



UNIVERSITÄT
BAYREUTH

Bachelorarbeit

Methan-Bildungspotential von *Sambucus ebulus*

—

Nutzung der Pflanze als Gärsubstrat in Biogasanlagen



Von: **Maria Elise Dittmann geb. Leidig**

Matrikelnummer: 1298138

maria.e.dittmann@stmail.uni-bayreuth.de

Erstkorrektor: Dr. Pedro Gerstberger

Zweitkorrektor: Dr. Gregor Aas

Eingereicht am 10.03.2015

Titelfoto: *Sambucus ebulus* in Blüte (Foto: Maria Dittmann)

Danksagung

Mein besonderer Dank für die umfangreiche persönliche Betreuung und Zusammenarbeit gilt Dr. Pedro Gerstberger, Margarete Wartinger und vielen anderen vom Lehrstuhl Pflanzenökologie, die mit einem Schlüssel, einer Schere und anderen großen Kleinigkeiten aushalfen sei ebenfalls gedankt. Bei Zacharias Lochner möchte ich mich für seine tatkräftig Hilfe im Labor und für den guten Austausch zum Thema herzlich bedanken.

Dank Simeon Völkel und seiner intensive Hilfe wurden physikalische Probleme lösbar. Der Bioenergieregion Bayreuth sei für die Unterstützung gedankt, auch in Form von Material der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Weiter möchte ich meinem Ehemann Andreas Dittmann für seine Unterstützung danken, auf die ich mich in jeder Situation verlassen konnte.

Angelika und Michael Dittmann, meinen Eltern, Lea Schott, Katharina Funk und Marietheres Schäfer sei für die Motivationsarbeit und den Hinweis auf so manchen Fehler gedankt.

Und zuletzt, weil es für mich das Wichtigste ist, möchte ich Gott, dem Christus Danke sagen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	V
Abstract	1
1. Einführung	2
2. Portrait von <i>Sambucus ebulus</i>	3
2.1. Allgemein.....	3
2.2. Verbreitung.....	5
2.3. Toxizität.....	7
2.4. Pflanzengesellschaft Sambucetum ebuli	8
2.5. Beschreibung der Erntestandorte.....	9
3. Methodik.....	14
3.1. Ernte.....	14
3.2. Bestimmung der Trockenmasse.....	14
3.3. Ertragshochrechnung	14
3.4. Veraschung	15
3.5. Vergärung.....	15
3.5.1. Homogenisierung.....	15
3.5.2. Ansetzen der Gärung.....	16
3.6. Gasertragsmessung.....	19
3.7. Weitere Berechnung der gewonnenen Daten	21
3.7.1. Normieren des Volumens	21
3.7.2. Berücksichtigung des Kopfvolumens.....	22
3.7.3. Fehlerrechnung	22
4. Ergebnisse	24
4.1. Ernte.....	24
4.2. Trockenmasse	24

4.3. Ertragshochrechnung	24
4.4. Veraschung	26
4.5. Methanbildungspotential.....	28
4.5.1. Eigene Methanproduktion der verwendeten Gülle	30
5. Diskussion	31
Fehlerdiskussion	33
6. Ausblick	36
7. Zusammenfassung	37
8. Quellenverzeichnis	38
Anhang	41
Eidesstattliche Erklärung.....	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Sambucus ebulus in Blüte im Ökologisch Botanischen Garten der Universität Bayreuth mit Bienenbesuch (Foto: Maria Dittmann).....	3
Abbildung 2.2 Areal von Sambucus ebulus in Deutschland (Quelle: BFN 2014).....	5
Abbildung 2.3 Ebulosid, der Hauptgiftstoff von Sambucus ebulus. (aus: ROTH 2012).....	7
Abbildung 2.4 Veranschaulichung des Wuchses am Erntestandort Simmelsdorf auf Carbonatgestein (Fotos: Maria Dittmann).....	11
Abbildung 2.5 Karte der neun Erntestandorte von Sambucus ebulus in Bayreuth und Umgebung.....	12
Abbildung 3.1 Darstellung des Gärstandes (Foto: Maria Dittmann).....	18
Abbildung 3.2 Skizze zum Verfahren der Biogasertragsbestimmung (Quelle: Zacharias Lochner).....	19
Abbildung 3.3 Kalibriergerade für Methangasanalysator.....	20
Abbildung 4.1 Darstellung des Biogasertrags im Verhältnis zum oTS-Anteil mit eingezeichneter Regressionsgerade. Ein blauer Punkt pro Ernte. Grafik oben: Mit dem Ausreiserwert von LL. Grafik unten: ohne LL.....	27
Abbildung 5.1 Diagramm des mittleren Methangehalts des Biogases in Vol.-% von vier verschiedenen Pflanzen-Substraten. *) aus FNR (2010), **) aus MÜLLER (2012).....	32
Abbildung 5.2 Diagramm des mittleren Methanertrags in N L /kg oTM von vier verschiedenen Pflanzen-Substraten. *) aus FNR (2010), **) aus MÜLLER (2012), ***) aus FRIEHE et al. (2013).....	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Ellenberg-Zeigerwerte an allen Erntestandorten.....	10
Tabelle 2.2 Kurzbeschreibung zu den betrachteten Flächen, an denen Sambucus ebulus geerntet wurde.....	13
Tabelle 4.1 Ergebnis zur Ermittlung des Trockenmassen(TM)-Anteils.....	24
Tabelle 4.2 Ertragshochrechnung pro Hektar für acht Standorte.....	25
Tabelle 4.3 Ermittlung der organischen Trockensubstanz (oTM) durch Veraschung..	26
Tabelle 4.4 Methanbildungspotential; Ergebnistabelle.....	29
Tabelle 4.5 Gasertrag von 800 ml reiner Gülle (Nullprobe).....	30
Tabelle A.0.1 Fehler pro Wert.....	43

Abstract

Within the context of this bachelor thesis the herbaceous perennial dwarf elderberry (*Sambucus ebulus* L.) is presented. The plant was examined to find out, if it is a possible energy-plant-to-be for biogas and especially methane production. The bushy *Sambucus ebulus* is a native central European and submediterranean species. It is characterized by its lush and blossomy growth, which offers a biosphere to a large variety of insects. Due to the fact that *Sambucus ebulus* already belongs to the indigenous flora of Europa, there is no unforeseeable risk for the plant to escape from field compared to many other energy plants, which are neophytes. The divisive question if crops should rather be raised for food production than for power production is no issue in case of the uneatable dwarf elderberry. For this study *Sambucus ebulus* was picked from nine places in Upper Franconia between July and November 2014, was weighed, dried, homogenized and ashed. Finally the plant's biogas building potential was examined. With a hectare yield of up to 65 t FM, total dry matter solids of 23,3 % in average, an organic dry-weight content of 92,6 % oTM in average and a high methane rate of \varnothing 72 Vol.-% *Sambucus ebulus* meets criteria for an biogas energy plant. Besides the ecological advantages *Sambucus ebulus* seems to be a promising alternative to maize monoculture, although this first study detected an average methane yield of 292 $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM for unfertilized wild-growing stocks, which is lower to maize with 340 $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM (FRIEHE et al. 2013).

It is expected that further cultivated and fertilized *Sambucus ebulus* fields are going to bring even higher yields.

1. Einführung

In Zeiten der Energiewende wird die Bedeutung von Erneuerbaren Energien immer größer. Neben der Wind-, Wasser- und Solarenergie wird auch der Ausbau der Energieversorgung durch nachwachsende Rohstoffe vorangetrieben. Landwirte und Kommunen reagieren schon seit Jahren mit einem verstärkten Bau von Biogasanlagen. Das Landschaftsbild wird dadurch zunehmend geprägt von Anbauflächen für Mais, der in Form von Maissilage als Futtermittel oder Biogassubstrat dient. In Bayern lag die Anbaufläche für Mais 20 Jahre lang relativ konstant bei rund 400 000 ha. Seit 2002 hat sich diese enorm vergrößert. Rund 100 000 ha zusätzliche Anbauflächen für Silomais sind von 2002 bis 2011 in Bayern dazugekommen (FNR 2013). Die rund 430.000 ha Silomais-Anbaufläche, die es im Jahr 2014 gab, entsprechen einem Anteil von 20 % des Ackerlandes in Bayern (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK 2014). Damit ist Mais derzeit die wichtigste Energiepflanze für die Biomethangasproduktion. Seine Dominanz auf den Ackerflächen ist aber hinsichtlich der agrarischen Biodiversität und der Entwicklung hin zu immer größeren Monokulturen bedenklich. Zunahme von Schädlingen, Erosionsgefahr, Eutrophierung von Grund- und Oberflächenwasser, Humuszehrung und die Wildschweinproblematik sind Beispiele dafür (KIEFER et al. 2011, FNR 2013). Strittig ist auch die Frage ob Mais, der in vielen Regionen der Welt ein Hauptnahrungsmittel ist, überhaupt zur Energieerzeugung verwendet werden darf. In den Medien kursiert diese Streitfrage als „Tank oder Teller“-Debatte (FAZ 2012).

Vor diesem Hintergrund ist die Forschung schon lange auf der Suche nach Alternativen, um der Maismonokultur („Vermaisung“ der Landschaft) entgegen zu steuern. Gesucht werden Energiepflanzen die vergleichbar gute Erträge liefern, entsprechend gute Methanproduzenten sind und darüber hinaus die Anbauflächen ökologisch aufwerten. Andere Energiepflanzen, wie beispielsweise *Silphium perfoliatum*, werden hierfür auch schon auf den Forschungsflächen der Landwirtschaftlichen Lehranstalt in Bayreuth angebaut. Mit der vorliegenden Studie über den Zwergholunder *Sambucus ebulus* soll eine weitere Pflanze untersucht werden, die sich als Gärsubstrat für Biogasanalgen eignen könnte. Sie hätte den Vorteil, dass es sich nicht, wie beim Mais oder *Silphium perfoliatum* L., um einen Neophyt, sondern um eine einheimische Art handelt. Am Lehrstuhl für Pflanzenökologie wurden im Frühjahr 2014 erstmals Anbauparzellen mit *Sambucus ebulus* bepflanzt. Eine erste Ernte ist 2015 möglich. Um schon vorher das Methanbildungsvermögen von Wildherkünften zu untersuchen, wurde die vorliegende Studie durchgeführt.

2. Portrait von *Sambucus ebulus*

2.1. Allgemein

Systematik nach ROTHMALER (2011):

Ordnung: Dipsacales

Familie: Adoxaceae

Gattung: *Sambucus* L.

Art: *Sambucus ebulus*

Aktuelle ausführliche Literatur zu *Sambucus ebulus* ist nur spärlich vorhanden. Das erklärt, warum auch auf den 1918 erschienen Band VI der „Illustrierten Flora Mitteleuropas“, das Standardwerk von HEGI, zurückgegriffen wurde.

Der Ursprung des Artnamens *ebulus* ist laut HEGI (1918) unbekannt und war schon bei den alten Römern als Artnamen gebräuchlich. Neben dem deutschen Namen „Zwergholunder“ ist auch die Bezeichnung „Attich“ bekannt und gebräuchlich, die sich aus dem griechischen Namen für Holunder herleitet. Der Name Attich wird regional dann noch sprachlich variiert, wie zu Adö, den man in Oberösterreich verwendet. *Sambucus ebulus* ist eine ausdauernde, krautige Staudenpflanze mit kräftigem, kriechendem Wurzelstock (HEGI 1918, S. 236f).

Die gesägten und gestielten Laubblätter sind einfach (selten zweifach) gefiedert und haben Nebenblätter, die nach ROTHMALER (2011) blattartig sind.



Abbildung 2.1 *Sambucus ebulus* in Blüte im Ökologisch Botanischen Garten der Universität Bayreuth mit Bienenbesuch (Foto: Maria Dittmann)

Die Staude blüht weiß mit etwas rot, durch die rötlichen Antheren (Staubbeutel), die im Verlauf der Blüte abdunkeln. Die Höhe von 60 cm bis 150 cm, die ROTHMALER (2011) angibt ist recht bescheiden gehalten. Eigenen Beobachtungen zufolge beträgt die durchschnittliche Höhe für viele Wildbestände in Oberfranken eher 1,5 m bis 1,8 m.

In südeuropäischen Floren werden für *Sambucus ebulus* auch noch Höhen bis 2 Meter angegeben. Das ist als Hinweis für eventuell größere Ökotypen im Mittelmeergebiet zu werten. Die unverzweigten Triebe bilden terminal reichhaltige Trugdolden mit weißen, sympetalen, zwittrigen Blüten, die von Juni bis Juli blühen. Nach HEGI (1918) bieten sie nur ein mittelmäßiges Bienenfutter. Eigene Beobachtungen dokumentieren aber einen regen Bienenbesuch (Abbildung 2.1). Darüber hinaus waren auch andere Insekten, wie *Cetonia aurata* (Rosenkäfer; bestimmt nach BROHMER 2002) aber auch viele Dipteren auf den Blüten zu sehen.

Der konkurrenzfähige Wurzelkriechpionier *Sambucus ebulus* ist nach BRANDES (1983) durch seinen unverzweigten und krautigen Stengel leicht von anderen *Sambucus*-Arten zu unterscheiden.

Die oberirdischen, krautigen Stengel der Staude sterben im Herbst ganz ab. Die Erneuerungsknospen befinden sich etwa an der Bodenoberfläche. Die Pflanze verholzt nur wenig, ist also ein Hemikryptophyt und kein Phanerophyt (Baum), wie die beiden anderen einheimischen *Sambucus*-Arten (*Sambucus nigra* L. und *S. racemosa* L.). Ein geringerer Ligningehalt ist generell positiv zur Verwertung in Biogasanlagen, da Öignin nur äußerst langsam im Bioreaktor abgebaut wird (FNR 2013, S.105).

2.2. Verbreitung

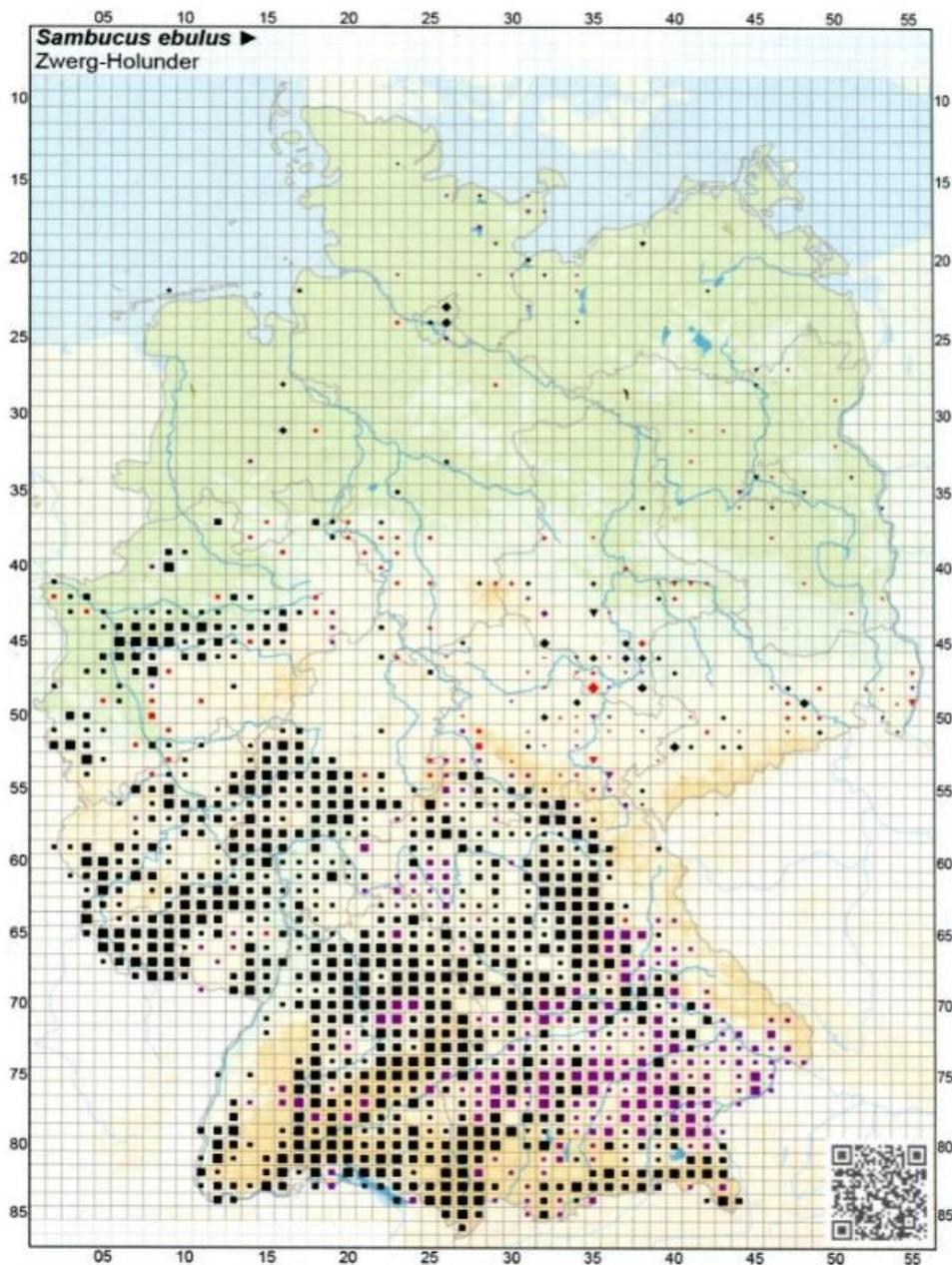


Abbildung 2.2 Areal von *Sambucus ebulus* in Deutschland (Quelle: BFN 2014)

Auf Abbildung 2.2 ist zu sehen, wie sich das Areal von *Sambucus ebulus* in Deutschland erstreckt. Die Größe der Quadrate symbolisiert die Nachweisdichte. Je größer diese sind desto dichter ist der Bestand in der jeweiligen Rasterzelle (Anwesenheit in 1-4 Quadranten der Zelle). Eine Zelle entspricht einem Blatt der Topographischen Karte 1:25000. Rot bezieht sich auf Nachweise vor 1950 und violett auf solche zwischen 1950 und 1980. Es ist zu erkennen, dass die Pflanze vor allem in Süd- bis Südwestdeutschland verbreitet ist.

Die violetten Punkte im mittleren Bayern besagen konkret, dass dieses Gebiet offenbar keine neuere Kartierung erfahren hat; die Pflanze sollte in diesem Raum aber immer noch häufig vorkommen.

Die Verbreitung in Deutschland konzentriert sich auf Süddeutschland und das Ruhrgebiet (ohne höhere Mittelgebirgslagen) und reicht in den Norden bis zu Teuteburger- und Thüringerwald. BRANDES (1980) bezieht sich bei seiner Beschreibung der Verbreitung auf WEINERT & HEGI (1966) und kommt zu folgendem Schluss: *Sambucus ebulus* ist fast in gesamt Süd- Mittel- und Westeuropa verbreitet.

Im Norden Europas verläuft die Arealgrenze entlang von Nordschottland über die südlichen Niederlande (BRANDES 1980). Nach PERING & WALTES 1976 ist *Sambucus ebulus* aber zerstreut auf allen Britischen Inseln und Irland zu finden, auch wenn viele Belege von vor 1930 stammen. Nach FLORA EUROPAEA, Vol. 4 (1984) erstreckt sich das Areal weiter über den gesamten Mittelmeerraum bis zur Nordukraine und Zentralrussland. Im Baltikum und Skandinavien wird die Staude aber nur unter Vorbehalt vermutet.

Darüber hinaus wächst *Sambucus ebulus* auch im nördlichen Atlas-Gebiet sowie in den Randgebieten Kleinasiens. Zwei kleine weitere Areale sind aus dem Iran und aus Kaschmir bekannt (BRANDES 1980). BRANDES vermutet für die Verbreitung in Indien eine Verwechslung mit *Sambucus wightiana* WALL., was eigene Internetrecherchen auf efloras.org im Dezember 2014 bestätigen. Dort wird für die Flora von Pakistan *Sambucus ebulus* widersprüchlicherweise synonym zu *Sambucus wightiana* verwendet. Über den Atlantik (nordöstliches Nordamerika) scheint *Sambucus ebulus* auch schon gekommen zu sein - vermutlich unbeabsichtigt durch den Menschen -, wie die Verbreitungskarte auf <http://plants.usda.gov/core/profile?symbol=SAEB> mit Daten von 1963-2006 belegt. Dort ist zu sehen, dass *Sambucus ebulus* (engl.: dwarf elderberry) in Ostkanada eingeführt wurde und darüber hinaus auch im US-Bundesstaat New Jersey aufgenommen wurde. Zur heimischen Flora gehört der Zwergholunder in Nordamerika nicht.

2.3. Toxizität

Schon HEGI beschreibt den bitteren Mandelduft der Blüten des Zwergholunders. Die ganze Pflanze ist von widerlichem Geruch und gilt als heftige Giftpflanze (HEGI 1918).

Bei ROTH (2012) wird beschrieben, dass die ganze Pflanze giftig ist, besonders aber die Samen in den schwarzen Früchten. Im Fruchtfleisch befinden sich giftige Bitterstoffe, mit zwei Ester-liridoidglykosiden und zwar Ebulosid und Isoswerosid. Darüber hinaus beinhaltet die Pflanze Kaffeesäure, p-Cumarinsäure und Spuren eines Blausäureglykosids.

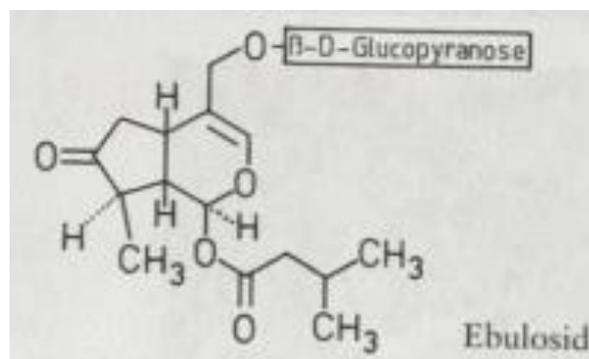


Abbildung 2.3 Ebulosid, der Hauptgiftstoff von *Sambucus ebulus*. (aus: ROTH 2012)

Vergiftungserscheinungen, die im Zusammenhang mit *Sambucus ebulus* auftraten sind: Übelkeit, Erbrechen, Kratzen im Hals, Schwindelgefühl, Kopfschmerzen, Ohrensausen, Pupillenerweiterung, blutiger Durchfall, hellrote Lippen, Sehstörungen und Herzbeschwerden. Auch tödliche Vergiftungen wurden bekannt.

Laut der Beratungsstelle für Vergiftungserscheinungen in Berlin traten bei Aufnahme der Früchte unbekannter Menge spontanes Erbrechen, Übelkeit und Durchfall auf (ROTH 2012). Der Gefährlichkeitsgrad des Zwergholunders entspricht + (von max. +++). Die ganze Pflanze ist also giftig. Aber längst nicht so giftig, wie bspw. die Früchte von *Atropa belladonna* mit Gefährlichkeitsgrad +++ (ROTH 2012).

Bei der Arbeit mit dem Pflanzenmaterial sind im Rahmen der Bachelorarbeit keine Vergiftungserscheinungen aufgetreten. Abgesehen vom erwähnten widerlichen Geruch kam es beim Kontakt mit den Pflanzen zu keinen Hautirritationen oder Ähnlichem, was die Dramatik der Toxizität von *Sambucus ebulus* relativiert. Essbar ist die Pflanze aber nicht.

Weitere Nachforschungen ergaben auch konkrete positive Beschreibung für die volksheilkundliche Verwendung der Pflanze: In einer Untersuchung der Pflanzen aus der Österreichischen Volksheilkunde von VOGL ET AL. (2013) wurde *Sambucus ebulus* betrachtet und mit Bezug auf SHOKRZADEH & SAEEDI SARAVI (2010) auf seine unter anderem entzündungshemmende und antikanzerogene Wirkung hingewiesen. Erwähnenswert ist auch, dass die Pflanze in der türkischen Medizin, beispielsweise gegen Rheuma und als Entzündungshemmer, Anwendung findet, was YESILADA (1992) untersuchte.

2.4. Pflanzengesellschaft Sambucetum ebuli

Nach OBERDORFER (1983) bildet der Zwergholunder eine eigene Pflanzengesellschaft, das Sambucetum ebuli (Felf 1942). Die stetigsten Artvertreter dieser Zwergholunder-Gesellschaft sind neben der Assoziationscharakterart *Sambucus ebulus* noch *Urtica dioica*, *Glechoma hederacea* oder auch *Galeopsis tetrahit*. Die Zwergholunder-Gesellschaft, eine weißblühende Staudenflur, die nicht nur saumartig sondern auch flächig an Waldrändern, Waldwegen oder in Waldlichtungen auftreten kann, ist eine ausgesprochene licht- und wärmeliebende Artenkombination süd-mitteuropäischer, submediterraner Verbreitung (OBERDORFER 1983, BRANDES 1982). Sie ist an grundfrische, basenreiche, meist kalkhaltige Lehmböden gebunden. *Sambucus ebulus*, der in Herden (vermutlich Klonen) auftritt, wird als „unduldsam“ gegenüber den übrigen Arten eingestuft, so OBERDORFER (1983).

Dass auch die sehr stetige Brennnessel nur einzeln in solche Herde eingestreut ist, lässt eine allelopathische Wirkung des Zwergholunders, möglicherweise ausgehend von den Wurzelstöcken und Wurzeln, vermuten.

2.5. Beschreibung der Erntestandorte

Zur Untersuchung der Standorte, an denen *Sambucus ebulus* für die vorliegende Studie gefunden und geerntet wurde, wird eine Analyse mittels Zeigerwerten nach Ellenberg durchgeführt. Dabei wird der Median der Zeigerwerte der an den Standorten vorgefundenen Begleitvegetation plus den Zeigerwerten für *Sambucus ebulus* selbst errechnet. So gelingt eine Bewertung des ökologischen Verhaltens der Pflanzensippe, als auch des Standortes selber. Bei den Ellenberg-Zeigerwerten gibt es die Lichtzahl (L), bei der Tiefschattenpflanzen den Wert (1), Volllichtpflanzen den Wert (9) erhalten. Die Temperaturzahl (T) reicht von Kältezeiger (1) bis zum extremen Wärmezeiger (9) aus dem mediterranen Bereich. Die Kontinentalitätszahl (K) mit (1) euozeanisch bis (9) eukontinental wurde im vorliegenden Fall nicht bewertet, da alle Aufnahmen in einem Umkreis von unter 100 km aus Oberfranken stammen (s. Abbildung 2.5).

Die Feuchtezahl (F) reicht von Zeigerwert (1)=Starktrockenzeiger bis (12)=Unterwasserpflanzen. Die Reaktionszahl (R) bezieht sich auf die Bodenreaktion. Kennung (1) erhalten hierbei Starksäurezeiger und bis (9) reicht die Skala für Kalkzeiger. Bei der Nährstoff- oder Stickstoffzahl (N) sind mit (1) stickstoffärmste Standorte gemeint, bei (8) handelt es sich um ausgesprochene Stickstoffzeiger und (9) deutet auf einen übermäßigen Stickstoffreichtum hin, wie bei Viehlägerpflanzen und Verschmutzungszeigern üblich. (N) bezieht sich auf Wertermittlungen vor 1970, also vor der gesteigerten Stickstoffemission durch luftgetragene Stickstoff-Eutrophierung, wie beispielsweise durch Verbrennungen, bei denen Stickoxide entstehen.

Da es sich bei den Pflanzen um Glycophyten (also keine Halophyten) handelt, ist die Betrachtung der Salzzahl (S) unwichtig. Bei den indifferenten Werten (x) handelt es sich um solche, deren Amplitude für den jeweiligen Zeigerwert so stark schwankt, dass keine definitive Aussage möglich ist (ELLENBERG ET AL. 1991, ELLENBERG & LEUSCHNER 2010).

In der nachfolgenden Tabelle 2.1. sind die relevanten Zeigerwerte für die spontane Vegetation, wie sie an den verschiedenen Erntestandorten vorzufinden war, aufgeführt. In die Tabelle fließt die Vegetation an den Erntestandorten „Ökologisch- Botanischer Garten“ (ÖBG) und „Landwirtschaftliche Lehranstalten“ (LL) nicht ein, da es sich hier beides Mal um angepflanzte Bestände handelt, über die mittels Ellenberg-Zeigerwertermittlung keine Aussage hinsichtlich der Begleitvegetation getroffen werden darf.

Dass für die Betrachtung vorrangig der Median und nicht, wie auch üblich, der Mittelwert herangezogen wurde erklärt sich wie folgt: Um eine möglichst einheitliche Aussage über das ökologische Verhalten der Pflanzensippe machen zu können, soll dieses nicht durch Ausreißer bei einem bestimmten Zeigerwert in die eine oder die andere Richtung verfälscht werden (Wie bspw. mit Zeigerwert (3) bei (R) durch *Juncus effusus*, bei einem Median von (7)). Bei den Zeigerwerten handelt es sich ohnehin um ordinale Zahlen. Die indifferenten Werte (x) fließen weder in den Median noch in den Mittelwert ein.

Tabelle 2.1 Ellenberg-Zeigerwerte an allen Erntestandorten

Vegetation	Licht	Temperatur	Feuchte	Reaktion	Nährstoff	Stetigkeit(*)
<i>Sambucus ebulus</i>	8	6	5	8	7	V
<i>Urtica dioica</i>	x	x	6	7	9	III
<i>Rubus idaeus</i>	7	x	x	x	6	III
<i>Chaerophyllum bulbosum</i>	7	6	7	8	8	II
<i>Eupatorium cannabinum</i>	7	5	7	7	8	II
<i>Agrostis capillaris</i>	7	x	x	4	4	I
<i>Atropa bella-donna</i>	6	x	5	8	8	I
<i>Brachypodium sylvaticum</i>	3	5	5	6	6	I
<i>Calamagrostis epigejos</i>	7	5	x	x	6	I
<i>Cirsium arvense</i>	8	5	x	x	7	I
<i>Coronilla varia</i>	7	6	4	9	3	I
<i>Festuca pratensis</i>	8	x	6	x	6	I
<i>Fragaria vesca</i>	7	x	5	x	6	I
<i>Galium aparine</i>	7	6	x	6	8	I
<i>Juncus effusus</i>	8	5	7	3	4	I
<i>Rubus caesius</i>	6	5	x	8	7	I
<i>Senecio fuchsii (ovatus)</i>	7	x	5	x	8	I
<i>Epilobium angustifolium</i>	8	x	5	5	8	I
<i>Carex sylvatica</i>	2	5	5	6	5	I
<i>Poa trivialis</i>	6	x	7	x	7	I
Median:	7	5	5	7	7	
Mittelwert	6,6	5,4	5,6	6,5	6,6	

(*) I = Art anwesenden in 1 von 5 Standorten bis V= anwesende in 5 von 5 der Standorten

Aus der Tabelle 2.1 ist zu erkennen, dass es sich um eine Pflanzenvergesellschaftung von Halblichtpflanzen handelt, hergeleitet durch einen Median von (7) beim Lichtzeiger. Ein Median von (5) bei (T) gibt nach ELLENBERG (2010) Auskunft über mäßige Wärmeansprüche, angesiedelt in tiefen bis montanen Lagen.

An dieser Stelle ist zu sagen, dass die Temperaturzahl weniger auf Temperaturmessung als auf arealgeografischen Grundlagen basiert.

(T5) deckt die planare bis montane Höhenstufe Mitteleuropas ab (ELLENBERG ET AL. 1991, S.13f). Die vorliegende mittlere Feuchtezahl (5) ist typisch für Frischezeiger mit Schwerpunkt auf mittelfeuchten Böden, auf nassen sowie auf oft austrocknenden (ELLENBERG 2010). Ein Median der Reaktionszahl von (7) verdeutlicht den Anspruch der Pflanzensippe zu basenreiche Böden und niemals zu sauren Böden. Vermutet werden kann eine Vorliebe des Zwergholunders für kalkhaltige Böden im Carbonatpufferbereich, der bei einem pH-Wert von 8,6 bis 6,2 liegt (pH-Wert Bereich aus BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG 2005). Diese Vermutung beruht auch auf eigenen Beobachtungen, wie am Erntestandort in Simmelsdorf (Fränkische Alb), wo der Zwergholunderbestand üppig auf einem Boden wächst, auf dem Kalksteine (Jurakalk) aufliegen (Abbildung 2.4). Diese Vermutung wird gestützt durch die Reaktionszahl (8) von *Sambucus ebulus*, die den Maximalwert (9) für einen Kalkzeiger nur um eins verfehlt. Brandes (1983) spricht für *Sambucus ebulus* auch davon, dass er kalkhaltige, lehmige Böden bevorzugt.

Der gute Wuchs auf Kalk ist vermutlich auch auf die bessere Humusform, die sich auf Carbonatgestein einstellt zurückzuführen. Sie hat auch eine bessere Durchlüftung sowie bessere Nährstoffnachlieferung zufolge (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 2007, S.22).



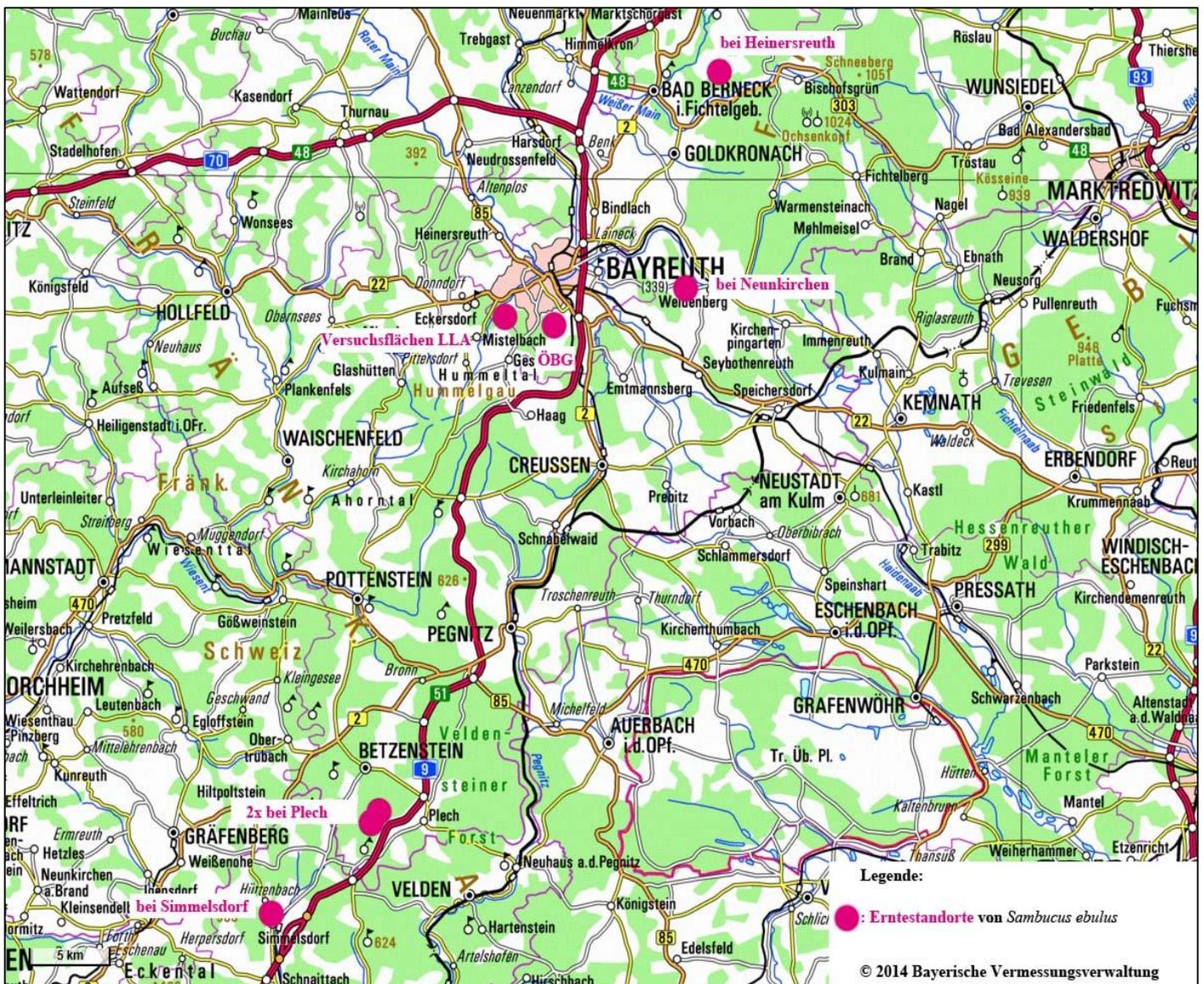
Abbildung 2.4 Veranschaulichung des Wuchses am Erntestandort Simmelsdorf auf Carbonatgestein (Fotos: Maria Dittmann)

2. Portrait von *Sambucus ebulus*

Aus dem Median (7) der Nährstoffzahl lässt sich ableiten, dass stickstoffreiche (wenn auch nicht übermäßig stickstoffreiche) Standorte von der Sippe bevorzugt werden.

Insgesamt stellt sich also eine Pflanzenvergesellschaftung um *Sambucus ebulus* mit mäßigem Wärmeanspruch dar, die eher lichtliebend ist, eine Vorliebe für mittelfeuchte Böden und einen erhöhten Stickstoffanspruch hat. Zu üppigstem Wuchs kommt sie auf Kalk.

Um den Ernteradius abzustecken wurde die folgende Karte erstellt. Auf dieser ist zu sehen, wo *Sambucus ebulus* im Regierungsbezirk Oberfranken zur näheren Untersuchung für diese Studie geerntet wurde.



Aus Tabelle 2.2 erklären sich die Angaben der Karte mit den Erntestandorten. Die Kürzel aus der Tabelle werden fortan auch im Text verwendet.

Tabelle 2.2 Kurzbeschreibung zu den betrachteten Flächen, an denen *Sambucus ebulus* geerntet wurde

Erntedatum	Standort	Kürzel	Beschreibung kurz
25.07.2014	ÖBG	ÖBG1	angepflanzte Fläche vom ökologisch botanischen Garten der Universität Bayreuth
25.08.2014	ÖBG	ÖBG2	s.o.
25.07.2014	bei Heinersreuth	H	kleiner linienförmiger Bestand
25.07.2014	bei Neunkirchen	N1	im Wald auf offener Fläche üppiger Bestand auf rund 2 Hektar
25.08.2014	bei Neunkirchen	N2	s.o.
14.08.2014	bei Simmelsdorf	S	dichte Fläche auf exponiertem Hang neben Autobahn A9
28.08.2014	bei Plech A9 direkt	P9	Am Randstreifen der A9 anschließende dicht bewachsene Fläche
28.08.2014	bei Plech seitlich	PS	von P9 in Sichtweite, lockerer Bestand am Hang
05.11.2014	Versuchsfläche LLA	LL	im Mai 2014 gepflanzte Fläche an den Forschungsflächen der Landwirtschaftlichen Lehranstalt Bayreuth (LLA)

3. Methodik

3.1. Ernte

Für die Ernte wurde ein möglichst repräsentatives Stück aus den *Sambucus ebulus*-Beständen ausgewählt. In diesem Stück wurde ein Quadratmeter abgesteckt und die Anzahl der Triebe in dieser Fläche notiert. Aus dieser Fläche wurden vier repräsentative Triebe abgeerntet. Die Triebe wurden möglichst bodennah abgeschnitten, da dies auch bei der landwirtschaftlichen Ernte von Energiepflanzen üblich ist.

3.2. Bestimmung der Trockenmasse

Da die feldfrische Masse (FM) der Pflanze für einen Vergleich zwischen verschiedenen Pflanzen wenig aussagekräftig ist, wird die Trockenmasse (TM) bestimmt. Bei der Ernte wurde darauf geachtet, dass das *Sambucus ebulus* Pflanzenmaterial nicht etwa durch Regen zu nass ist. Nasses Material würde FM in die Höhe schnellen lassen und in Folge dessen den Trockenmassenanteil unverhältnismäßig beeinflussen. Für die Verwendung in der Biogasanlage und vor allem für eine optimale Silierung (Haltbarmachung) ist ein feldfrischer Trockenmassenanteil von 28-35 % und für Gras von 30-40 % optimal, wie von HUNDT (2010; S.5) mit Verweis auf den Bundesarbeitskreis Futterkonservierung erklärt wird.

FM wurde bis auf die Fläche bei LL mit einer „Dipse Portable Electronic Scale Digital“-Waage (bis 10 kg, Genauigkeit: 5 g) gleich bei der Ernte gewogen, da beim Transport zum Labor mit hohen Gewichtsverlusten durch Verdunstung zu rechnen ist. Das Erntematerial wurde anschließend im Labor drei Tage bei 80°C in einem Trockenschrank der Firma Memmert getrocknet und danach sofort erneut gewogen. Dieser Messwert ist dann die Trockenmasse (TM), die auf Prozent der Frischmasse berechnet wird.

3.3. Ertragshochrechnung

Um eine etwaige Einschätzung zum Hektar-Ertrag zu machen, der auf *Sambucus ebulus*-Feldern zu erwarten wäre, wird der Ertrag wie folgt hochgerechnet: Die an den Erntestandorten vorgefundene Anzahl der Triebe pro Quadratmeter wird herangezogen. Von ihr wird auf die durchschnittliche Trockenmasse eines Triebes auf einem Quadratmeter geschlossen und diese dann hochgerechnet auf einen Hektar (multipliziert mit 10.000 m²).

3.4. Veraschung

Zur Bestimmung der organischen Trockensubstanz (oTS), oder auch organische Trockenmasse (oTM) wird das bei 80°C für einen Tag getrocknete Pflanzenmaterial (TM) verascht. Dazu wurden die Proben (TM) in brennbeständigen Porzellantiegeln auf exakt 3 g eingewogen. Diese Tiegel werden mit Deckel in einen Glühofen (Nasertherm L15/S27) gestellt und 24 Stunden bei 500°C verascht. Dabei entweicht jegliche organische Substanz (Kohlenstoffverbindungen) und übrig bleibt nur das mineralische Material („Asche“) hauptsächlich in Form von Oxiden (K_2O , Na_2O , CaO , MgO , Fe_2O_3) (STRASBURGER ET AL. 2002, S.240).

3.5. Vergärung

3.5.1. Homogenisierung

Um für die Vergärung ein Pflanzensubstrat zu erhalten, das möglichst homogen ist und das das Gärverhalten der gesamten oberirdischen Pflanze widerspiegelt, wurde das getrocknete Pflanzenmaterial fein zerkleinert und gut gemischt. Diese Homogenisierung ist sehr wichtig, weil zur Fermentation nur verhältnismäßig geringe Mengen (5 g) der Pflanzen verwendet werden. Diese geringen Mengen sollen jedoch repräsentativ für die gesamte oberirdische Pflanze sein.

Nach der Trocknung wird dafür das Erntematerial mit einem „Leschka Superzak“-Gartenhäcksler erstmals grob zerkleinert. Das Material enthält danach immer noch grobe bis rund 3 cm lange holzige Stücke. Das leichte Markmaterial ist dabei gut sichtbar und die Blätter schon größtenteils pulverisiert. Dieses vorzerkleinerte Material wird nun in eine Schüssel gegeben, dort mit der Hand gut durchmischt. Hiervon wird eine Hand voll Material in einer IKA Universalmühle für zwei Minuten weiter zerkleinert und pulverisiert. Um ein homogenes Material zu erhalten muss darauf geachtet werden, dass kleines feines Blattmaterial genauso repräsentativ entnommen wird, wie härteres Material.

Das fertige Pulver, rund 30 g, wird mit einem Pinsel aus der Mühle genommen und in ein Glas gefüllt. Es ist das Material, das dann nach einer weiteren Trocknung zur Vergärung angesetzt und für die Veraschung verwendet wird.

5.5.2. Ansetzen der Gärung

Nach nochmaligem Trocknen (einen Tag bei 80 °C) des pulverisierten *Sambucus ebulus* Materials, werden exakt 5,000 g mit einer „Sartorius“ Analysenwaage in Plastikwägeschälchen eingewogen. Diese wurden wieder mit Deckel verschlossen.

Zur Gülleimpfung

Für den Gäransatz wurde rund drei Jahre alte Gülle verwendet, die als Gärrest aus einer Biogasanlage stammt und schon in Vorversuchen am Lehrstuhl benutzt wurde. Indem alte Gülle genommen wird, soll gewährleistet werden, dass in der Impfung möglichst nur noch Mikroorganismen vorhanden sind und kein unvergärtes Pflanzenmaterial (LEMMER 2011, S.76 ff). Das heißt, die in frischer Biogas-Gülle noch vorhandene Biomasse (Pflanzenreste) wurde von den Mikroorganismen schon vollständig umgesetzt. In der verwendeten Gülle sollten nur noch die Bakterien und Archäen enthalten sein, die durch die Zugabe des Pflanzenmaterials wieder aktiv Fermentation betreiben.

Um herauszufinden, wie hoch der Restbetrag an Methanproduktion ist, der aus der verwendeten Gülle oder Impfschlamm (Inokulum) (VDI 2006) trotzdem noch entsteht, wurde ein Gäransatz mit drei Flaschen reiner Gülle ohne Substratzugabe angesetzt.

Dieser Restbetrag der Gülle an der Methanausbeute wird später von dem gemessenen Methanertrag abgezogen (vgl. Tabelle 4.5 Gasertrag von 800 ml reiner Gülle (Nullprobe)).

Um auch die Gülle zu homogenisieren, wird sie vor der Befüllung in die Glasflaschen noch einmal verquirlt. Der Kanister, in dem die Gülle lagert, wird dafür mit einem Rühraufsatz auf einem „Bosch“-Bohrer durchmischt.

Gärflaschen und Kopfvolumen

Bei den verwendeten Enghalsflaschen für den Gäransatz handelt es sich um Glasflaschen mit 1000 ml Volumen der Fa. Schott und der Fa. Simax. In die Schott-Flaschen passen bis zum Deckel 1154 ml hinein, in jene von Simax 1135 ml. In der Berechnung wird davon ausgegangen, dass dies für alle gleichermaßen genormten Flaschen gilt.

Die Enghalsflaschen werden mit 800 ml der homogenisierten Gülle befüllt. Mit einem Pulvertrichter werden anschließend die exakt 5 g Pflanzenmaterial als Gärsubstrat hinzugegeben und mit einem Holzstab in die Gülle eingerührt. In den Flaschen bleibt

ein Volumen von 335 ml (Simax-Flaschen) beziehungsweise 355 ml (Schott-Flaschen) übrig, das mit Luft (vor allem N₂ ca. 80Vol-% und O₂ ca. 20 Vol-%) gefüllt ist. Dieses Volumen wird fortan als Kopfvolumen bezeichnet (es schließt auch das Schlauchvolumen zu den noch ungefüllten Gasbeuteln mit ein). Es ist ein Gas-Volumenbeitrag, der sich nicht von der Biogasproduktion herleiten lässt. Dieses Blindvolumen muss später aus dem Methanpotential heraus gerechnet werden.

Die neun Gäransätze mit Pflanzenmaterial plus ein Gäransatz mit Cellulose (3 g) werden je mit einem gasdichten Schraubverschluss für die Enghalsflaschen abgedichtet. Durch diese Deckel führt ein dünner, gasdichter Schlauch zu den einzelnen Gassammelbeuteln. So wie auf Abbildung 3.1 dargestellt, werden die Gäransätze in einen Wärmeschrank der Firma Heraeus (Model B5060) bei 37 °C bebrütet.

In diesem Wärmeschrank findet die Fermentation über 30 Tage statt. Dabei wird der Wärmeschrank auf eine Temperatur von 37 °C erwärmt. In der Praxis gibt es drei verschiedene Temperaturbereiche. Den psychophilen (unter 20 °C), den mesophilen (25-30 °C) und den thermophilen (über 45°C) Gärbereich, bei denen die jeweiligen Bakterienstämme sich wohl fühlen (SCHULZ & EDER 2001, S.18). Mit diesem Gärstand werden mesophile Bakterienstämme angesprochen, die nach SCHULZ & EDER (2001) auch toleranter sind was Temperaturschwankungen betrifft. Tägliche Schwankungen von 3 °C sind für diese verkraftbar. Hier gilt, je höher der Temperaturbereich liegt, desto temperaturempfindlicher sind die jeweiligen Bakterienstämme.

Aus dem Wärmeschrank führen Verbindungsschläuche zu den gasdichten Gassammelbeuteln der Firma Linde mit einem Fassungsvermögen von 10 Litern. Aus diesen metallbeschichteten Gasbeuteln wurde restliche Luft vor dem Anschluss an die Gärflaschen über eine Wasserstrahlpumpe entzogen. In den Beuteln sammelt sich das entstehende Gas aus den Fermentern. Geöffnete Ventile, die über Metallschellen an die Verbindungsschläuche angeschraubt werden, gewährleisten das Einströmen des Gases.

Diese Vorgehensweise lehnt sich an MÜLLER (2012) an, der im Rahmen seiner Masterarbeit den Gärstand konzipierte. Er experimentierte an der Abdichtung der einzelnen Verschlusselemente, die das Einströmen, des bei der Fermentation entstehenden Gases, gewährleisten sollen.



Abbildung 3.1 Darstellung des Gärstandes (Foto: Maria Dittmann)

Während der 30 Tage Fermentation wurden die Gärflaschen alle 1-2 Tage geschwenkt, damit Gasblasen platzen, sich kein Schaum bildet und sich das Pflanzenmaterial gut in der Gülle, also an den Methanogenen verteilt. Denn hohe Abbauleistungen können die Methanbakterien nur vollbringen, wenn das Biogas ständig aus dem Substrat entweichen kann (SCHULZ & EDER 2001, S. 20f).

3.6. Gasertragsmessung

Nach 30 Tagen, wenn davon ausgegangen werden kann, dass die Methanogenen den Großteil des Pflanzenmaterials in Biogas umgewandelt haben, wird der Gärstand abgebaut und das Gas in den Sammelbeuteln nach Volumen und Methangehalt analysiert.

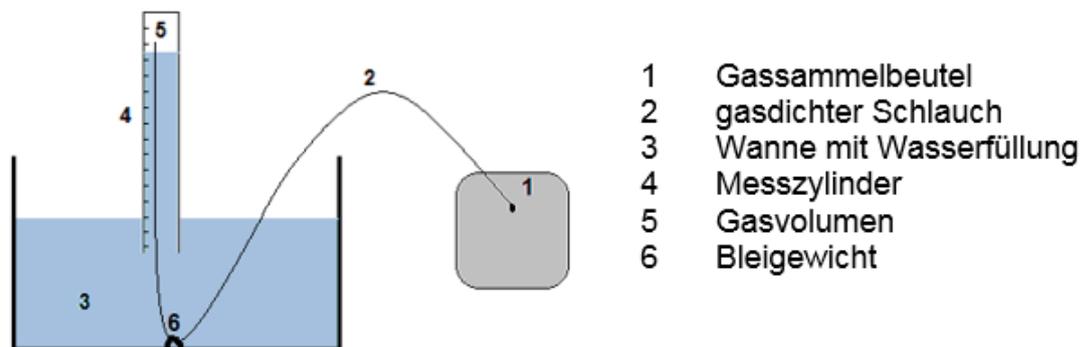


Abbildung 3.2 Skizze zum Verfahren der Biogasertragsbestimmung (Quelle: Zacharias Lochner)

Hierzu diene der Messstand, wie er auf Abbildung 3.2 zu sehen ist.

In eine Wanne Wasser (1), in unserem Fall ein Aquarium, wird Wasser gefüllt. Der Messzylinder (4) mit einem Fassungsvermögen von 2 Litern wird ebenfalls mit Wasser befüllt. Dieser Messzylinder muss eine ebene Oberkante haben. Auf diesen vollen Zylinder wird eine Petrischale gelegt. Sie ist die Abdichtung, denn nun ist der Zylinder mit der Öffnung nach unten vorsichtig aber zügig ins Wasserbecken zu stürzen. Wichtig ist, dass keine Luftblasen bei diesem Vorgang eindringen. Der Zylinder wird an einem Stativ befestigt und der Schlauch mit Verbindung zum Gassammelbeutel (1) in den Messzylinder eingeführt. Der Schlauch wird mit einem Bleigewicht (6) unter Wasser fixiert.

Durch den gasdichten Schlauch (2) kann nun das Biogas, dessen Volumen noch unbekannt ist, herausgedrückt werden. Dafür wurden einige schwere Bücher auf den Gassammelbeutel gelegt, um alles Biogas herausdrücken zu können.

Im Messzylinder (4) verdrängt dieses Gas das Wasser. Das gesamte Gasvolumen von (1) wird so in den Messzylinder überführt und kann dann, sobald sich der Wasserspiegel im Gefäß nicht mehr senkt, an der umgedrehten Messskala abgelesen werden.

Wenn absehbar war, dass der Inhalt eines Gassammelbeutels die 2 Liter übersteigen würde, musste die Messung des Gasertrags auf zwei Mal, wie oben erklärt, durchgeführt werden.

Methan-Volumenprozent-Bestimmung

Vor der Entleerung der Gassammelbeutel wurden aus diesen jeweils mit einer Spritze 60 ml Gas für die Methan-Volumenprozent-Bestimmung entnommen.

Der Inhalt der Spritze wurde dann langsam durch den „Pronova Advanced Gasmittel“-Gasanalysator gedrückt. Dieser Gasanalysator gibt den Methananteil des eingespritzten Gases an. Er basiert auf einem optischen Messprinzip mit Infrarot. Die Anzeigeausgabe erfolgt dabei in Volt. Das Gerät wurde kurz vor der Verwendung mit vier bekannten Gasmischungen kalibriert.

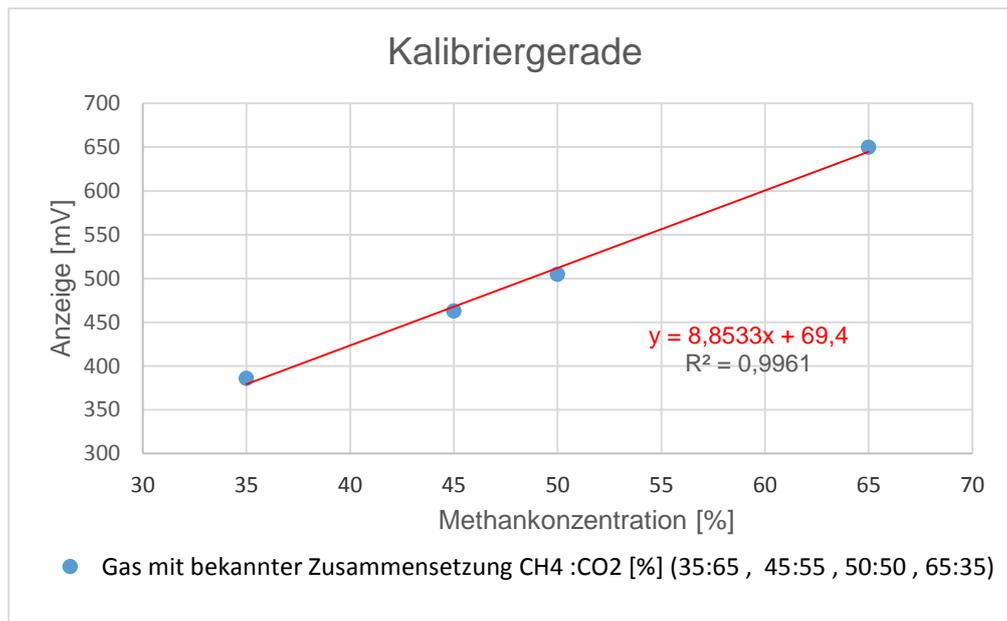


Abbildung 3.3 Kalibriergerade für Methangasanalysator

Die sich daraus ergebende Kalibriergerade ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Was beim Kalibrieren des Geräts auffiel war, dass die Anzeige bei konstantem und bekanntem Gasmischungsverhältnis schwankte. Das Schwanken war im Bereich von ± 10 mV auf der Anzeige zu verzeichnen. Dies entspricht einer Variation von bis zu 5% der Methan-Vol.-%-Angabe. Das Kalibrieren des Gasanalysators war insofern schwierig, als das Angleichen an den „Soll-“ und den „Null-Wert“ der Anzeige über das Drehen an einer kleinen Potentiometerschraube geschieht, diese Drehschraube aber nur schwer im Innern des Analysators zugänglich ist. Auf Grund der vorhergegangenen Schwierigkeiten beim Kalibrieren wurde die Apparatur mittlerweile bedienerfreundlicher mit zwei von außen zugänglichen Potentiometern umgebaut.

3.7. Weitere Berechnung der gewonnenen Daten

3.7.1. Normieren des Volumens

Da Gas je nach Temperatur und Druck unterschiedliche Raumvolumina einnimmt (Ideale Gasgleichung RIEDEL & JANIÁK (2007, S.249ff)) ist es erforderlich den Gasertrag umzurechnen, auf Normaldruck (1013,25 hPa = Meereshöhe) und Normaltemperatur (273,15°K = 0 °C). Dieses dann normierte Volumen wird als Normliter (N_L oder I_N) bezeichnet. Der Normliter ermöglicht den Ertragsvergleich mit anderen Pflanzenmaterialien und errechnet sich wie folgt:

$$p * V = n * R * T \quad (\text{ideale Gasgleichung})$$

$$\rightarrow \frac{p * V}{T} = n * R \quad (n * R = \text{konstant})$$

$$\rightarrow p_{Norm} * \frac{V_{Norm}}{T_{Norm}} = p_{Lab} * \frac{V_{Lab}}{T_{Lab}}$$

$$\rightarrow V_{Norm} = V_{Lab} * \frac{T_{Norm}}{T_{Lab}} * \frac{p_{Lab}}{p_{Norm}}$$

Mit:

p_{Norm}: Druck bei 1013,25 hPa / p_{Lab}: Druck am Messtag

V_{Norm}: Normiertes Volumen / V_{Lab}=gemessenes Volumen am Messtag

T_{Norm}: Standardtemperatur (273,15 K) T_{Lab}=Temperatur am Messtag (291,5 K)

Die Berechnungsformeln für p_{Norm} und T_{Norm} stammen aus RIEDEL (2004). Der Druck am Messtag (18.12.2014) ist hergeleitet von den Aufzeichnungen des meteorologischen Messturms, der im Ökologisch-Botanischen Garten der Universität steht. Dieser Turm befindet sich rund 600 Luftmeter vom Messlabor entfernt. Auf <http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/bayceer/de/klima/5407/BotGar/bgprecetc05.php> ließen sich die Aufzeichnungen des Messturms für diesen Tag nachverfolgen. p_{Lab} betrug 973 hPa. T_{Lab} betrug 18,5°C und ist der Temperaturwert, der auf einem Quecksilberthermometer abgelesen wurde, welches während der Messung im Labor lag.

3.7.2. Berücksichtigung des Kopfvolumens

Das Gasvolumen, welches beim Versuchsende durch Ablesen vom Messkolben ermittelt wurde, beinhaltet neben dem Methananteil, der nur durch die Bakterienaktivität produziert wurde auch das Kopfvolumen, das zu Beginn des Versuchs natürlich kein Methan enthielt, sondern nur mit Luft angefüllt war. Der nach der Gärung gemessene Methangehalt (in Vol.-%) im Sammelbeutel ist damit etwas verdünnt und muss durch die Mischungsformel korrigiert werden:

Mischungsformel:

$$CH4_{kor} = CH4_{gem} * \frac{V_{Kopf} + V_{Lab}}{V_{Lab}}$$

Mit:

CH4_{kor}= korrigierter Methangehalt[%] / CH4_{gem}=Methangehalt durch Kalibriergerade (gemessener CH4-Gehalt)[%] / V_{Kopf}= Kopfvolumen [ml] / V_{Lab}=gemessenes gemischtes Gasvolumen (Kopfvolumen+Biogasvolumen) [ml]

3.7.3. Fehlerrechnung

Um eine Einschätzung des Fehlers, der durch das Messverfahren entstanden ist, abzugeben, wird der absolute Fehler ΔX für jeden errechneten oder gemessenen Wert X angegeben.

Errechnet sich ein Wert X aus mehreren fehlerbehafteten Messwerten, so müssen bei Summen und Differenzen die einzelnen absoluten Fehler der jeweiligen Messwerte addiert werden. Errechnet sich ein Wert X nur aus Produkten oder Quotienten, werden die relativen Fehlerwerte addiert. Ergibt sich ein Wert X aus einem Term, der aus der Summe und dem Produkt einzelner Messwert zusammengesetzt ist, muss für die Fehlerberechnung der Fehler jedes Messwertes, von dem X abhängt, abgeleitet werden („partielle Ableitung“ der Funktionsgleichung).

1. Fall: Wert X ergibt sich aus der Summe/Differenz von Y und Z:

$$X = Y + Z$$

$$\Delta X = \sqrt{(\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2}$$

2. Fall: Wert X ergibt sich aus dem Produkt/Quotient von Y und Z

$$X = Y * Z$$

$$(\text{relativer Fehler}) \frac{\Delta X}{X} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Z}{Z}\right)^2}$$

$$(\text{absoluter Fehler}) \Delta X = X * \sqrt{\left(\frac{\Delta Y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Z}{Z}\right)^2}$$

3. Fall: Wert X ergibt sich aus dem Produkt/Quotient sowie aus der Summe/Differenz von Y,Z und Q

$$X = \frac{Y - Z}{Q} = (Y - Z) * Q^{-1}$$

$$\Delta X = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial Y} \Delta Y\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial Z} \Delta Z\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial Q} \Delta Q\right)^2}$$

$$\Delta X = \sqrt{\left(\frac{1}{Q} \Delta Y\right)^2 + \left(-\frac{1}{Q} \Delta Z\right)^2 + \left(-\frac{Y - Z}{Q^2} \Delta Q\right)^2}$$

In den Ergebnistabellen sind die absoluten Fehler in den Spalten als ΔX zu den jeweiligen Werten X angegeben, im Anhang sind diese Fehler nochmals aufgelistet.

Die Vorgehensweise der Fehlerrechnung lehnt sich an die in Fehleranalyse von TAYLOR (1988) an.

Die Auswertung der Daten und deren Darstellung erfolgte mit MS Office Excel 2013.

4. Ergebnisse

4.1. Ernte

Es wurde an sieben unterschiedlichen Orten Pflanzen geerntet (vgl. Abbildung 2.5). Eine erste Ernte fand zur Blütezeit Ende Juli 2014 an den Standorten ÖBG, H und N statt. Weitere Ernten kamen dann Ende August dazu und eine letzte Anfang November am Standort LL. Insgesamt gelangten neun Proben, davon je zwei am gleichen Standort zu unterschiedlichem Erntetermin (ÖBG und N) in die Untersuchung.

4.2. Trockenmasse

Tabelle 4.1 Ergebnis zur Ermittlung des Trockenmassen(TM)-Anteils

Erntedatum	Standort- kürzel	FM [g]	Δ FM [g]	TM [g]	Δ TM [g]	TM- Anteil [%]	Δ TM- Anteil [%]	Wasser- gehalt [%]
25.07.2014	ÖBG1	760	5	165	1	21,7	0,2	78,3
25.08.2014	ÖBG2	1215	5	254	1	20,9	0,1	79,1
25.07.2014	H	755	5	150	1	19,9	0,2	80,1
25.07.2014	N1	626	5	184	1	29,4	0,3	70,6
25.08.2014	N2	400	5	105	1	26,3	0,4	73,8
14.08.2014	S	690	5	159	1	23,0	0,2	77,0
28.08.2014	P9	870	5	212	1	24,4	0,2	75,6
29.08.2014	PS	655	5	137	1	20,9	0,2	79,1
05.11.2014	LL	1213	5	366	1	30,2	0,1	69,8

ΔX =absoluter Fehler von X

Der Trockenmassenanteil lag beim untersuchten Material in einem Bereich von 19,9 bis 30,2 %. Den niedrigsten Wert nahm die Ernte bei H mit $19,9 \pm 0,2$ % ein, die höchste die Ernte bei den LL mit $30,2 \pm 0,1$ % (Tabelle 4.1). Der Durchschnitt des Trockenmassenteils lag bei 23,3%TM. (Die Standortkürzel finden sich auf Seite 13).

4.3. Ertragshochrechnung

Die Ergebnisse der Biomasse-Ertragshochrechnung sind natürlich sehr abhängig davon, wie dicht der *Sambucus ebulus*-Bestand am jeweiligen Standort war. Die Fläche bei PH war sehr spärlich mit der Staude bedeckt. Keine 100 Meter davon entfernt, bei P9, fand sich aber ein sehr dichter Bestand, bei dem 30 Triebe pro Quadratmeter gezählt wurden.

Tabelle 4.2 Ertragshochrechnung pro Hektar für acht Standorte

Standort- kürzel	Triebe pro m ²	FM je 4 Triebe [g]	TM je 4 Triebe [g]	TM-Anteil [%]	Ertrags- hochrechnung [t FM/ha]	TM pro ha [t TM/ha]
ÖBG1	12	760	165	21,7	22,80	4,95
ÖBG2	12	1215	254	20,9	36,45	7,62
H	10	755	150	19,9	18,88	3,75
N1	17	626	184	29,4	26,61	7,82
N2	17	400	105	26,3	17,00	4,46
S	30	690	159	23,0	51,75	11,93
P9	30	870	212	24,4	65,25	15,90
PS	12	655	137	20,9	19,65	4,11

Aus Tabelle 4.2 ergibt sich, dass das Ertragspotential auf ungedüngten Naturflächen, die nur mit *Sambucus ebulus* bewachsen sind, Biomasse-Erträge von bis zu 16 Tonnen TM pro Hektar liefern, wie bei P9. Den niedrigsten Ertrag hatte die Hochrechnung für den Standort H mit 3,75 t TM/ha, dort wurden lediglich 10 Triebe pro m² gezählt.

Das im Mai 2014 frisch mit jungen Rhizomstecklingen angelegte Zwergholunderfeld der Versuchsflächen zu Energiepflanzen-Dauerkulturen der Landwirtschaftlichen Lehranstalten in Bayreuth (LL) war im Sommer 2014 zur Ernteaufnahme wegen widriger Witterung noch nicht wüchsig genug. Da das Feld in Reihe gesetzt wurde, und die Pflanzen noch keinen entsprechenden Wuchs erlangt hatten, konnte die Triebzahl pro Quadratmeter, wie an den anderen Standorten geschehen, noch nicht aufgenommen werden. Erste zusätzliche Austriebe aus dem Wurzelstock haben sich aber schon in diesem ersten Jahr gebildet, so dass im November etwa vier Triebe pro Pflanze vorhanden waren. Im Sommer 2015 wird die Fläche wahrscheinlich schon vergleichbar dicht stehen, wie auf Abbildung 2.4 zu sehen. Dann ist auch eine Ertragshochrechnung der Fläche bei LL möglich und sinnvoll.

4.4. Veraschung

Tabelle 4.3 Ermittlung der organischen Trockensubstanz (oTM) durch Veraschung

Kürzel	Gewicht Schale [g]	Δ Gewicht Schale [g]	Gewicht Einwaage TM [g]	Δ Gewicht Einwaage TM [g]	Gewicht Schale +Asche [g]	Δ Gewicht Schale +Asche [g]	Gewicht Asche [g]	Δ Gewicht Asche [g]	Organik [g]	Δ Organik [g]	oTM-Anteil [%]	Δ oTM-Anteil [%]
N1	38,868	0,001	3,000	0,001	39,063	0,001	0,195	0,001	2,805	0,002	93,5	0,1
N2	41,014	0,001	3,000	0,001	41,194	0,001	0,179	0,001	2,821	0,002	94,0	0,1
PH	40,147	0,001	3,000	0,001	40,326	0,001	0,179	0,001	2,822	0,002	94,0	0,1
P9	40,034	0,001	3,000	0,001	40,239	0,001	0,205	0,001	2,795	0,002	93,2	0,1
S	42,826	0,001	3,000	0,001	43,029	0,001	0,204	0,001	2,797	0,002	93,2	0,1
H	16,371	0,001	3,000	0,001	16,544	0,001	0,173	0,001	2,827	0,002	94,2	0,1
ÖBG1	15,719	0,001	3,000	0,001	15,993	0,001	0,274	0,001	2,726	0,002	90,9	0,1
ÖBG2	15,238	0,001	3,000	0,001	15,487	0,001	0,249	0,001	2,751	0,002	91,7	0,1
LL	16,589	0,001	3,000	0,001	16,934	0,001	0,345	0,001	2,655	0,002	88,5	0,1

$\Delta X = \text{absoluter Fehler von } X$

Die Ergebnisse der Veraschung zeigen, dass das oberirdische *Sambucus ebulus*-Material einen hohen organischen Anteil aufweist. Alle Proben hatten einen oTM-Anteil von meist über 90 %. Die Ernte, die im November vorgenommen wurde (LL) wies den niedrigsten Wert mit 88,5% oTM auf, die von Ende Juni (H) den höchsten mit 94,2% oTM.

Je höher der Anteil der Organik im Pflanzensubstrat ist, desto ergiebiger ist die Biogasproduktion (SCHULZ & EDER 2001, S.27). Das belegt auch Abbildung 4.1. mit der Darstellung des Biogasertrages im Verhältnis zum oTS-Anteil.

Dort ist ein deutlicher Aufwärtstrend des Verhältnisses Biogasproduktion zu oTM-Anteil zu erkennen ist. Noch deutlicher wird dieser, wenn man den Punkt vom Standort LL aus der Betrachtung wegnimmt, dessen Wert ausreißt (Abbildung 4.1). Wahrscheinlich weil er im November, fast am Ende der Vegetationsperiode aufgenommen wurde.

Die Wertermittlung des organischen Anteils ist durch das genaue Wiegen mit der Analysenwaage ($\pm 0,001\text{g}$) mit einem geringen systematischen Fehler behaftet. Der organische Anteil des Pflanzenmaterial für den Werte zwischen 88,5 und 94,2 % oTM ermittelt wurden, ist mit einem absoluten Fehler von $\pm 0,1$ % oTM behaftet.

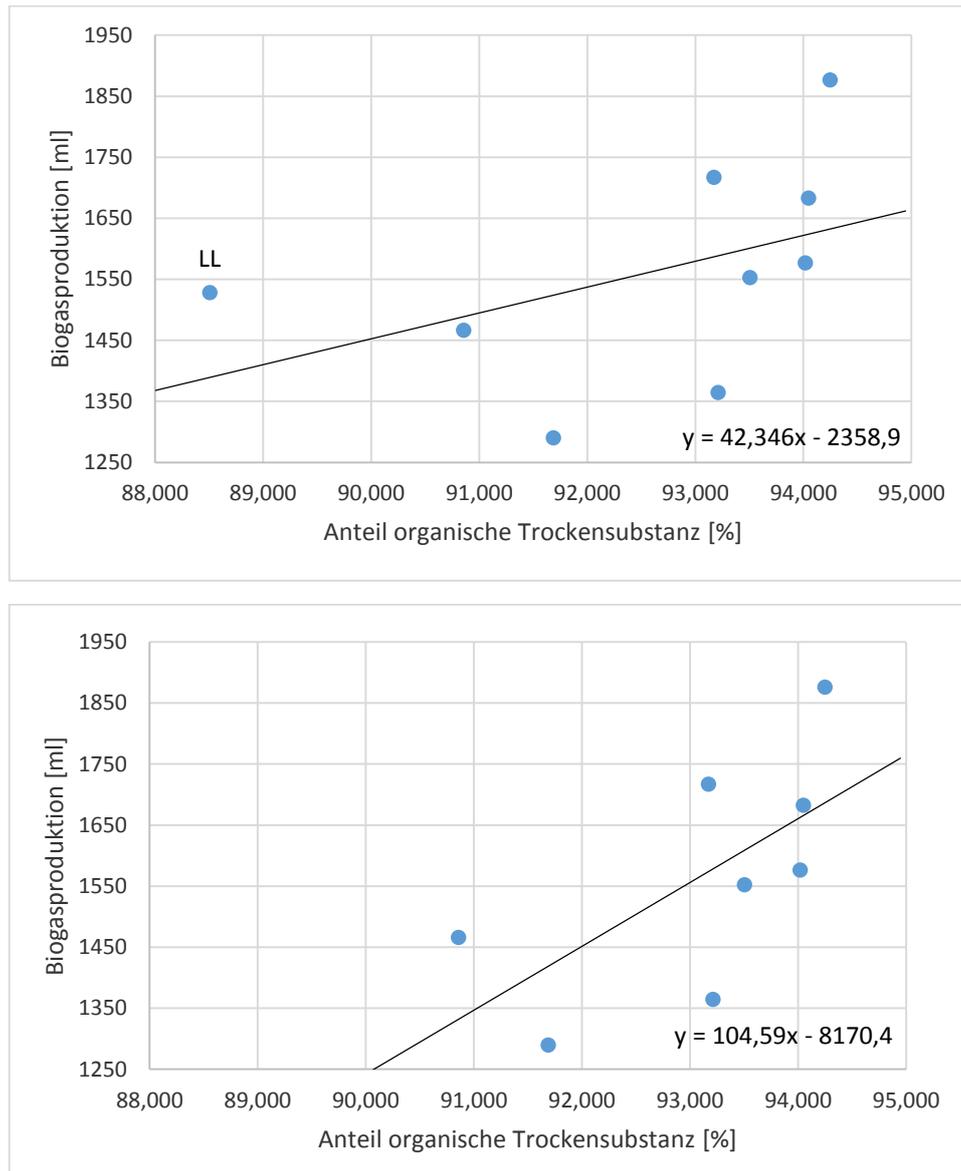


Abbildung 4.1 Darstellung des Biogasertrags im Verhältnis zum oTS-Anteil mit eingezeichneter Regressionsgerade. Ein blauer Punkt pro Ernte. Grafik oben: Mit dem Ausreiserwert von LL. Grafik unten: ohne LL

4.5. Methanbildungspotential

Die wichtigsten Messergebnisse und Umrechnungen, die der Studie zur Untersuchung des Methanbildungspotentials von *Sambucus ebulus* zugrunde liegen, sind aus der folgenden Tabelle 4.4 zu entnehmen. Hauptaugenmerk ist dabei auf die Spalte „Methan Gasertrag [NL/kg oTM]“ zu legen. Aus ihr ist zu lesen, wie viel Methan aus den jeweiligen Substraten entstanden ist. Der Wert ist genormt und auf Normaldruck und Normaltemperatur gebracht, um die gängige Einheit NL/kg oTM zu erhalten.

Die Tabelle zeigt, dass der weitaus niedrigste Wert mit der Referenzprobe Cellulose mit 179 NL/kg oTM erreicht wird. Bei den Daten, die das Gärverhalten der Zwergholunderproben widerspiegeln (grün hinterlegt) hat das größte Biogasvolumen der Gäransatz mit Material aus H erreicht, und zwar 2661 ml, das niedrigste waren 2.009 ml mit Material aus ÖBG2. Den höchsten korrigierten Methan-Volumenanteil des produzierten Biogases hatte die Probe aus S mit 82% CH₄ bei insgesamt 2451 ml V_{Lab}. Die Ernten bei N1 und N2 und ÖBG1 und ÖBG2 unterschieden sich hinsichtlich der verschiedenen Erntezeitpunkte kaum. Bei N1 wurden 294 NL(CH₄)/kg oTM vom Material produziert, am späteren Termin (N2) 19 NL/kg oTM Methan weniger. Ein umgekehrtes Ergebnis ergibt sich bei ÖBG1 mit 231 NL(CH₄)/kg oTM und beim späteren Erntetermin (ÖBG2) 20 NL/kg oTM Methan mehr.

Der Durchschnitt in der Methanausbeute für die Daten mit *Sambucus ebulus* beträgt 292 NL(CH₄)/kg oTM.

Da jeweils nur ein Messwert pro Ernte dem Methanbildungspotential zugrunde liegt, ist eine weitere statistische Auswertung der Ergebnisse mit Tests nicht sinnvoll.

Tabelle 4.4 Methanbildungspotential; Ergebnistabelle

Kopfvolumen Schott(+Schlauch)		Kopfvolumen Simax(+Schlauch)		Schlauchvolumen		Normaltemperatur		Temperatur am Messtag		Druck am Messtag		Normaldruck		
[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[K]	[K]	Messtag [K]	Messtag [hPa]	Messtag [hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	
358,76	358,76	338,76	338,76	3,76	3,76	273,15	273,15	291,65	973	973	1013,25	1013,25	1013,25	
Garansätze	Einwaage Material TM [g]	Einwaage Material oTM [g]	Kopfvolumen [ml]	gemessener Gasvolumen (V _{Lab}) [ml]	Biogasvolumen (V _{Lab} -V _{kopf}) [ml]	Gasvolumen ohne 800ml Gülle (=575ml)[ml]	Gasvolumen ohne Gülle auf Normvolumen [Nm]	Biogas - Güllévolumen (V _{Lab} -V _{kopf} -V _{Gülle}) [Nm]	Anzeige Gasanalysator [mV]	Methanengehalt durch Kalibriergerade [%]	korrigierter Methanengeh. mit Mischungsformel[%]	Methangas Norm Volumen [Nm(CH ₄)]	Methan Gasertrag [Nm(CH ₄)/kg oTM]	Biogasertrag [Nm/kg oTM]
Gülle1	0	0	71,06	813	742				555	55	60			
Gülle2	0	0	65,26	831	766				555	55	59			
Gülle3	0	0	68,76	705	636				555	55	60			
N1	5,000	4,675	358,8	2660	2301	2085	1875	1553	642	65	73	1376	294	332
N2	5,000	4,701	337,8	2666	2328	2091	1881	1577	609	61	69	1291	275	335
PH	5,000	4,703	358,8	2805	2446	2230	2006	1683	587	58	66	1323	281	358
P9	5,001	4,659	358,8	2843	2484	2268	2040	1717	650	66	74	1506	323	369
S	5,001	4,661	358,8	2451	2092	1876	1687	1365	700	71	82	1378	296	293
H	5,001	4,713	358,8	3020	2661	2445	2199	1876	671	68	76	1672	355	398
ÖBG1	5,000	4,543	337,8	2543	2205	1968	1770	1466	533	52	59	1050	231	323
ÖBG2	5,001	4,585	337,8	2347	2009	1772	1594	1290	629	63	72	1152	251	281
LL	5,000	4,425	337,8	2612	2274	2037	1832	1528	670	68	77	1404	317	345
Cellulose	3,000	2,970	338,8	2132	1793	1557	1400	1096	359	33	38	531	179	369

Daten mit *Sambucus ebulus*

4.5.1. Eigene Methanproduktion der verwendeten Gülle

Die Gülle hat nach eigener Überprüfung eine Dichte, die der von Wasser nahezu gleich kommt, also 1 kg/L (In eine Flasche passten 1154,3 g Wasser, in die selbe Flasche passten genau 1,154 Liter der Gülle).

Drei Gäransätze nur mit Gülle und jeweils über 1000 ml Befüllung wurden zusätzlich angesetzt, um den Biogasertrag von Gülle ohne Pflanzenmaterialzugabe zu ermitteln. Aus diesen drei Gülleansätzen wurde errechnet, dass 800 ml Gülle (die Menge, mit denen *Sambucus ebulus*-Material angesetzt wurden) 575 ml Biogas produzieren.

Tabelle 4.5 Gasertrag von 800 ml reiner Gülle (Nullprobe)

Gülleflaschen	Befüllung[ml]	Δ Befüllung[ml]	Gasertrag [ml]	Δ Gasertrag [ml]
G1	1087	2	813	23
G2	1093	2	831	23
G3	1089	2	705	23
Gmittel	1089	2	783	23
G x	800	0	575	17

ΔX =absoluter Fehler von X

5. Diskussion

Ist *Sambucus ebulus* als Energiepflanze für die Methanproduktion zu empfehlen?

Aus den Ergebnissen der Ernte, des Trockenmassenanteils, der Ertragshochrechnung, der Veraschung und des Methanbildungspotentials mit Methangehalt leiten sich Werte ab, die prinzipiell für einen ertragreichen Anbau des Zwergholunders sprechen.

Im Einzelnen ergaben sich für die **Ertragshochrechnung** Flächenerträge von bis zu 52 t FM/ha für die betrachteten Wildstandorte des Zwergholunders. Im Vergleich dazu liefert Mais im Mittel Ernteerträge von 45 t FM/ha (vgl. FRIEHE ET AL. 2010). *Sambucus ebulus* scheint demnach vom Ertrag her eine vielversprechende „neue“ Energiepflanze zu sein. Bei einem großflächigen Anbau mit Zwergholunder ist jetzt auch schon zu vermuten, dass die Erträge noch weit über 16 t TM/ha hinausreichen werden. Auf Ackerböden ist durch Düngung und optimaleren Bodenbedingungen von noch besserem Wuchs auszugehen. Die bepflanzte Fläche bei LL, die in diese Ertragshochrechnung noch nicht einging, wird vermutlich bei der nächsten Ernte entsprechend höhere Ernteerträge liefern. Es bleibt natürlich zu überprüfen, ob diese Erträge auch langfristig erreicht werden und damit die aufwendige Etablierung von Zwergholunder-Feldes rechtfertigen.

Die durchgeführte **Ermittlung des Trockenmassenanteils** lässt die Frage noch offen, ob *Sambucus ebulus* zur Silierung geeignet ist. Ein optimaler Trockenmasse-Anteil für die Silierung (Haltbarmachen) wäre 28-36%TM, diese Werte gelten für Mais (vgl. FRIEHE et al. 2010). Ein Mittelwert von 23,3%TM bei den untersuchten Pflanzen lässt das Risiko von Sickerwasseraustritt beim Silieren offen, deutet aber auch darauf hin, dass der Ligninanteil gering ist und die Abbaubarkeit somit hoch. Die Frage ob das Pflanzenmaterial bei späterer Ernte einen signifikant höheren TM-Anteil hat, kann bei den vorliegenden Werten noch nicht bestätigt werden.

Bei der **Veraschung** wurde ein Organik-Anteil von rund 90 % für die neun Proben ermittelt. Damit liegen die Ergebnisse ganz im Rahmen des zu Erwartenden für Stauden. Diese Ergebnisse decken sich auch mit denen von MÜLLER (2012, S.64), der ebenfalls Stauden für die Biogasproduktion untersuchte. Der Biogasertrag verhält sich proportional zum Organik-Anteil. Obwohl der niedrigste Organik-Anteil bei der spätesten Ernte bei LL im November erreicht wurde (88,5 %), lässt sich mit neun Aufnahmen noch keine klare Tendenz zu höherem Organik-Anteil abhängig vom Erntetermin ableiten.

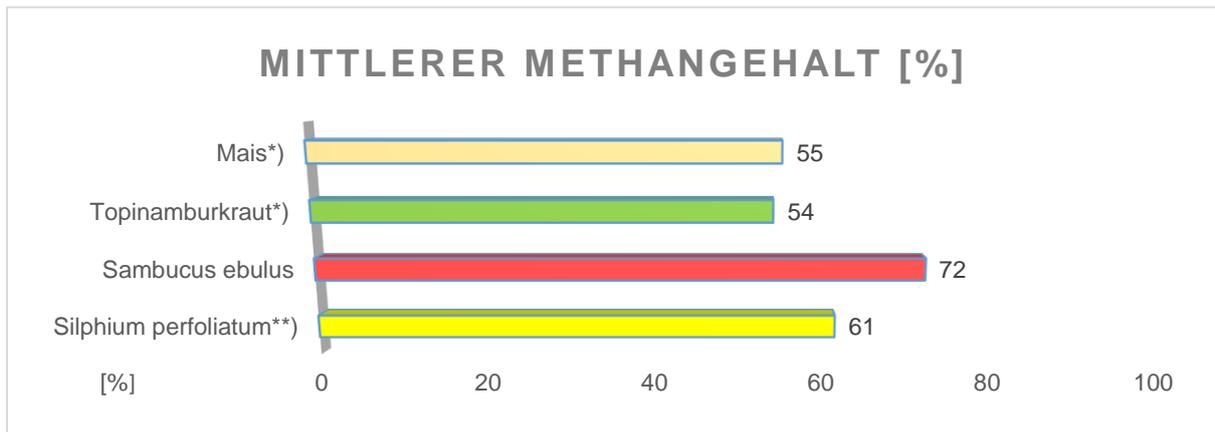


Abbildung 5.1 Diagramm des mittleren Methangehalts des Biogases in Vol.-% von vier verschiedenen Pflanzen-Substraten.

*) aus FNR (2010), **) aus MÜLLER (2012)

Der noch unkorrigierte **Methangehalt** im Biogas war unerwartet hoch, sodass die Kalibrierpunkte für die gemessenen Methangehalte eigentlich zu niedrig lagen. Kalibriert wurde mit Gasmischungen mit 35, 45, 50 und 65 Vol.-% Methan, gemessen wurden Methangehalte zwischen 52 und 71 Vol.-%. Die durch die Mischungsformel korrigierten Methangehalte lagen dann bei durchschnittlich 72 Vol.-%. Wie Abbildung 5.1 zeigt, ist dieser Wert im Vergleich zu anderen Substraten, aus denen über Methan Bioenergie gewonnen wird, herausragend hoch.

Es wäre zu erwarten gewesen, dass diese hohen Methangehalte im Biogas auch im Verhältnis vergleichbar hohe Methanerträge ($N_{L(CH_4)}/kg\ oTM$) bedeuten.

Abbildung 5.2 (Mittlerer Methanertrag [$N_L/kg\ oTM$]) zeigt aber, dass das Verhältnis nicht das gleiche ist.

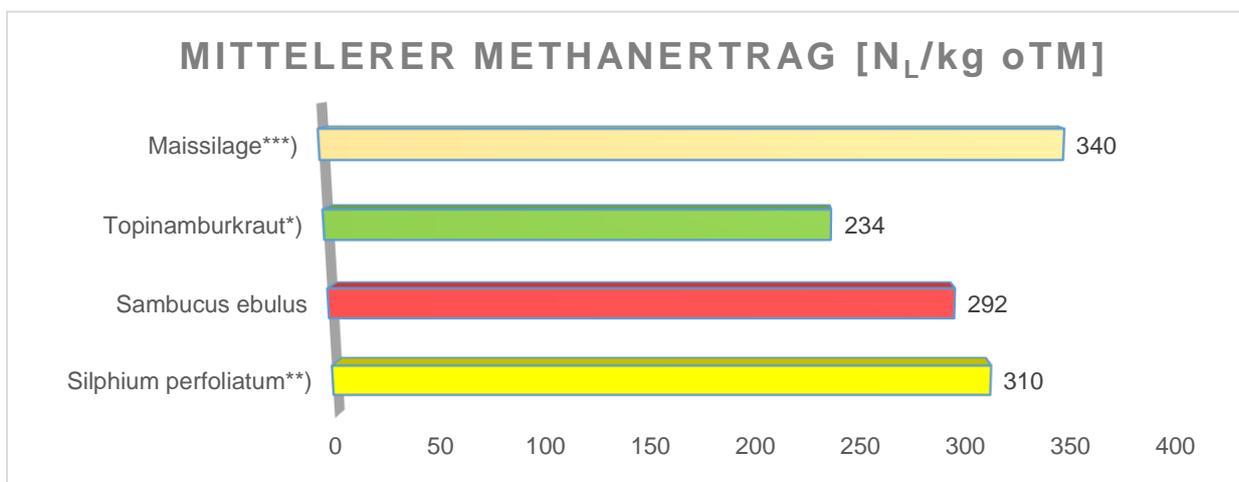


Abbildung 5.2 Diagramm des mittleren Methanertrags in $N_L/kg\ oTM$ von vier verschiedenen Pflanzen-Substraten

*) aus FNR (2010), **) aus MÜLLER (2012), ***) aus FRIEHE et al. (2013)

Das *Sambucus ebulus*-Gärssubstrat hat zwar dem Methangehalt gemäß gute Ergebnisse für das **Methanbildungspotential** gebracht (231-355 $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM), kommt aber nicht über die in der Literatur zu finden Werte von Silomais als Gärsubstrat mit rund 340 $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM (FRIEHE et al. 2013) hinaus. Der von MÜLLER (2012) errechnete Wert für *Silphium perfoliatum* liegt mit etwa 310 $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM auch über dem mittleren Methanertrag vom Zwergholunder (292 $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM). Lediglich Topinambur liegt mit einem mittleren Methanertrag von 234 $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM unter dem von *Sambucus ebulus*.

Die hier präsentierten Werte beziehen sich dabei vorwiegend auf Wildstandorte, die alle im Vergleich zu Mais ungedüngt sind. Ausreißer nach unten fließen gleichwertig in den durchschnittlichen Methanertrag für *Sambucus ebulus* von 292 $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM ± 30 $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM ein. Einzelne Ergebnisse, wie bei H mit 355 $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM reichten sogar noch über die genannten Methanerträge von Silomais hinaus!

Fehlerdiskussion

Beim Umgang mit Pflanzenmaterial, das generell mit biologischen Schwankungen behaftet ist, benötigt es viele Wiederholungen, um die Streubreite abzuschätzen. Dadurch, dass die Versuche im Rahmen der Bachelorarbeit jeweils nur mit einem Gäransatz des jeweiligen Pflanzenmaterials durchgeführt werden konnten, kann die Fehlerdiskussion der vorliegenden Arbeit biologisch bedingte Schwankungen nicht behandeln (Ernten über mehrere Jahre wären dafür nötig). Eine Einschätzung des Fehlers auf Grund des Messverfahrens war aber möglich. Sie ist im Anhang auf Seite 41 aufgeführt in Form einer Tabelle aufgeführt. Bedingt durch das Messverfahren ergibt sich beim Endwert, dem Normliter Methangasertrag pro kg oTM ein relativer Fehler von ± 7 -11% des $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM Wertes (11% für den Cellulose-Wert).

Weitere Quellen für Ungenauigkeiten sind folgende:

Es könnte beim Aufarbeiten des *Sambucus ebulus*-Materials zu Verunreinigungen gekommen sein, vor allem beim Homogenisieren des Pflanzenmaterials, für das dieses mit einem Gartenhäcksler vorzerkleinert wurde. Dabei waren noch sehr geringe Pflanzenrückstände von anderen Arbeiten im Auffangbehälter des Häckslers vorhanden. Es wurde darauf geachtet, dass beim Zerkleinern des Materials auch wirklich nur das gewünschte Material zur Weiterverwendung entnommen wurde. Es lässt sich jedoch nicht komplett ausschließen, dass sich auch Pflanzenmaterial einer Ernte mit dem einer anderen vermischt hat.

Das wiederum würde bedeuten, dass die vorliegenden Werte nicht ganz exakt das Gärverhalten einen bestimmten Ernte widerspiegeln könnten. Der Einfluss auf das Gärverhalten durch solche Verunreinigungen ist aber vernachlässigbar.

Um das exakte Volumen von Methan zu erhalten, das ein Kilogramm organisches und trockenes ($NL_{CH_4}/\text{kg oTM}$) Zwergholundermaterial produziert, wurden die Proben immer wieder getrocknet. Allerdings wurde das pulverisierte Material nach der Trocknung nicht noch in einem Exsikkator abkühlt, der durch Silicagel verhindern würde, dass das Material Wasser zieht. Bei der Einwaage des neun mal 5,000 g *Sambucus ebulus*-Materials für die Gäransätze war auf der Analysenwaage eine Gewichtszunahme im Bereich von 0,1µg zu erkennen. Diese hygroskopische Eigenschaft des Materials ist aber von der Größenordnung her vernachlässigbar (der absolute Fehler des organischen Trockenmassenanteils liegt bei gerade einmal $\pm 0,1\%$ oTM).

Eine große Ungenauigkeit unterliegt der Tatsache, dass die Gärstände nicht anaerob aufgebaut waren. Was in der Biogasanalgen-Praxis und in der gängigen Literatur (vgl. LEMMER 2011) beschrieben wird, sind Anlagen, bei denen anaerobe Mikroben, beziehungsweise Archäen angesprochen werden. Im Rahmen des verwendeten Gärstandes ergeben sich aber, durch das Kopfvolumen (338 ml bzw. 358 ml Luft auf 800 ml Gärmaterial) verursacht, Startbedingungen, die nicht anaerob waren. Was also in der vorliegenden Studie zu sehen ist, sind Ergebnisse für Methanbildungspotentiale mit *Sambucus ebulus*-Substrat, die sich auf die Aktivität von zumindest aerotoleranten Methanbildnern zurückführen lassen.

Wie groß der Einfluss auf das Methanbildungspotential ist, dadurch, dass an der Flüssigkeitsoberkante obligat anaerobe Methanogene im Gärstand (siehe Methodik S.20) gehemmt wurden, darüber lässt sich keine Aussage treffen, nur eben dass sie vermutlich gehemmt wurden. Ein ausreichend anaerober Gärstand oder einfach ein Fermenter, wie er auch in der Bioenergietechnik verwendet wird, der auch obligat anaerobe Mikroorganismen anspricht sollte demnach noch korrektere Ergebnisse liefern. Jedoch ist anzunehmen, dass diese Fehler vergleichsweise gering sind und überlagert werden von den Zufälligkeiten, die bei der Auswahl und Ernte der Pflanzentriebe entstanden.

Cellulose als Referenzprobe

Zum Versuchsstand gehörte ein Gäransatz mit mikrokristalliner Cellulose. Es wird davon ausgegangen, dass diese einen oTS-Anteil von 99% hat. Nach VDI (2006, S.53) wird empfohlen, die Cellulose als Referenzprobe einzusetzen. Bei 100%igem Umsatz würde daraus eine Gasmenge von 740-750 NL/kg oTS entstehen. Dieser Wert sollte nach VDI (2006) zu 80 % erreicht werden. Dann kann davon ausgegangen werden, dass die biologisch aktive Masse eine ausreichend gute Leistungsfähigkeit besitzt. In der vorliegenden Studie produzierte die Cellulose-Referenzprobe einen Biogasertrag von 396 NL/kg oTS, die 80% Marke wurde also nicht erreicht. Nach VDI (2006) bedeutet dies, dass die Leistungsfähigkeit der biologisch aktiven Masse (also der Gülle) nicht ausreichend war.

Da die Biogaserträge bei den Gäransätzen mit *Sambucus ebulus* vernünftige und gute Ergebnisse lieferten, besteht die Möglichkeit, dass während des Ansetzens der Cellulose-Referenzprobe Fehler unterlaufen sind. Ansetzten mehrerer Referenz-Gärungen, wie Substrat-Gärungen (siehe Ausblick) könnte die Fehlerquelle hierbei klären. Es ist geplant in Folgeversuchen auf diese Ungenauigkeit noch gesondert einzugehen, insbesondere sollen Versuche mit unterschiedlich alter Gülle angesetzt werden.

Am Ende dieser Diskussion lässt sich sagen, dass *Sambucus ebulus* durchaus zum Anbau empfohlen werden kann. Obwohl das untersuchte Pflanzensubstrat mit Fehlern und Ungenauigkeiten behaftet ist, liefert es verwertbare Ergebnisse. Hohe Erträge, hohe Methangehalte und letztlich auch die bei 2.4. angedeutete allelopathische Wirkung des *Sambucus ebulus* Wurzelstockes, die für wenig Aufwand bezüglich der Unkrautbekämpfung ab einem bestimmten Wuchs sorgt, deuten auf eine gute Eignung der Pflanze als Gärsubstrat für Biogasanlagen hin.

6. Ausblick

Während die vorliegende Studie bei den Wildbeständen von *Sambucus ebulus* bereits zu guten Ergebnissen kam, ist zu erwarten, dass feldmäßig angelegte und gedüngte Bestände noch höhere Erträge liefern werden.

Weiterer Forschungsbedarf für diese Versuchsreihe besteht für die verwendete Gülle und den Cellulose-Referenzwert. Bei der Ermittlung des Cellulose-Referenzwertes kam es zu offensichtlichen Unklarheiten. Die Ergebnisse einer Versuchsreihe mit neuer und alter Gülle wären interessant. Dabei könnten anstatt des Methanbildungspotentials eines bestimmten Pflanzensubstrats, das Methanbildungspotential mehrerer Gäransätzen nur mit Gülle und dem Referenzsubstrat Cellulose betrachtet werden. Damit wäre zu prüfen, inwieweit verschiedene Güllearten zu unterschiedlichen Methanerträgen führen. In der Studie ist davon ausgegangen worden, dass das Inokulum (Gülle) im Überfluss für die zu vergärende Probenmenge vorhanden war, dass also sämtliches, fein gemahlene Pflanzenmaterial vergoren wurde. Die relativ geringen Ergebnisse für die Cellulose-Referenzprobe lassen an dieser Ansicht gewisse Zweifel.

Die Frage der Silierbarkeit ist ein weiteres lohnenswertes Forschungsgebiet im Rahmen der Eignungsfeststellung des Zwergholunders als Biogas-Energiepflanze.

Darüber hinaus ist eine Betrachtung des Spurengases H_2S in weiteren Untersuchungen interessant. Das Gas sollte für eine reibungslose Nutzung in Biogasanlagen nur in geringsten Mengen im Biogas von *Sambucus ebulus* vorhanden sein (FRIEHE et al. 2010).

7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurde die Staude *Sambucus ebulus* als mögliche Energiepflanze zur Biogasproduktion vorgestellt und auf ihr Methanbildungspotential hin untersucht.

Die in Europa einheimische Zwergholunder-Staude zeichnet sich durch üppigen und blütenreichen Wuchs aus, der einem breiten Spektrum an Insekten Lebensraum bietet. Ein mögliches Ausbreiten der Art von den Ackerstandorten, wie bei anderen Neophyten in der Energiepflanzenproduktion, birgt kein unvorhersehbares Gefahrenpotential in sich, da der kalkholde Zwergholunder bereits zur heimischen Flora gehört. Weil *Sambucus ebulus* nicht zum Verzehr geeignet ist, steht nicht zur Debatte, ob die Pflanze besser zur Nahrungsmittel- statt zur Energieproduktion angebaut werden sollte.

Für die Datenerhebung dieser Studie wurde *Sambucus ebulus*-Material von neun Standorten in Oberfranken zwischen Juli und November 2014 geerntet, gewogen, in mehreren Schritten getrockneten, homogenisiert und verascht. Schließlich wurde der Biogasertrag der Pflanze ermittelt, der sich nach 30 Tagen in einem Gärstand mit Gülle ergab. In dieser Untersuchung stellte sich *Sambucus ebulus* als sehr biomassereiche Pflanze dar. Mit einem Hektarertrag von bis zu 65 t FM, bei einem durchschnittlichen Trockenmassenanteil von 23,3 %, einem organischen Trockenmassenanteil von durchschnittlich 92,6 % oTM sowie hohen Methangehalte im Biogas von $\bar{\varnothing}$ 72 Vol.-%, erfüllt *Sambucus ebulus* die Voraussetzungen für eine Energiepflanze zur Biogasproduktion.

Auch wenn der ungedüngte *Sambucus ebulus* mit einem Methanertrag von $\bar{\varnothing}$ 292 $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM noch hinter Mais mit $\bar{\varnothing}$ 340 $N_{L(CH_4)}/kg$ oTM (FRIEHE et al. 2013) liegt, stellt die Pflanze auch aus ökologischen Gesichtspunkten eine lohnenswerte Anbaualternative zu den Maismonokulturen dar.

Weitere Untersuchungen, vor allem auf angepflanzten und gedüngten Ackerstandorten scheinen vielversprechend zu werden. Es ist davon auszugehen, dass dort noch höhere Biomasse- und Methanerträge erzielt werden können.

8. Quellenverzeichnis

BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (Hrsg.) (2007): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. - Gelbes Heft. Freising-Weihenstephan. 8. Auflage.

BAYRISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK (2014): Pressemitteilung vom 28.07.2014 unter: https://www.statistik.bayern.de/presse/archiv/2014/221_2014.php., Abgerufen am 04.11.2014

(BFN) BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (Hrsg.) & (NetPhyD) Netzwerk Phytodiversität Deutschlands (2014): Verbreitungsatlas der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands. Münster: Landwirtschaftsverlag. 1. Auflage.

BRANDES, D. (1982?): Das Sambucetum ebuli Felf. 1942 im südlichen Mitteleuropa und seine geographische Gliederung. - Institut für Botanik: TU Braunschweig. 14 S. http://rzbl04.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00001652/Document.pdf Abgerufen am 06.11.14.

BROHMER, P. & SCHAEFER, M. (2002): Fauna von Deutschland. Ein Bestimmungsbuch unserer heimischen Tierwelt. - Wiebelsheim: Quelle & Meyer Verlag. 21. Auflage.

ELLENBERG, H. & LEUSCHNER, C. (2010): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. Stuttgart: Eugen Ulmer KG. 6. Auflage, Kapitel 27 unter: http://www.utb-shop.de/downloads/dl/file/id/27/zusatzkapitel_zeigerwerte_der_pflanzen_mittleuropa_s.pdf, Abgerufen am 31.10.2014.

ELLENBERG, H., WEBER, H., DÜLL, R., WIRTH, V. & PAULIßEN, D. (1991): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. - Göttingen: Verlag Erich Glotze KG.

(FAZ) FRANKFURTER ALLGEMEINE ZEITUNG (2012): Deutschland „vermaist“. Erschienen am 18.08.2012 in der Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung. <http://www.faz.net/aktuell/politik/inland/tank-oder-teller-deutschland-vermaist-11860119.html>., Abgerufen am 17.02.2015

(FNR) FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (Hrsg.) (2013): Energiepflanzen für Biogasanlagen. Rostock: Druckerei Weidner. 2. Auflage.

(FNR) FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (Hrsg.) (2010): Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen. Gülzow. 3. Auflage.

FRIEHE, J., WEILAND, P. & SCHATTAUER, A. (2010): Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung - Gülzow: (FNR) Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.). 5. Auflage.

FRIEHE, J., SCHATTAUER, A. & WEILAND, P. (2013): Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung - Gülzow: (FNR) Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.). 6. Auflage.

HEGI, G. (1918): Illustrierte Flora von Mitteleuropa. - München: J .F. Lehmann´s Verlag. Band VI.

- HUNDT, B. (2010): Energie- und Klimateffizienz von Biogasanlagen mit Biogasaufbereitung und -einspeisung unter Nutzung von Silomais-Untersuchungen am Beispiel der Biogasanlage der HSE AG in Darmstadt-Wixhausen. - Gießen: Boden und Landschaft **55**: 1-202.
- KIEFER, J., BALL, T., KARCH, U. & KÖPPEL, W. (2011) Energiepflanzenanbau und Gewässerschutz - in: Bajohr, S. & Graf, F. (Hrsg). Biogas-Erzeugung-Aufbereitung-Einspeisung - München: Oldenbourg Industrieverlag.
- LEMMER, A. (2011): Biogaserzeugung. – in: Bajohr, S. & Graf, F. (Hrsg). Biogas-Erzeugung-Aufbereitung-Einspeisung - München: Oldenbourg Industrieverlag.
- MÜLLER, B. (2012): Vergärung alternativer Energiepflanzen zur Gewinnung von Biogas. Aufbau eines Gärstandes. - Masterarbeit Universität, Bayreuth. Lehrstuhl für Pflanzenökologie.
- OBERDORFER, E. (1983): Süddeutsche Pflanzengesellschaften. - Jena: VEB Gustav Fischer Verlag. Band 10, Teil III. 2. Auflage.
- PERING, F. & WALTERS, S. (1976): Atlas of the British Flora. - Ilkley: EP Publishing Limited. 2. Auflage.
- RIEDEL, E. & JANIÁK, C. (2007): Anorganische Chemie. - Berlin: de Gruyter Verlag. 7. Auflage.
- RIEDEL, E. (2004.): Anorganische Chemie. - Berlin: de Gruyter Verlag. 6. Auflage.
- ROTH, L., DAUNDERER, M. & KORMANN, K. (2012): Giftpflanzen Pflanzengift. Vorkommen, Wirkung, Therapie. Allergische und phototoxische Reaktionen. - Hamburg: Nikol-Verlag. 6. Auflage.
- ROTHMALER, W. & JÄGER, E. (Hrsg.) (2011): Exkursionsflora von Deutschland. Gefäßpflanzen: Grundband. - Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. 20. Auflage.
- SCHULZ, H. & EDER, B. (2001): Biogas Praxis-Grundlagen, Planung, Anbau, Praxis. - Freiburg: Ökobuch. 2. Auflage.
- SHOKRZADEH M. & SAEEDI SARAVI S.S. (2010) The chemistry, pharmacology and clinical properties of *Sambucus ebulus*: a review. - Journal of Medicinal Plants Research. **4**:95–103. http://www.academicjournals.org/article/article1380375358_Shokrzadeh%20and%20Saravi.pdf, Abgerufen am 02.02.15.
- SPONAGEL, H. (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. - Stuttgart: Schweizerbart. 5. Auflage.
- STRASBURGER, E., WEILER, E.W., KADEREIT, J.W., BRESINSKY, A. & KÖRNER, C. (2002): Lehrbuch der Botanik. - Berlin: Spektrum Akademie Verlag. 25. Auflage.
- TUTIN, T., HEYWOOD, D., BURGESS, N., MOORE, D., VALENTINE, D., WALTERS, S. & WEBB, D. (eds.) (1984): Flora Europaea. - Cambridge: Cambridge University Press. Volume 4. 2. Auflage.

(VDI) VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2006): VDI-Richtlinie 4630 - Vergärung organischer Stoffe. Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche - Fermentation of organic materials. - Düsseldorf. 2. Ausgabe.

VOGL, S., PICKER, P., MIHALY-BISON, J., FAKHRUDIN, N., ATANASOV, AG., HEISS, E., WAWROSCHEK, C., REZNICEK, G., DIRSCH, V., SAUKEL, J. & KOPPA, B. (2013): Ethnopharmacological in vitro studies on Austria's folk medicine - An unexplored lore in vitro anti-inflammatory activities of 71 Austrian traditional herbal drugs. - Journal of Ethnopharmacology **149**: 750-771.

YESILADA, E. (1998): Evaluation of the anti-inflammatory activity of the Turkish medicinal plant *Sambucus ebulus*. - Chemistry of Natural Compounds **33**: 539-540.

Anhang

Tabelle A.8.1 Fehler pro Wert

Gäransätze	Gülle1	Gülle2	Gülle3	N1	N2	PH	P9	S	H	ÖBG1	ÖBG2	LL
Einwaage Material TM [g]	0	0	0	5,0000	5,0002	5,0004	5,0008	5,0006	5,0005	5,0004	5,0009	5,0001
Δ Einwaage Material TM [g]	0	0	0	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Einwaage Material oTM	0	0	0	4,6752	4,7011	4,7027	4,6593	4,6611	4,7128	4,5432	4,5852	4,4254
Δ Einwaage Material oTM	0	0	0	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0032
Kopfvolumen [ml]	71,06	65,26	68,76	338,8	338,8	338,8	338,8	338,8	338,8	338,76	338,76	338,76
Δ Kopfvolumen [ml]	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
gemessenes gemischtes Gasvolumen (V_{Lab}) [ml]	813	831	705	2660	2666	2805	2843	2451	3020	2543	2347	2612
Δ gemessener gemischter Gasvolumen (V_{Lab}) [ml]	23	23	23	46	46	46	46	46	46	46	46	46
Gasvolumen ohne 800ml Gülle (=575ml) [ml]				2085	2091	2230	2268	1876	2445	1968	1772	2037
Δ Gasvolumen ohne 800ml Gülle (=575ml) [ml]				49	49	49	49	49	49	49	49	49
Gasvolumen ohne 800ml Gülle auf Norm-volumen [N_{ml}]				1875	1881	2006	2040	1687	2199	1770	1594	1832
Δ Gasvolumen ohne 800ml Gülle auf Norm-volumen [N_{ml}]				52	52	53	53	50	54	51	50	52
Anzeige des Gasanalysators [mV]	555	555	555	642	609	587	650	700	671	533	629	670
Δ Anzeige des Gasanalysators [mV]	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Methangehalt durch Kalibriergerade [%]	55	55	55	65	61	58	66	71	68	52	63	68
Δ Methangehalt durch Kalibriergerade [%]	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4
korrigierter Methan-gehalt durch Mischungsformel[%]	60	59	60	73	69	66	73	81	76	59	72	77
Δ korrigierter Methan-gehalt durch Mischungsformel [%]	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Methangas Norm-volumen [N_{ml}]				1367	1292	1314	1497	1368	1662	1050	1153	1404
Δ Methangas Norm-volumen [N_{ml}]				99	96	99	107	96	116	85	86	100
Methan Gasertrag [N_i/kg oTM]				292	275	279	321	293	353	231	251	317
Δ Methan Gasertrag [N_i /kg oTM]				21	20	21	23	21	25	19	19	23
Relativer Fehler des Methan Gasertrags in %desWerts				7	7	8	7	7	7	8	7	7

 ΔX =absoluter Fehler von X

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Bachelorarbeit „Methanbildungspotential von *Sambucus ebulus* – Nutzung der Pflanze als Gärsubstrat in Biogasanlagen“ von mir selbständig verfasst wurde und ich dabei keine anderen Hilfsmittel verwendet habe, als die erwähnten. Alle wörtlichen oder sinngemäßen Quellen, die verwendet wurden, sind durch Quellenangaben kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.



Maria E. Dittmann
Bayreuth, 10.03.2015