0,267	0,009
B (5)	FFH „Kohlwald“, Baiersbronn (Gras)	51,4	1,3	0,204	0,015
C (6)	Wiese, Gestüt Marbach, St. Johann (Gras)	52,6	0,7	0,225	0,015
D (2)	FFH, Plateau, Freudenstadt (Gras)	50,1	0,9	0,258	0,016

Substrat-Nr.: vgl. Tabelle 5.1 (S.47)

Der Vergleich der spezifischen Methanerträge von vier Landschaftspflegematerial-Chargen nach den drei verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Methanertrags (HBT, 2 Liter-Batch, kontinuierlich) ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Die höchsten spezifischen Methanerträge wurden bei allen vier Substraten im HBT erreicht. Geringfügig niedriger lagen die Ergebnisse aus der 2 l Batchanlage. Deutlich niedrigere Methanausbeuten wurden im kontinuierlichen Gärversuch detektiert.

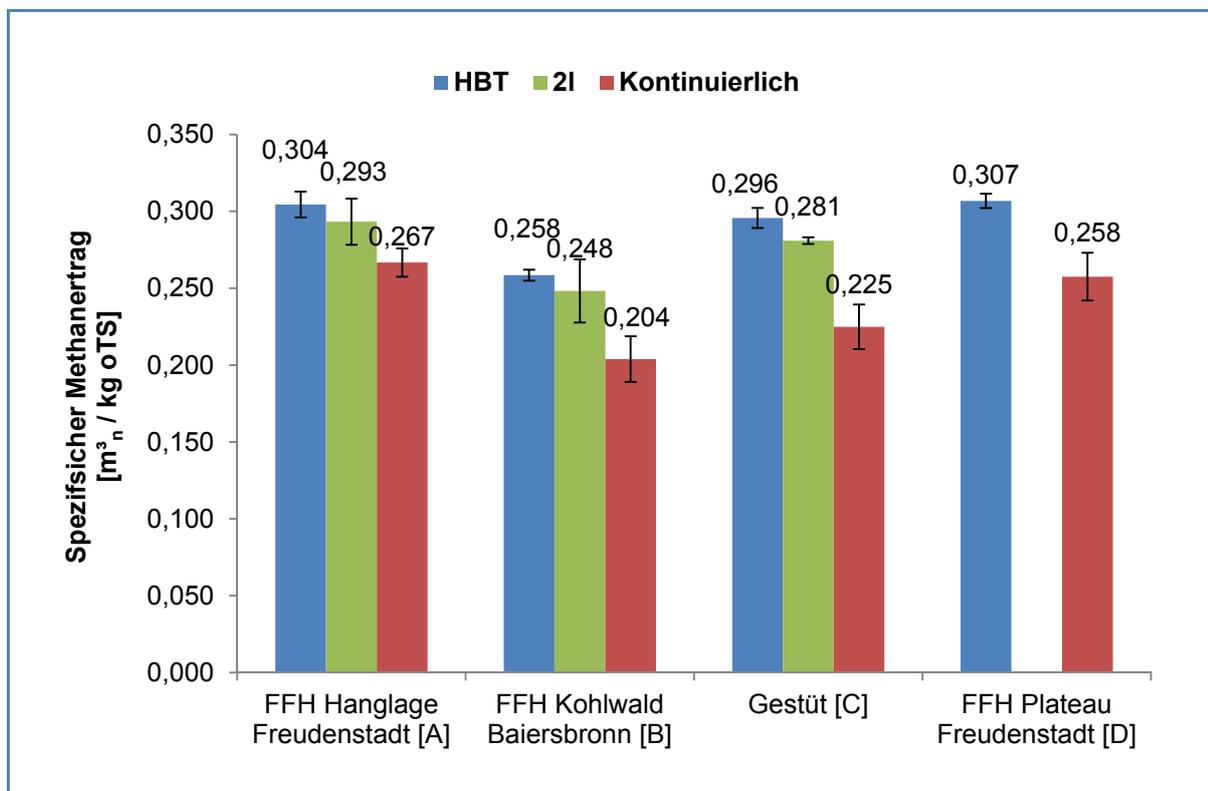


Abbildung 5.8: Vergleich der spezifischen Methanerträge von 4 Landschaftspflegematerial-Chargen nach 3 Biogas-Bestimmungsverfahren (HBT, 2 l-Batch, kontinuierlich)

5.1.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

In den Untersuchungen nach dem Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) konnten bei den grasreichen Landschaftspflegematerialien spezifische Methanerträge zwischen 0,225 und 0,307 m³ CH₄/kg oTS beobachtet werden. In der Literatur werden für Grassilagen Methanerträge zwischen 0,300 und 0,340 m³ CH₄/kg oTS angegeben. Jedoch handelt es sich bei den in diesem Projekt untersuchten Materialien um lignin- und rohfaserreiche Substrate von Grünlandflächen mit einer geringen Nutzungsintensität. Ein geringerer Methanertrag als bei herkömmlichen Grassilagen war dementsprechend zu erwarten. Trotzdem zeigten die Materialien eine gute Abbaubarkeit in den Batchversuchen.

Im Vergleich der Biogas- und Methanausbeuten der Materialien mit den Ergebnissen von Lemmer (2005) sind die erzielten spezifischen Methanerträge als hoch einzuschätzen. Lemmer (2005) untersuchte ebenfalls die Methanerträge von verschiedenen Grünschnitten, unter welchen auch Mähgut von extensiv bewirtschaftetem Grünland und Naturschutzgebieten waren. Hier ergaben sich Methanerträge von 0,220 m³ CH₄/kg oTS bei extensivem Grünland und von 0,080 m³ CH₄/kg oTS bei Material aus Naturschutzgebieten. Bei den von Lemmer (2005) betrachteten Substraten fand der erste Schnitt des Materials jedoch später statt – das extensive Grünland wurde am 28.07.1999 und das Mähgut aus dem Naturschutzgebiet erst am 15.09.1999 geerntet. Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Substrate wurden bedeutend früher gemäht, mit Ernteterminen Anfang Juli 2013. Im Vergleich zu den Grünschnitten von Lemmer (2005) waren diese Schnitte somit jünger und energiereicher, was den relativ hohen Biogas- und Methanertrag erklären könnte. Des Weiteren waren Entwicklung und Wachstum der Vegetation in Deutschland im Jahr 2013 deutlich verzögert. Nach einem langanhaltenden Winter waren Frühjahr und Frühsommer 2013 sonnenscheinarm und sehr nass (BMELV, 2013a). Während die 200 °C-Marke der Temperatursumme für Grünland, die für den Vegetationsbeginn steht, im April 2013 nur vereinzelt erreicht war, war sie 2012 bereits schon nahezu deutschlandweit überschritten. Ab Mai 2013 setzten sehr starke Niederschläge ein, welche 163 % des langjährigen Mittels entsprachen. Dadurch war die Pflanzenentwicklung im Vergleich zum Vorjahr stark im Rückstand (DWD, 2013). Erst der Juli brachte eine deutliche Wetterbesserung und den lang erwarteten Sommer mit einer um 34 % höheren Sonnenscheindauer als das langjährige Mittel. Der Erntebeginn lag somit im Jahr 2013 je nach Region zehn bis vierzehn Tage später (BMELV, 2013a). Aufgrund dieser Witterungsverhältnisse im Jahr 2013 war die Pflanzenentwicklung im Frühjahr folglich verzögert. Somit sind die recht hohen Biogas- und Methanausbeuten der in dieser Arbeit betrachteten Landschaftspflegematerialien möglicherweise durch ein früheres Wachstumsstadium mit geringerem Lignifizierungsgrad zu erklären. Aufgrund der zeitlichen Gestaltung dieses Forschungsprojektes, war es jedoch nicht möglich, noch in nachfolgenden Jahren Ernten und entsprechende Analysen durchzuführen.

Sehr deutlich war die höhere Nutzungsintensität insbesondere bei den Grünschnitten vom Golf- und Sportplatz erkennbar. Diese Grünflächen werden sehr häufig geschnitten und auch deutlich intensiver gedüngt, wodurch die hierbei anfallenden Substrate nur geringe Ligningehalte aufwiesen. Bei diesen Proben waren die Methanerträge auf einem ähnlichen Niveau wie bei herkömmlichen Grassilagen; ferner lag ein hoher Methananteil im Biogas vor.

Beim Stroh-Strauch-Schnitt und beim Heckenschnitt konnten spezifische Methanerträge zwischen 0,152 und 0,173 m³ CH₄/kg oTS nachgewiesen werden. Aufgrund der Zusammenset-

zung und Beschaffenheit dieser Materialien erscheint eine Nutzung im Biogasprozess extrem schwierig.

Die Ergebnisse aus dem kontinuierlichen Biogasprozess zeigen eine prinzipiell gute Verwertbarkeit der untersuchten Landschaftspflegematerialien. Um in den hierbei zum Einsatz kommenden relativ kleinen Laborfermentern (Gärvolumen von 17 Litern) eine störungsfreie Versuchsdurchführung zu gewährleisten, war es jedoch notwendig, die Materialien mit einer weiteren Vorzerkleinerung zu konditionieren. Während des Versuches selbst konnten keine Hinweise auf biologische Prozessstörungen bzw. -hemmungen beobachtet werden. Beim Verfahrensvergleich fallen die deutlich geringeren Methanerträge beim kontinuierlichen Biogasprozess gegenüber den Batchuntersuchungen auf. Als Ursache kommt hier die für einen kontinuierlichen Fermenterbetrieb relativ kurze Verweilzeit von 35 Tagen in Betracht. Im Gegensatz zum Batchversuch, in dem optimale Abbaubedingungen in der Regel für eine vollständige Substratumsetzung sorgen, wird im kontinuierlichen Fermenterbetrieb von diesen optimalen Bedingungen abgewichen. Längere Verweilzeiten sind daher für eine ausreichende Substratausnutzung und hohe Methanerträge unumgänglich.

5.2 Aufbereitung im Querstromzerspanner

5.2.1 Material und Methoden

Die mechanische Aufbereitung des Landschaftspflegematerials wurde mit dem an der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof installierten Querstromzerspanner (Bio-QZ) durchgeführt. Der Bio-QZ (vgl. Abbildung 5.9) besteht im Wesentlichen aus einem zylinderförmigen Aufschlussbehälter, den Schleuder- bzw. Schlagwerkzeugen und einem Elektromotor, der diese antreibt. Die Schlagwerkzeuge (i.d.R. Stahlketten) sind über eine Nabe mittig am Boden des Aufschlussbehälters befestigt. Im Betriebszustand rotieren die Ketten bei einer Drehzahl von 1200 U/min und verleihen dem aufzuschließenden Material einen Stoßimpuls, welcher es in Richtung Behälterwand befördert. Durch das dortige Auftreffen und den Impulsen des nachfolgenden Gutstroms bewegt sich das Material in einer spiralförmigen Vertikalbewegung in Rotorlaufrichtung. Am Scheitelpunkt fällt das Material wieder senkrecht auf die Schlagwerkzeuge. Die Krafteinwirkung der Stahlketten, das Auftreffen des Materials auf die Behälterwand und die Reibwirkung innerhalb des Materials führen zum Aufschluss bzw. zur Zerkleinerung des aufzubereitenden Gutes. Dieser Effekt kann durch Vorsprünge und Umlenkeinrichtungen an der Behälterwand verstärkt werden.

Die Dimensionierung der einzelnen Bauteile des Bio-QZs richtet sich nach dem Einsatzgebiet und der Durchsatzleistung. Folgende Parameter bestimmen dabei den Aufschlussgrad sowie Form und Stückgröße des Endprodukts:

- Eigenschaften des Ausgangsmaterials
- Rotordrehzahl
- Anzahl der Kettenglieder
- Auskleidung des zylinderförmigen Aufschlussbehälters
- Verweildauer des Materials im Aufschlussbehälter
- Betriebsart des Bio-QZs (Batch- oder Durchlaufbetrieb)

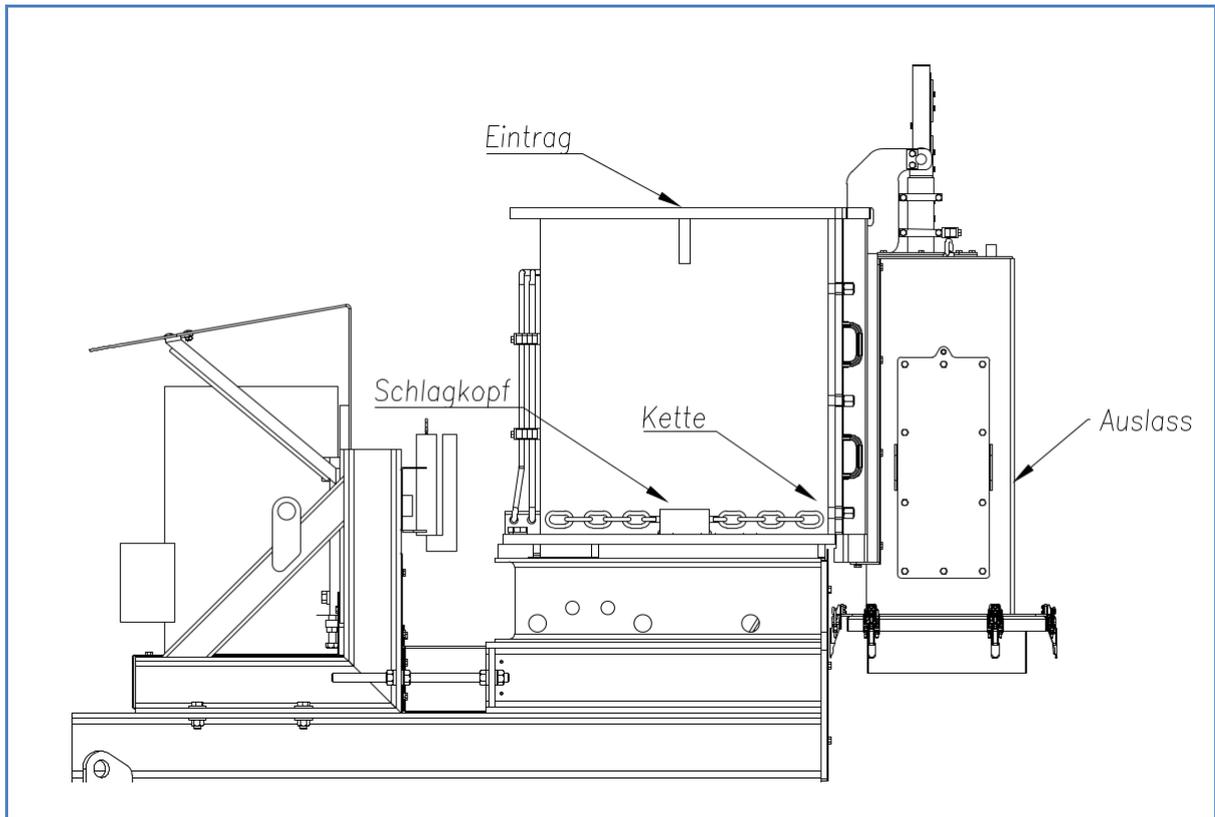


Abbildung 5.9: Schematische Darstellung des Querstromzerspaners (Bio-QZ)

Für die Aufbereitung von Biomasse kann der Bio-QZ grundsätzlich in zwei unterschiedlichen Konfigurationen betrieben werden. Beim Batchbetrieb wird das Material portionsweise bis zum Erreichen einer vom Anwender wählbaren Stromaufnahme befüllt. Darauf folgt das Zerkleinerungsintervall. Hierbei ist die Verweilzeit substratspezifisch festzulegen. Im Anschluss an das Zerkleinerungsintervall öffnet sich der Auslassschieber des Bio-QZ und das Material wird aus dem Arbeitsraum herausgeschleudert. Im Durchlaufbetrieb ist der Auslassschieber über den gesamten Betriebszeitraum einen Spalt weit geöffnet. Die Breite des Spaltes ist vom Anwender manuell einstellbar. Durch diesen Spalt wird das zerkleinerte Material kontinuierlich aus dem Prallreaktor ausgetragen. Die Beschickung des Bio-QZ in dieser Betriebsweise erfolgt ebenfalls kontinuierlich und wird über eine frequenzgesteuerte Zuführschnecke gewährleistet. Durch die Steuerung der zugeführten Menge kann der Bio-QZ bei einer definierten Stromaufnahme betrieben werden.

In diesem Projekt wurde das zu zerkleinernde Substrat kontinuierlich in den Bio-QZ eingebracht. Sobald die Stromaufnahme des Bio-QZ von 65 A erreicht war, wurde die weitere Zugabe gestoppt und es schloss sich die eigentliche Zerkleinerungszeit an. Die Verweildauer bzw. Zerkleinerungszeit im Bio-QZ wurde auf 15 s festgesetzt, da diese bei anderen getesteten Substraten (z.B. Pferdemit) einen optimalen Zerkleinerungsgrad ergab. Der Querstromzerspaner arbeitete hier folglich im Batchbetrieb.

5.2.2 Bestimmung der Effekte der mechanischen Aufbereitung

Die zur Bestimmung der Effekte der mechanischen Aufbereitung verwendeten Chargen an Landschaftspflegematerial sind in Tabelle 5.2 (S. 52) zusammengestellt.

In Tabelle 5.6 sind die ermittelten Chargengewichte, die dazugehörigen Ballenzahlen und Ernteflächen der verwendeten Landschaftspflegematerialien dargestellt, sowie die daraus errechneten Hektarerträge.

Tabelle 5.6: Geerntete Flächen, Ballenzahlen, Chargengewichte und Hektarerträge

Charge (Substrat-Nr.)	Erntefläche [ha]	Ballenzahl	Chargengewicht [kg FM]	Hektarertrag	
				[kg FM/ha]	[kg oTS/ha]
A (1)	1,24	12	4.632	3.736	2.608
B (5)	0,41	5	2.490	6.073	2.460
C (6)	0,4	4	2.408	6.020	2.253

Anhand der Ergebnisse ist ersichtlich, dass die Chargen B und C mit Hektarerträgen von 6.073 und 6.020 kg FM/ha ähnliche Flächenleistungen aufwiesen. Charge A, das Material, das von der Hanglage in Freudenstadt stammt und stark krautig geprägt ist, lag mit 3.736 kg FM/ha deutlich niedriger. Bezüglich des oTS-Ertrags je ha lag Charge A mit 2.608 kg oTS/ha im Vergleich zu den Chargen B und C etwas höher.

Stromverbrauch der Aufbereitung

In Tabelle 5.7 sind die Dauer der Aufbereitung, der Durchsatz und der Energieverbrauch der Chargen bei der Aufbereitung mit dem Bio-QZ dargestellt.

Tabelle 5.7: Dauer der Aufbereitung, Durchsatz, Gesamt- und spezifischer Energieverbrauch der QZ-Chargen

Charge (Substrat-Nr.)	Dauer [h]	Durchsatz [t/h]		Energieverbrauch		
		FM	oTS	[kWh _{el}]	[kWh _{el} /t FM]	[kWh _{el} /t oTS]
A QZ (1)	2,333	0,662	0,462	18	27,2	38,9
B QZ (5)	3,167	2,247	0,910	50	22,3	54,9
C QZ (6)	2,667	2,188	0,819	47	21,5	57,4

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Charge C mit 57,4 kWh_{el}/t oTS den höchsten Energieverbrauch aufwies. Die Charge A hatte mit 38,9 kWh_{el}/t oTS den geringsten Energieverbrauch bei der Aufbereitung. Mit 54,9 kWh_{el}/t oTS lag der Energieaufwand von Charge B zwischen den anderen Chargen.

Auswirkung der Querstromzerspannung auf die Substratbeschaffenheit und Substratzusammensetzung

In Abbildung 5.10 ist das Landschaftspflegematerial vor und nach der mechanischen Aufbereitung abgebildet. Es ist erkennbar, dass die Charge B die größte Struktur aufwies. Charge C war etwas feiner strukturiert als Charge B. Charge A stellte das trockenste Substrat dar.

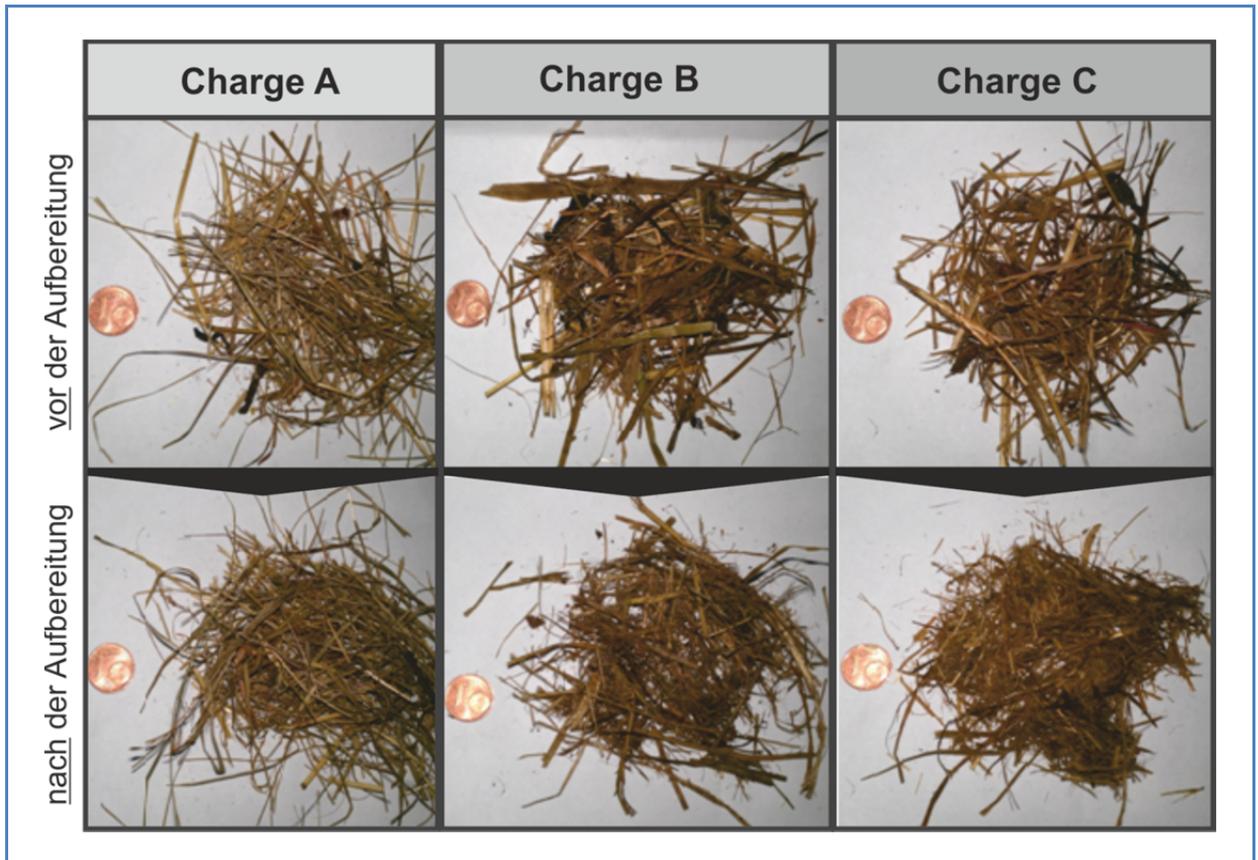


Abbildung 5.10: Beschaffenheit des Landschaftspflegematerials vor (oben) und nach (unten) der Querstromzersetzung

Bei der Betrachtung der aufbereiteten Substrate im unteren Teil der Abbildung fallen die unterschiedlichen Effekte der mechanischen Aufbereitung auf. Bei der Variante A waren nahezu keine Veränderungen der Materialstruktur erkennbar.

In Tabelle 5.8 sind die Ergebnisse der Inhaltsstoffanalysen der Chargen vor und nach der mechanischen Aufbereitung zusammengestellt.

Tabelle 5.8: Inhaltsstoffe der untersuchten Chargen (ohne und mit QZ) zur Beurteilung der Silagequalität

Charge/ Variante (Substrat- Nr.)	pH	Essig- säure	Butter- säure	Roh- protein	Roh- fett	Roh- faser	Zucker	NDF	ADF	ADL	
		[g / kg oTS]									
A	(1)	5,7	0	0	93,9	25,4	299,4	120,4	650,8	363,5	51,9
A QZ	(1)	5,6	1,0	0,5	92,8	25,1	299,2	126,6	650,7	353,7	48,0
B	(5)	4,7	13,7	3,4	92,8	22,6	327,1	65,6	697,2	450,5	86,0
B QZ	(5)	4,9	20,9	5,0	93,9	19,5	336,8	64,1	697,6	441,0	75,6
C	(6)	5,0	11,4	19,6	91,0	30,7	370,9	46,6	690,5	445,9	70,5
C QZ	(6)	5,0	10,1	15,6	90,3	25,1	371,4	49,1	686,9	444,6	68,6

NDF: Neutral-Detergenz-Faser (neutral detergent fiber); ist die Summe der Gerüstsubstanzen

ADF: Säure-Detergenz-Faser (acid detergent fiber); stellt einen Anteil der NDF dar und zwar ohne Hemizellulosen

ADL: Säure-Detergenz-Lignin (acid detergent lignin); umfasst per Definition vor allem das Lignin und ist Anteil des ADF

Biogas- und Methanerträge

Die im 2 Liter-Batchverfahren ermittelten spezifischen Methanerträge der für die Aufbereitungsversuche verwendeten Materialien sind in Abbildung 5.11 dargestellt.

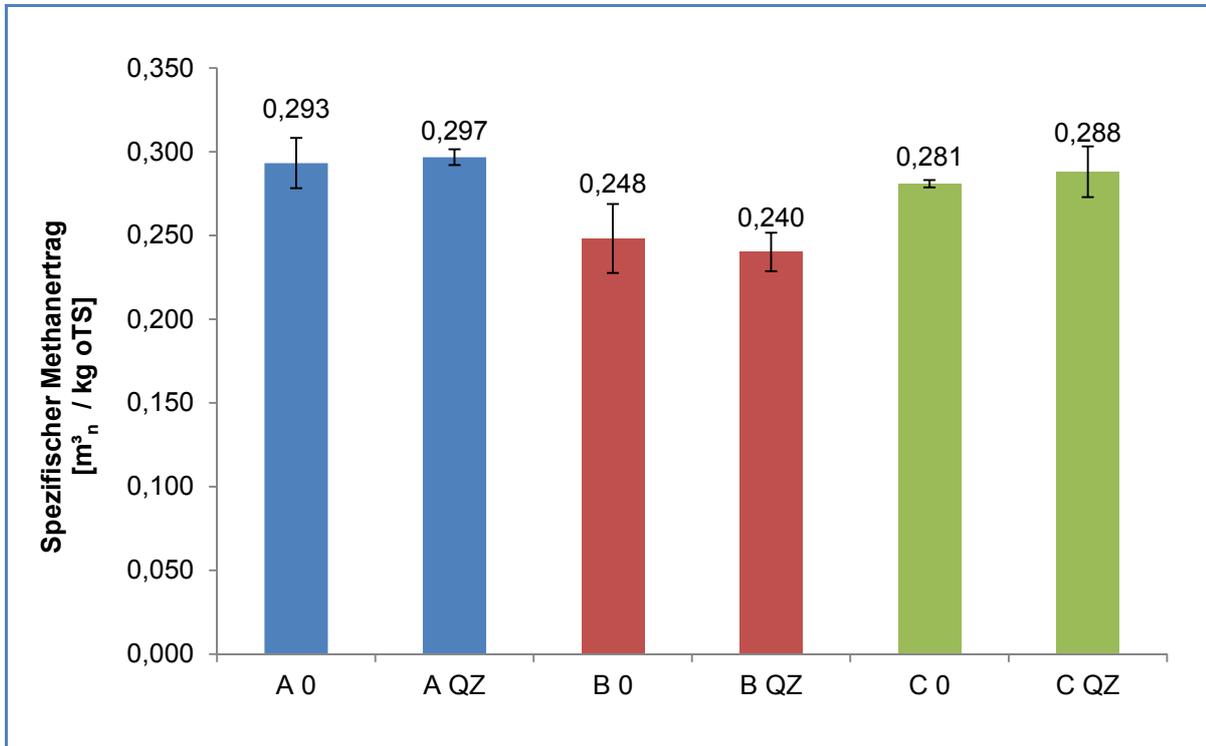


Abbildung 5.11: Spezifische Methanerträge (2-Liter Batch-Fermenter) der untersuchten Chargen ohne und mit Querstromzerspannung (QZ)

Die spezifischen Methanerträge der untersuchten Landschaftspflegematerialien variieren zwischen 0,240 und 0,297 m³_nCH₄/kg oTS. Eine signifikante Steigerung der Abbaubarkeit bzw. der spezifischen Methanerträge durch die Querstromzerspannung konnte nicht beobachtet werden. Durch Zusammenführung der vorherigen Ergebnisse (Tabelle 5.6, S. 62 und Abbildung 5.11, S. 64) wurden die Gas- und Methanerträge der einzelnen Varianten je Hektar bestimmt. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 5.9 dargestellt.

Tabelle 5.9: Biogas- und Methanerträge je ha Erntefläche

Charge/Variante	Substrat-Nr.	Biogasertrag	Methanertrag
		[m ³ _n /ha]	[m ³ _n /ha]
A (1)	(1)	1.455	764
A QZ	(1)	1.432	775
B	(5)	1.174	610
B QZ	(5)	1.216	590
C	(6)	1.050	633
C QZ	(6)	1.125	648

Bei Betrachtung der Gaserträge je ha ist zu erkennen, dass die Charge A mit ca. 770 m³_n Methan pro ha die höchsten flächenbezogenen Methanerträge lieferte. Bei der Charge C lag der durchschnittliche Methanertrag bei 641 m³_n CH₄ pro ha. Den niedrigsten flächenbezogenen Methanertrag zeigte die Charge B (600 m³_n CH₄/ha).

5.2.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Hektarerträge der drei Chargen (A, B, C) liegen zwischen 37,4 und 60,7 dt FM/ha und zeigen eine sehr große Spannweite. Das BMELV (2013b) gibt in seinem Datenblatt „Anbau, Ertrag und Ernte der Feldfrüchte“ einen durchschnittlichen Hektarertrag auf Wiesen und Weiden von 78,0-129,5 dt TM/ha und Jahr an. Hartmann et al. (2011) schätzen bei sehr extensiver Nutzung einen Trockenmasseertrag von 25-40 dt TM/ha, die drei betrachteten Chargen liegen mit Trockenmasseerträgen von 24,4-27,8 dt TM/ha somit im Bereich dieser Schätzung. Bei diesen Vergleichen ist jedoch zu berücksichtigen, dass nur ein Erntetermin ausgewertet und nachfolgende Aufwüchse nicht berücksichtigt wurden. Außerdem können durch variierende Witterungsverhältnisse erhebliche Ertragsschwankungen zwischen den Jahren auftreten. Die flächenbezogenen Methanerträge der untersuchten Landschaftspflegematerialien variieren zwischen 580-775 m³_n CH₄/ha und liegen damit deutlich unterhalb der Methanhektarerträge von intensiv bewirtschafteten Grünlandaufwüchsen, welche von Prochnow et al. (2007) mit durchschnittlich 3.000-4.000 m³_n CH₄/ha angegeben wurden. Nach Thumm (2011) ist jedoch bei extensiv genutzten Grünlandflächen mit einem durchschnittlichen Methanertrag pro Hektar von weniger als 1.000 m³_n CH₄ zu rechnen. Dies bestätigt somit die Ergebnisse aus diesem Projekt.

Aufgrund der gegenüber herkömmlichen Grassilagen späteren Schnittzeitpunkte der Landschaftspflegematerialien und der hohen Temperaturen während der Ernte hatten die untersuchten Substrate sehr hohe TS-Gehalte und waren zum Teil vergleichbar mit Heu. Aufgrund ihres niedrigen spezifischen Gewichtes und hohen Strukturanteils an trockenen Fasern ist bei der Biogasproduktion im Bereich der Eintragstechnik mit erheblichen Problemen zu rechnen. Die Förderleistung des Feststoffdosierers und der Eintragsschnecken wird hierdurch erheblich reduziert.

Bei der optischen Begutachtung der Landschaftspflegematerialien vor und nach der Querstromzerspannung im Bio-QZ sind nur geringe Unterschiede bei den Proben feststellbar. Auch bei der Betrachtung des Einflusses der Querstromzerspannung auf den spezifischen Methanertrag konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den unaufbereiteten und aufbereiteten Varianten festgestellt werden. Wie sich zeigte, finden bei der mechanischen Aufbereitung im Bio-QZ keine ausreichenden Materialkollisionen und damit keine ausreichende Aufbereitungsleistung statt. Um diese zu erreichen, empfiehlt sich bei solchen Materialien daher eine Vermischung mit feuchteren Komponenten oder die Verwendung einer anderen Aufbereitungstechnologie (z.B. Extruder).

Aufgrund des hohen Strukturanteils der Landschaftspflegematerialien ist eine mechanische Aufbereitung zwingend erforderlich, um verfahrenstechnische Probleme, wie z.B. Schwimmschichten, zu vermeiden. Damit einhergehend kann durch die mechanische Aufbereitung die Umsetzung dieser Substrate im Biogasprozess verbessert und die Methanerträge erhöht werden. Unter den geschilderten Rahmenbedingungen konnte dies mit der Querstromzerspannung jedoch nicht realisiert werden.

6 FAZIT UND AUSBLICK

Die in dieser Studie dargelegten Schlussfolgerungen zu den techno-ökonomischen und verfahrenstechnischen Analysen lassen sich abschließend im Sinne eines Fazits und Ausblicks wie folgt zusammenfassen:

Die techno-ökonomischen Analysen zeigen, dass die Kosten für die Bereitstellung von Landschaftspflegegras frei Biogasanlage doch merklich über den Kosten von Mais-, GPS- und Grassilage liegen. Dies liegt vor allem an der eher schlechten Auslastung der hierbei eingesetzten Technologien (einschließlich Arbeitskräfte). Es ist nicht zu erwarten, dass dieser Kostennachteil durch technologische und strukturelle Anpassungen in absehbarer Zeit kompensiert werden kann. In diesem Zusammenhang zeigten die Analysen, dass die Bereitstellung von Grassilagen über Wickelballen – mit Blick auf die Bereitstellungskosten frei Biogasanlage – eine interessante Alternative zur klassischen Bereitstellung des Grasschnitts mit dem Ladewagen und dessen anschließender Silierung im Fahrsilo sein kann.

Die Untersuchungen zur mechanischen Aufarbeitung des lignozellulosereichen Landschaftspflegematerials mit einem Querstromzerspaner machen deutlich, dass hier weitergehender Forschungsbedarf besteht, um eine konkurrenzfähige Biogasausbeute erhalten zu können. Das Augenmerk sollte hierbei keinesfalls nur auf mechanische sondern insbesondere auch auf biologische und chemische Aufschlussverfahren gelegt werden. Von diesen Optimierungsmaßnahmen könnten auch die herkömmlichen Biogas-Substrate Nutzen ziehen.

Die techno-ökonomischen Analysen zur Verwendung von Landschaftspflegegras-Silage als Biogas-Substrat verdeutlichen, dass zusätzliche Fördermaßnahmen nötig sind, um diesem Substrat eine tragfähige ökonomische Perspektive zu eröffnen. Nach den aktuell gültigen Regelungen des EEG ist eine spezifische Förderung nicht mehr möglich. Folglich müssen alternative Förderungen angeboten werden, um die bestehenden Wettbewerbsnachteile bei der Nutzung von Landschaftspflegematerial in Biogasanlagen auszugleichen.

Um darüber hinaus die Wettbewerbsfähigkeit der Verwendung von lignozellulosereichem Landschaftspflegematerial in Biogasanlagen steigern zu können, ist die Erhöhung des Abbaugrades der oTS und somit der spezifischen Methanausbeute sicherlich mit eines der wichtigsten Optimierungsziele. Neben den bereits erwähnten kostengünstigen Aufschlussverfahren sind insbesondere aber auch die Realisierung zweiphasiger Verfahrenskonzepte in Biogasanlagen zentrale Ansätze, um die Raum-Zeit-Ausbeuten des Methanertrags und somit die Wettbewerbsfähigkeit der Biogasgewinnung aus lignozellulosereichem Substrat zu verbessern.

Zusammenfassend betrachtet, könnten die oben angeführten Maßnahmen die politisch gewünschte Verbreiterung der Palette an möglichen Biogas-Substraten deutlich voranbringen.

Neben der Verwendung von Landschaftspflegematerialien zur Biogasproduktion müssen prinzipiell in diesem Zusammenhang auch alternative Nutzungsverfahren – von der Nutzung als Einstreu bis hin zur direkten thermischen Nutzung (Verbrennung, Vergasung) als Energieträger – in die Überlegungen mit einbezogen werden. Oft entscheiden hier dann die regionalen Gegebenheiten, welche Nutzungsart aus techno-ökonomischen aber auch aus Umweltgesichtspunkten zu bevorzugen ist. Hierzu gehört zuvor letztendlich auch immer die Beantwortung der Frage, ob tatsächlich aus landschaftspflegerischen Gesichtspunkten die

Notwendigkeit besteht, das anfallende Landschaftspflegematerial von der Fläche wegzufahren. Das Belassen auf der Fläche stellt immer mit die kostengünstigste Alternative dar.

Abschließend ist anzumerken, dass der Kenntnisstand zum regional hoch aufgelösten Aufkommen an Landschaftspflegematerial in Baden-Württemberg derzeit noch sehr ungenügend ist. Zur belastbaren Einordnung, welches Aufkommenspotenzial den verschiedenen Landschaftspflegematerialien zugeordnet werden kann und welche Bereitstellungskosten damit einhergehen, sind jedoch solche Analysen unumgänglich und deshalb überfällig.

Literaturverzeichnis

- Agbor, V. B., N. Cicek, R. Sparling, A. Berlin and D. B. Levin, 2011: Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. *Biotechnology Advances* 29(6), 675-685
- Amon, T., V. Kryvoruchko, B. Amon, V. Bodiroza, W. Zollitsch, J. Boxberger und E. Pötsch, 2005: Biogaserzeugung aus Grünlandbiomasse im Alpenraum. *Landtechnik* 60 (6), 336-337
- Baserga, U., 1998: Vergärung von Extensograss-Silage in einer Feststoff-Pilotanlage und einer landwirtschaftlichen Co-Vergärungs-Biogasanlage, Schlussbericht, Bundesamt für Energie, 26 S.
- Bauer, A., C. Leonhartsberger, P. Bösch, B. Amon, A. Friedl and T. Amon, 2010: Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of energy potential from sustainable crop rotation systems in EU-27. *Clean Technologies and Environmental Policy* 12, 153-161
- Bekker, M., 2007: Charakterisierung der anaeroben Abbaubarkeit von spezifischen organischen Stoffen. Dissertation Universität Karlsruhe. Verlag Siedlungswasserwirtschaft, Schriftenreihe SWW, Band 125, Karlsruhe, 134 S.
- BiomasseV, 2012: Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse, Anlage 2 (Biomasseverordnung – BiomasseV) vom 21. Juni 2001, in der Fassung vom 24. Februar 2012, BGBl I, S. 212
- BMELV, 2013a: Ernte 2013: Mengen und Preise. Online: www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Markt-Statistik/Ernte2013MengenPreise.pdf%3F__blob=publicationFile; zuletzt besucht: 05.11.2014
- BMELV, 2013b: Anbau, Ertrag und Ernte der Feldfrüchte. Online: <http://berichte.bmelv-statistik.de/SJT-3072200-0000.pdf>; zuletzt besucht: 05.11.2014
- Brückner, C., und T. Sawatzki, 2011: Effizienzsteigerung in Biogasanlagen. *Schriftenreihe des LFULG*, Heft 35, 43 S.
- Brulé, M., A. Lemmer, H. Oechsner, T. Jungbluth and U. Schimpf, 2008: Effect of adding fibrolitic enzymes to the methane yields of rye silage. *Landtechnik* 63(3), 178-179
- Brulé, M., 2014: The effect of enzyme additives on the anaerobic digestion of energy crops. Dissertation Fakultät Agrarwissenschaften, Universität Hohenheim. Online: <http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2014/1030/>
- BUND Ravensburg, 2014: Regionalstrom. Online: http://www.bund-ravensburg.de/themen_projekte/-regionalstrom/; zuletzt besucht: 06.08.2014
- BUND und Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg, 2009: Ermittlung des Potenzials energetisch nutzbarer Resthölzer aus der Landschaftspflege im PLENUM- und Biosphärengebiet Schwäbische Alb. Abschlussbericht, Rottenburg, 47 S.
- Butler, G. W., and R. W. Bailey, 1973: *Chemistry and biochemistry of herbage*. Volume 3, Academic Press, London, 295 S.
- Daniel-Gromke, J., V. Denysenko, P. Sauter, K. Naumann, M. Scheftelowitz, A. Krautz, M. Beil, W. Beyrich, W. Peters, S. Schicketanz, C. Schultze, P. Deumelandt und F. Reinicke, 2014: Stromerzeugung aus Biomasse. 03MAP250 - Zwischenbericht. Deutsches Biomasseforschungszentrum, Leipzig, 153 S. Online: https://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/Referenzen/Berichte/biomassemonitoring_zwischenbericht_bf.pdf; zuletzt besucht: 14.11.2014
- Döhler, H., H. Eckel, N. Fröba, S. Grebe, S. Hartmann, U. Häußermann, S. Klages, N. Sauer, S. Nakazi, A. Nußbaum, U. Roth, B. Wirth und S. Wulf, 2007: *Faustzahlen Biogas*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow, 181 S.
- DWD (Deutscher Wetterdienst), 2013: Deutscher Wetterdienst zum Agrarwetter im Frühling 2013. Pressemitteilung vom 07.06.2013, Offenbach
- Eder, B., und H. Schulz, 2012: *Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit, Umwelt*. 5. überarbeitete Auflage, Ökobuch-Verlag, Staufen bei Freiburg, 237 S.
- EEG, 2008: Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften, vom 25. Oktober 2008. BGBl I (49), 2074-2100

- EEG, 2011: Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, vom 28. Juli 2011. BGBl I (42), 1634-1678
- EEG, 2014: Gesetz zur grundlegenden Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und zur Änderung weiterer Bestimmungen des Energiewirtschaftsrechts, vom 21. Juli 2014. BGBl I (33), 1066-1132
- Eltrop, L., M. Stenull, L. Leible, S. Kälber, G. Kappler, J. Lansche, J. Müller, N. Poboss, M. Zieba, B. Stürmer, T. Kelm und W. Köppel, 2013: Systemanalyse zur "Erzeugung und Nutzung biogener Gase in Baden-Württemberg". Schlussbericht – Teil I: Kurzfassung und Empfehlungen – Teil II: Langfassung/Materialband. Stuttgart: Bioenergieforschungsplattform Baden-Württemberg 2013. Online: <http://www.itas.kit.edu/pub/v/2013/leua13a.pdf>; zuletzt besucht: 24.04.2014
- Fabricius, C., B. Frieß, U. Miller und F. Pöter, 2011: Land- und Forstwirtschaftliche Biomasse und Naturschutz in Baden-Württemberg. Hintergrundpapier, BUND Landesverband Baden-Württemberg e.V., Stuttgart, 44 S. Online: http://www.bund-neckar-alb.de/fileadmin/rv_neckar-alb/PDF_Ordner/BUND%20BaW%C3%BC%20Biomasse%20und%20Naturschutz%20Hintergrundpapier.pdf; zuletzt besucht: 14.11.2014
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2010: Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. 5. überarbeitete Auflage, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow, 274 S.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2014: Anbau nachwachsender Rohstoffe steigt leicht. Pressemitteilung vom 28.10.2014, Gülzow. Online: http://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/aktuelle-mitteilungen/aktuelle-nachricht/archive/2014/october/article/anbau-nachwachsender-rohstoffe-steigt-2014-leicht/?tx_ttnews%5Bday%5D=28&cHash=e7e3c2d5f84ea74cbc7ca9cacde5f59f
- Fachverband Biogas e.V., 2014: Branchenzahlenprognose für die Jahre 2014 und 2015. Entwicklung der Anzahl Biogasanlagen und der gesamten installierten elektrischen Leistung in Megawatt (Stand: 11/2014). Online: [http://biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchen-zahlen/\\$file/14-11-25_Biogas%20Branchenzahlen_Prognose_2014-2015.pdf](http://biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchen-zahlen/$file/14-11-25_Biogas%20Branchenzahlen_Prognose_2014-2015.pdf)
- Genesys Biogas AG, 2008: Referenzen der Genesys Biogas AG – Weltweit – 1996 bis 2008 – Biogasanlagen in der Schweiz, 1-10
- Genesys Biogas AG, 2011: Biogasausbeute von Hofdüngern und Co-Substraten, Merkblatt M101, 1-3
- Gruber, E., 2011: Grundlagen der Zellstofftechnologie. Vorlesungsskriptum zum Lehrgang "Papier-technik", Duale Hochschule Karlsruhe, 9 S. Online: <http://www.gruberscript.net/08Polyosen.pdf>; zuletzt besucht: 13.11.2014
- Haeffner, B., C. Nied, J. Voigt und K. Sommer, 2010: Verweilzeitverkürzung bei der Biogasentstehung durch Zerkleinerung von lignocellulosehaltigen Substraten. Chemie Ingenieur Technik 82(8), 1261-1264
- Härdtlein, M., L. Eltrop und D. Thrän (Hrsg.), 2004: Voraussetzungen zur Standardisierung biogener Festbrennstoffe. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 23. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 678 S.
- Härdtlein, M., und L. Eltrop, 2013: Schwachstellen-Identifikation und Optimierungspotenziale von Biogasanlagen in Baden-Württemberg. Eine technisch-ökonomische Analyse auf der Basis einer Befragung von Biogasanlagenbetreibern. Endbericht, Oktober 2013, 92 S. Online: http://www.bioenergieforschungsplattform-bw.de/pb/site/pbs-bw/get/params_Dattachment/1681782/Biogasanlagenmonitoring%202012_Langfassung.pdf; zuletzt besucht: 04.08.2014
- Hartmann, S., M. Diepolder und F. Lichti, 2011: Grünland als Biogassubstrat. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V., 12 S. Online: http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/leitfaden_2011-12_biogasforum.pdf; zuletzt besucht: 13.11.2014
- Heiermann, M., C. Idler, C. Herrmann und V. Scholz, 2009: Ermittlung des Einflusses der Pflanzenart und der Silierung auf Substratqualität und Biogasausbeute, Abschlussbericht Teilprojekt 4, Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., 83 S.
- Helffrich, D., 2005: Laborverfahren zur Bestimmung der Qualität und Quantität des beim anaeroben Abbau organischer Substanzen entstehenden Biogases im Batch Verfahren. German Patent DE 10227685 B4: In German
- Helffrich, D., and H. Oechsner, 2003: The Hohenheim biogas yield test – Comparison of different laboratory techniques for the digestion of biomass. Landtechnik 58(3), 148-149

- Hensgen, F., L. Bühle, I. Donnison, K. Heinsoo and M. Wachendorf, 2014: Energetic conversion of European semi-natural grassland silages through the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass: Energy yields and the fate of organic compounds. *Bioresource Technology* 154, 192-200. Online: <http://daten.ktbl.de/dslkrpflanze/postHv.html;jsessionid=9E67FC89BBE417A7725BA98B939FF522>, zuletzt besucht: 30.04.2014
- Kaltschmitt, M., H. Hartmann und H. Hofbauer, 2009: *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1030 S.
- Kern, M., H. Funda, H. Hofmann und H.-J. Siepenkothen, 2009: Biomassepotenzial von Bio- und Grünabfällen sowie Landschaftspflegematerialien. In: Kern, M., T. Raussen und E. Apel (Hrsg.): *Energetische und stoffliche Verwertung von Abfallbiomasse*, 3. Biomasseforum, 24. -25. November 2009, Witzenhausen, 171-190. Online: http://www.witzenhausen-institut.de/downloads/biomasseforum_2009_kern.pdf; zuletzt besucht: 13.11.2014
- Koch, K., M. Wichern, M. Lübken and H. Horn, 2009: Mono fermentation of grass silage by means of loop reactors. *Bioresource Technology* 100, 5934-5940
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.), 2006: *Energiepflanzen. Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus*, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) /ATB, Darmstadt/Potsdam, 372 S.
- KTBL, 2009: *Betriebsplanung Landwirtschaft 2008/09. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft*, 21. Auflage, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt
- KTBL, 2013a: *Faustzahlen Biogas*, 3. Ausgabe. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL, Hrsg.), Darmstadt, 360 S.
- KTBL, 2013b: *Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven*. FNR/KTBL-Kongress vom 10. bis 11. September 2013 in Kassel. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL, Hrsg.), Darmstadt, 412 S.
- KTBL, 2014a: Online-Anwendung: Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. Online: <http://daten.ktbl.de/dslkrpflanze/postHv.html;jsessionid=F8EE80D42A0A373FACE34397E32EBBCC>
- KTBL, 2014b: *Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas*. Online: <http://daten.ktbl.de/biogas/startseite.do>; zuletzt besucht: 31.07.2014
- Kusch, S., und H. Oechsner, 2004: *Feststoffvergärung in Batchreaktoren – erste Versuchsergebnisse*. Universität Hohenheim (Hrsg.), Präsentation auf der 13. Jahrestagung „Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft“, 02. - 04. Dezember 2004, 1-10
- Lemmer, A., 2005: *Kofermentation von Grüngut in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. Dissertation Universität Hohenheim. Forschungsbericht Agrartechnik der VDI-MEG Nr. 435, Hohenheim, 158 S.
- Lemmer, A., und H. Oechsner, 2013: *Biogaserzeugung*. In: F. Graf und S. Bajohr (Hrsg.), *Biogas. Erzeugung, Aufbereitung, Einspeisung* (2. Auflage). Deutscher Industrieverlag GmbH, München, 83-132
- Lindorfer, J., H. Steinmüller, W. Auer, A. Jäger und A. Eder, 2010: *Untersuchung der Vorhydrolyse von Lignocelluloserohstoffen mittels Steam Explosion*. *Chemie Ingenieur Technik* 82(8), 1169-1176
- Linke, B., und G. R. Vollmer, 2002: *Kofermentation – Gemeinsame Vergärung von Gülle und pflanzlichen Biomassen in kontinuierlichen Laborversuchen*. *Biogas und Energielandwirtschaft – Potenzial, Nutzung, Grünes Gras, Ökologie und Ökonomie*, Bornimer Agrartechnische Berichte (ATB) 32 (2), 145 S.
- Loll, U., 2002: *Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung*. ATV-Handbuch, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 696 S.
- LUBW, 2013: *FFH-Gebiete*. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Online: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/44487/>; zuletzt besucht: 13.11.2014
- Maurer, M., und J.P. Winkler, 1982: *Biogas- Theoretische Grundlagen, Bau und Betrieb von Anlagen* (2. Auflage). C.F. Müller Verlag, Karlsruhe, 172 S.
- Meiland, M., 2011: *Cellulose-Modellverbindungen: Darstellung und Interaktionen mit Boronsäuren*. Dissertation Friedrich-Schiller-Universität, Thüringer Universitäts- und Landesbibliothek, Jena, 138 S.
- Melts, I., K. Heinsoo, L. Nurk and L. Pärn, 2013: Comparison of two different bioenergy production options from late harvested biomass of Estonian semi-natural grasslands. *Energy* 61, 6-12

- Menzel, N., und C. Thoss, 2012: Vom Landschaftspflegematerial zum Biogas. MULLE – Das Landschafts-Energie-Projekt. Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V. (DVL), 20 S. Online: http://www.lpv.de/uploads/tx_tproducts/datasheet/DVLBroschuere_MULLE_klein__ohne_Unterschrift_.pdf; zuletzt besucht: 19.11.2014
- Mönch-Tegeder, M., A. Lemmer, H. Oechsner and T. Jungbluth, 2013a: Investigation of the methane potential of horse manure. In: *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15 (2), pp. 161-172
- Mönch-Tegeder, M., A. Lemmer and H. Oechsner, 2013b: Enhancement of methane production with horse manure supplement and pretreatment in a full-scale biogas process. *Energy*, 73, pp. 523-530
- Mönch-Tegeder, M., 2014: Untersuchungen zur Verwertbarkeit von Pferdemist im Biogasprozess. Dissertation Fakultät Agrarwissenschaften, Universität Hohenheim. Online: <http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2014/987/>
- Nallathambi, G., 1997: Anaerobic digestion of biomass for methane production – a review. *Biomass & Bioenergy* 13, 95-98
- Nkemka, V., and M. Murto, 2013: Biogas production from wheat straw in batch and UASB reactors: The roles of pretreatment and seaweed hydrolysate as a co-substrate. *Bioresource Technology* 128, 164-172
- Oechsner, H. und M. Mönch-Tegeder, 2014: Mobilisierung ungenutzter Rohstoffpotenziale: Pferdemist und Landschaftspflegematerial als Biogas-Substrat. Präsentation auf der Tagung „Biogene Gase für die Energiewende in Baden-Württemberg: Möglichkeiten und Grenzen“, 20.02.2014, Geislingen an der Steige, 1-5
- Oechsner, H., und A. Lemmer, 2009: Wie lässt sich die Effizienz einer Biogasanlage steigern? 18. Jahrestagung des Fachverbands Biogas e.V., 3.-5. Februar 2006, Hannover, Tagungsband, 105-112
- Oechsner, H., und M. Mönch-Tegeder, 2012: Einsatz von Pferdemist als Gärsubstrat und dessen Aufarbeitung. Präsentation auf der 21. Jahrestagung „Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft“, 24./25. Oktober 2012, Offenburg. Online: <http://www.lfelbw.de/pb/site/lel/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lel/pdf/b/Biomasse%20zur%20energetischen%20Verwertung%20vom%20Gr%C3%BCnland%20-%20Thumm.pdf>; zuletzt besucht: 14.11.2014
- Ottow, J., und W. Bidlingsmaier, 1997: *Umweltbiotechnologie*. Auflage 1, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 357 S.
- Peters, J., 2004: Strukturuntersuchungen an Cellulose und Cellulosederivaten aus ionischen Lösemitteln. Dissertation Technische Universität Bergakademie, Freiberg, 124 S.
- PHYLLIS2, 2014: Phyllis2, database for biomass and waste. Energy research Centre of the Netherlands. <https://www.ecn.nl/phyllis2/>; letzter Zugang: 25.06.2014
- Prochnow, A., M. Heiermann, C. Idler, B. Linke, P. Mähnert und M. Plöchl, 2007: Biogas vom Grünland: Potenziale und Erträge. Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam-Bornim. Online: <http://www2.atbpotsdam.de/HauptseiteDeutsch/Institut/Abteilungen/Abt2/Mitarbeiter/mheiermann/publikation/atb%202007%20biogas%20vom%20gr%C3%BCnland%20%20potenziale%20und%20ertr%C3%A4ge.pdf>; zuletzt besucht: 13.11.2014
- Rösch, C., K. Raab, J. Skarka und V. Stelzer, 2007: Energie aus dem Grünland – eine nachhaltige Entwicklung? *Wissenschaftliche Berichte, FZKA 7333*, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruhe, 194 S. Online: <http://www.itas.kit.edu/pub/v/2007/roua07b.pdf>; zuletzt besucht: 14.11.2014
- Schieder, D., J. Ellenrieder und M. Faulstich, 2009: Kombinierte mechanische-enzymatische Vorbehandlung zum verbesserten Substrataufschluss bei der Vergärung nachwachsender Rohstoffe. *Schriftenreihe Biogas Science 2009*, Erding, 105-119. Online: http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/biogas_science_bd_1.pdf; zuletzt besucht: 14.11.2014
- Schlegel, H. G., 1992: *Allgemeine Mikrobiologie*. 7. überarbeitete Auflage, Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart, 634 S.
- Schumacher, B., 2008: Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol. Dissertation Universität Hohenheim, Mensch und Buch Verlag, Berlin, 222 S.
- Schumacher, B., H. Oechsner, T. Senn und T. Jungbluth, 2007: Thermo-mechanischer Aufschluss reifer Triticale zur Biogasgewinnung. *Landtechnik* 62(3), 162-163
- Schumacher, B., H. Wedwitschka, J. Hofmann, V. Denysenko, H. Lorenz and J. Liebetrau, 2014: Disintegration in the biogas sector – Technologies and effects. *Bioresource Technology* 168, 2-6

- Schwarz, B., 2012: Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen der Größenklasse 250 kW_{el} und 350 kW_{el} (Trocken- und Nassvergärung) auf Basis des EEG 2012. Fraunhofer IKTS, 39 S.
- Schwarz, B., E. Friedrich, H. Friedrich, K. Jobst und M. Lincke, 2009: Desintegrationsverfahren – Aufwand und Nutzen für die Biogaserzeugung. Gülzower Fachgespräche: Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Weimar, Band 32, 278-288. Online: http://www.aelf-ph.bayern.de/pflanzenbau/38597/linkurl_0_21.pdf; zuletzt besucht: 14.11.2014
- Seyfert, U., K. Bunzel und D. Thrän., 2011: Biomassepotenziale in Deutschland 2008 bis 2020. Report Nr. 8, Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ), Leipzig. Online: http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/DBFZ_Reports/dbfz_report_kompakt_web.pdf; zuletzt besucht: 13.11.2014
- StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 2008: Bodennutzung in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs 2007, Endgültige Ergebnisse der allgemeinen Agrarstrukturerhebung. Artikel-Nr. 333207001)
- Stenull, M., L. Eltrop, I. Vidjen, M. Dederer und J. Messner, 2009: Arbeiten die baden-württembergischen Biogasanlagen effizient? Vortrag Offenburg, 22.10.2009, 16 S.
- Thoss, C., und N. Menzel, 2012: Vortrag. Zwischenbericht über die Verwertung von Landschaftspflegematerial (LAPF). Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V. (DVL), C.A.R.M.E.N.-Symposium, 03.07.2012, Würzburg, 1-39. Online: http://mulle.lpv.de/fileadmin/user_upload_biogas/data_files/fachinformation/120703_sym_carmen.pdf; zuletzt besucht: 13.11.2014
- Thumm, U., 2011: Biomasse zur energetischen Verwertung vom Grünland. Landinfo 5, 38-40
- VDI-Gesellschaft Energietechnik, 2006: Vergärung organischer Stoffe – Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. VDI 4630, VDI-Handbuch Energietechnik, Beuth-Verlag, Berlin, 92 S.
- VDLUFA, 2007: Method Book III – The chemical analysis for feedstuffs. 1.-7. Ergänzungslieferung, VDLUFA Verlag, Darmstadt, Germany
- Wartell, B. A., V. Krumins, J. Alt, K. Kang, B. J. Schwab and D. E. Fennell, 2012: Methane production from horse manure and stall waste with softwood bedding. *Bioresource Technology* 112(1), 42-50
- Weißbach, F., and C. Strubelt, 2008: Correcting the dry matter content of grass silages as a substrate for biogas production. *Landtechnik* 63(4), 210-211
- Wichern, M., T. Gehring, K. Fischer, D. Andrade, M. Lübken, K. Koch, A. Gronauer and H. Horn, 2009: Monofermentation of grass silage under mesophilic conditions: Measurements and mathematical modeling with ADM 1. *Bioresource Technology* 100, 1675-1681
- Zhu, J., Y. Zheng, F. Xu and Y. Li, 2014: Solid-state anaerobic co-digestion of hay and soybean processing waste for biogas production. *Bioresource Technology* 154, 240-247



Die günstigen Förderungsbedingungen nach dem EEG haben dazu geführt, dass in Deutschland bis zum Jahresende 2014 rd. 8.000 Biogasanlagen in Betrieb waren. Der weitere Zubau an Biogasanlagen stößt jedoch zunehmend an Grenzen („Vermaischung“ der Landschaft), weshalb alternative Substrate gesucht werden. Landschaftspflegegras könnte eine solche Alternative sein. In dieser Studie wurde der Fragestellung nachgegangen, wieweit Landschaftspflegegras verfahrenstechnisch hierfür geeignet ist und welche Mehrkosten damit verbunden sind. Neben der technoökonomischen Analyse der gesamten Verfahrenskette – von der Ernte bis zur Verwendung in der Biogasanlage – waren hierfür vor allem verfahrenstechnische Untersuchungen zur mechanischen Substrataufbereitung und zu den erzielbaren Biogaserträgen nötig. Im Ergebnis sind es vor allem die geringeren spezifischen Biogaserträge die zu insgesamt höheren Biogaskosten führen.

