Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:
Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht
erstellt am
30/06/2017

Projekttitel: Sida: Intelligent Densified Energy Carriers for Austria

Projektnummer: 843838

Ausschreibung	e!MISSION.at – 4.Ausschreibung
Projektstart	01/04/2014
Projektende	31/03/2017
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	36 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES)
AnsprechpartnerIn	DDI Dr. Markus Gansberger
Postadresse	Spargelfeldstrasse 191, A - 1220 Wien
Telefon	+43 50 555 - 34840
Fax	
E-mail	markus.gansberger@ages.at
Website	www.ages.at

Sida: Intelligent Densified Energy Carriers for Austria

Projektakronym: SIDecA

AutorInnen:
Markus Gansberger, Philipp von Gehren, Josef Mayr, Johannes Hösch, Harald Bock
Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES)

Elisabeth Wopienka, Sabine Feldmeier
Bioenergy 2020+

Wilfried Pichler, Martin Weigl
Holzforschung Austria

Günther Bochmann, Michael Eder, Thomas Wilflingseder, Peter Liebhard
Universität für Bodenkultur (BOKU)

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 6
1.1 Aufgabenstellung 7
1.2 Schwerpunkte des Projektes 10
1.3 Einordnung in das Programm 10
1.4 Verwendete Methoden 11
2 Inhaltliche Darstellung der verwendeten Methoden 12
2.1 Wahl und Beschreibung der Versuchsstandorte 12
2.2 Bestandesbegründung 13
2.2.1 Bestandesbegründung durch Pflanzung 13
2.2.2 Bestandesbegründung durch Aussaat 14
2.3 Bestandesführung 16
2.4 Ermittlung des Biomasseertragspotentials 16
2.5 Energetische Verwertung 17
2.5.1 Fermentative Treib- oder Rohstoffproduktion 17
2.5.2 Biogaserzeugung 17
2.5.3 Thermische Verwertung 18
2.6 Ökonomische Bewertung 24
2.6.1 Datengrundlage und verwendete Methoden 25
2.6.2 Biogaserzeugung 25
2.6.3 Thermische Verwertung 26
3 Ergebnisse 28
3.1 Bestandesbegründung 28
3.1.1 Bestandesbegründung durch Pflanzung 28
3.1.2 Bestandesbegründung durch Aussaat 28
3.2 Bestandesführung 34
3.3 Biomasseertragspotentials 34
3.3.1 Biomasseerträge bei einer Biogasnutzung 34
3.3.2 Biomasseerträge bei einer thermischen Nutzung 35
3.3.3 Grundbodenuntersuchungen und N_{min}-Bodenuntersuchungen 36
3.4 Energetische Verwertung 37
3.4.1 Fermentative Treib- oder Rohstoffproduktion 37
3.4.2 Biogaserzeugung 41
3.4.3 Thermische Verwertung 45
3.5 Ökonomische Bewertung 57
3.5.1 Biogaserzeugung 57
3.5.2 Thermische Verwertung 58

3.5.3 Sensitivitätsanlaysen 62
4 Schlussfolgerungen 64
5 Ausblick und Empfehlungen 67
6 Literaturverzeichnis 68
7 Anhang 71
7.1 ISO Normen 71
7.2 Ergänzende Tabellen 71
7.3 Publikationen im Zuge des Forschungsprojektes 76
7.4 Abbildungsverzeichnis 80
7.5 Tabellenverzeichnis 82
8 Kontaktdaten 83
8.1 Projektleiter 83
8.2 Projektpartner 84

1 Einleitung

Nachwachsende, CO_2-neutrale Rohstoffe werden in Zukunft einen wertvollen Beitrag zu der von der Europäischen Union angestrebten Energiewende liefern. Alternativen zu den bisher dominierenden Energiepflanzen können dabei zur Erweiterung des verfügbaren Bioenergiepflanzenspektrums beitragen und somit die Biodiversität in der agrarischen Kulturlandschaft erhöhen. Eine relativ unbekannte, jedoch vielversprechende Energiepflanze ist *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby, aus der Familie der Malvaceae, deren Potential unter österreichischen Bedingungen bisher unzureichend erforscht worden ist. *S. hermaphrodita* gilt laut Literatur als ertragsstark, und kann aufgrund ihrer in den Wintermonaten verholzenden Biomasse, neben der Verwendung für Biogas- und Bioethanolproduktion, auch für die thermische Verwertung in Pelletöfen eingesetzt werden [1, 2]. Zudem weist die Malvenart mehrere verschiedene ökologische Vorzüge auf: Durch die mehrjährige Nutzung (bis zu 15 Jahre) an einem Standort wird der Bodenerosion vorgebeugt. Der dichte Pflanzenwuchs wirkt sich unkrautunterdrückend aus, wodurch auf Herbizideinsatz verzichtet werden kann. In den Sommermonaten bildet die Pflanze eine hohe Anzahl an weißen Blüten aus, welche Honigbienen und weiteren Bestäubern eine Nahrungsquelle bietet.

Abbildung 1: *S. hermaphrodita* zum Ende der Blüte (Grabenegg, NÖ) (Bildquelle: AGES GmbH)

Zur Erhebung des Potentials von *S. hermaphrodita* in Österreich wurde ein Konsortium bestehend aus vier Forschungseinrichtungen und vier WirtschaftspartnernInnen gegründet und an dem

Forschungsprojekt **SIDecA** („Sida: Intelligent Densified Energy Carriers for Austria“) gearbeitet (Tabelle 1). Das zentrale Ziel des Projektes ist die Bereitstellung eines konkurrenzfähigen Rohstoffes sowie die Weiterentwicklung bestehender Methoden und Verfahren zur optimalen energetischen Verwertung. Die holistische Aufarbeitung der Produktion eines entlang der gesamten Wertschöpfungskette auf die verschiedenen energetischen Nutzungsmöglichkeiten (Biogaserzeugung, Bioethanolproduktion und thermische Verwertung) abgestimmten CO_2-neutralen Rohstoffes dient der Ausschöpfung des maximalen Energieertrages. Eine durchgeführte ökonomische Bewertung beurteilt abschließend die gesamte Energieproduktion entlang der Wertschöpfungskette, von Bestandesbegründung über Bestandesführung hin zu den drei energetischen Nutzungsarten.

Tabelle 1: Mitglieder und ihre Aufgaben des für das Forschungsprojekt SIDecA gegründeten Konsortiums

Mitglieder des Konsortium	Aufgabe im Konsortium
AGES GmbH	Forschungseinrichtung
Bioenergy 2020+ GmbH	Forschungseinrichtung
Holzforschung Austria	Forschungseinrichtung
Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)	Forschungseinrichtung
Gilles Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co KG	WirtschaftspartnerIn
Ing. Aigner Wasser-Wärme-Umwelt-GmbH	WirtschaftspartnerIn
Schaider GmbH (ehemals SCM Produktions- und Vertriebs-GmbH)	WirtschaftspartnerIn
Gartenbau Michael Höller	WirtschaftspartnerIn

1.1 Aufgabenstellung

Die Aufgaben des Forschungsprojektes SIDecA umfassen die Erhebung des Potentials der neuartigen Energiepflanze *S. hermaphrodita* in Österreich vom Anbau über die Ernte hin zur Verwertung als CO_2-neutrale Energieträger Biogas, Bioethanol und Holzpellets entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Durch eine neuartige Saatguttechnologie und eine verwertungsoptimierte Kulturführung wird eine Reduzierung der Herstellungskosten des Rohstoffes von *S. hermaphrodita* angestrebt. Nachfolgend wird dieser hinsichtlich der drei Nutzungsvariationen Biogaserzeugung, Bioethanolproduktion und thermische Verwertung erforscht. Zur Erhöhung der Energiedichte bei einer thermischen Verwertung wird ein optimiertes Prozessregime der Pelletsproduktion entwickelt, welche in Verbrennungsversuchen charakterisiert werden. Die Biogas- bzw. Bioalkoholausbeute wird durch Vorbehandlungsmethoden und Aufschlussverfahren optimiert. Eine abschließende ökonomische Untersuchung betrachtet die Marktkompatibilität des Rohstoffes in Österreich. Das Forschungsprojekt befasst sich im Detail mit folgenden Aufgabenstellungen:

Bestandesbegründung durch Aussaat zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Rohstoffproduktion

Die Wirtschaftlichkeit der Rohstoffproduktion von *S. hermaphrodita* ist maßgeblich von einer effizienten, kostengünstigen Bestandesbegründung abhängig. Zurzeit erfolgt diese durch das Auspflanzen von im Gewächshaus großgezogenen Jungpflanzen, was mit hohem Kosten- und Arbeitsaufwand einhergeht,

auch wenn eine vegetative Vermehrung durch das Auspflanzen von Wurzelstöcken möglich ist und vereinzelt praktiziert wird [1-3].
Die Bestandesbegründung durch Aussaat wird durch eine vorliegende Dormanz, bei der die *S. hermaphrodita* Samen trotz vorteilhaften Bedingungen nicht in den Keimprozess eintreten, erschwert. Generell verfügen Samen von Pflanzen aus der Familie Malvaceae über eine physikalische Dormanz, bei der eine wasserundurchlässige Samenschale das Eindringen von Wasser zum Embryo verhindert. Eine zusätzliche physiologische Dormanz der Samen, bei der die hormonelle Physiologie des Embryos die Keimung verhindert, wird diskutiert [4]. Diese Dormanz in Kombination mit dem mangelnden Wissen über den für österreichische Verhältnisse unbekannten idealen Aussaattermin verhinderten bisher eine Bestandesbegründung mittels Aussaat. Folglich sind somit sowohl die Keimcharakteristika von *S. hermaphrodita*, als auch dormanzbrechende Vorbehandlungen des Saatgutes und der optimale Aussaattermin im Rahmen eines Feldversuches maßgebliche Forschungsschwerpunkte des Projektes SIDecA.

Abstimmung der Rohstoffproduktion auf die verschiedenen energetischen Verwertungsmöglichkeiten und Erhebung des Biomasseertrages unter österreichischen Klimabedingungen

In Österreich gibt es noch keine veröffentlichten Daten hinsichtlich erhobener Trockenmasse (TM) Ertragswerte von *S. hermaphrodita* Beständen. Auch wurden noch keine Analysen zur effizientesten energetischen Verwertungsmöglichkeit (Biogas, Bioethanol oder thermisch) durchgeführt. Lediglich vereinzelte landwirtschaftliche „Pioniere“ haben bisher Kleinstbestände von *S. hermaphrodita* ausgepflanzt um den gehäckselten Rohstoff, abgemischt mit anderen Brennstoffen, zum Heizen zu nutzen. Folglich besteht bei der Rohstoffproduktion noch großes Potential den Energieoutput zu erhöhen bzw. einen höherwertigen Energieträger (Bioalkohol, Biogas) zu produzieren. In Abhängigkeit der Nutzungsrichtung des Rohstoffes sind jedoch unterschiedliche Substratqualitäten erforderlich, die über verschiedene Parameter, wie z.B. Bestandesdichte und Erntezeitpunkt, beeinflusst werden können.
Eine Optimierung der Bestandesbegründung und -führung ist erforderlich, um erstens die geforderten Substratqualitäten für die spätere Verwertung zu erreichen und zweitens den größtmöglichen Biomasseertrag zu erwirtschaften. Hierbei spielen die Düngung, der Pflanzenschutz und ebenfalls der richtige Erntezeitpunkt eine wichtige Rolle. Erste Erfahrungen zeigen, dass die Unkrautbekämpfung im Jahr der Bestandesbegründung ein wesentlicher Zeit- und Kostenfaktor ist und verbessert werden muss [5]. Bei der Bioalkohol- und Biogaserzeugung, bei der grüne Biomasse für die nachfolgenden fermentativen Prozessschritte eingesetzt wird, ist ein früher Erntetermin oder u.U. eine zweimalige Ernte vorteilhaft. Im Gegensatz dazu wird für die thermische Verwertung verholzte Biomasse mit hohem TM-Gehalt benötigt, weshalb ein möglichst später Erntetermin von Vorteil ist.
Um eine Aussage über das Biomasseertragspotential von *S. hermaphrodita* in den unterschiedlichen Klimaräumen Österreichs treffen zu können, sind Feldversuche in unterschiedlichen Referenzgebieten notwendig. Im Projekt wurden Standorte im semihumiden Klimaraum (Standort Grabenegg) und im pannonischen Klimaraum (Standort Großweikersdorf) gewählt. Damit werden wichtige repräsentative Produktionsgebiete Österreichs abgedeckt.

Aufbereitung von inhomogener, verholzter Biomasse mit geringer Energiedichte

Das Häckselgut von *S. hermaphrodita* ist ein Brennstoff mit sehr geringer Schüttdichte und neigt stark zur Brückenbildung in Förderanlagen. Dieses Problem kann in der Regel mittels Pelletierung sehr gut gelöst werden. Die inhomogene Struktur aus Fasern, leichtem Markanteil und verholzten Teilen stellt jedoch besondere Anforderungen an die Aufbereitungstechnik und Kompaktierung, insbesondere auch bei einer mobilen Pelletierung. Durch systematische Versuche werden im Rahmen des Projektes SIDecA die idealen Prozessbedingungen für eine effiziente Pelletierung ermittelt. Bisher unbekannt sind der Asche- und Silikat-Anteil des Rohstoffes und damit das Verschließverhalten in Zerkleinerungs- und Pelletiermaschinen. Besonderer Fokus liegt dabei auf die Problematik erntebedingter Verunreinigungen mit mineralischen Bodenteilen. Diese können gegebenenfalls an geeigneter Stelle mit Siebverfahren entfernt werden.

Bestimmung der Brennstoffqualitäten von *S. hermaphrodita* sowie Anforderungen an Feuerungsanlagen

Um Transportwege und -kosten gering zu halten, wird die Verwertung von *S. hermaphrodita* als Brennstoff in Österreich höchstwahrscheinlich auf regionale Gebiete beschränkt sein. Das dezentrale Angebot des Brennstoffes ermöglicht deshalb die Belieferung von Kleinwärmenetzen, Industrie- und landwirtschaftlichen Betrieben. Die Wärmeanforderung solcher Kunden liegt in einem Leistungsbereich zwischen 30 und 1000 kW. Da diese Anlagen zumeist ohne Bedienungspersonal betrieben werden, welches auf eine Änderung der Brennstoffqualität reagieren könnte, ist man deshalb auf eine zuverlässige Verbrennungstechnologie und einen Brennstoff mit definierter und konstanter Qualität angewiesen. Die wenigen aus der Literatur bekannten Heizwerte von *S. hermaphrodita* streuen sehr stark, deshalb sind Optimierungs- und Einstellungsempfehlungen für Verbrennungsparameter nicht möglich. Das Projekt konnte für Feuerungsanlagen-Besitzer wertvolle Erfahrungswerte generieren.

Erzeugung von Bioethanol aus grüner *S. hermaphrodita* Biomasse

Durch verschiedene mikrobielle Aufschlussverfahren kann *S. hermaphrodita* Biomasse zerlegt und für die Bioethanolerzeugung genutzt werden. Bei thermischem bzw. thermochemischem Aufschluss können fermentationshemmende Produkte, beispielsweise Furfural oder Hydroxymethylfurfrual, in Abhängigkeit der Aufschlusstemperatur gebildet werden. Basierend auf der Analytik der Aufschlussprodukte werden diese Produkte detektiert und die Auswahl der Aufschlussparameter dementsprechend angepasst. Im Falle einer starken Ausbildung kommt es zum Ausschluss dieser Parameter.

Ermittlungen zum Gärverhalten sowie zu möglichen Prozessinstabilitäten der grünen *S. hermaphrodita* Biomasse

Nur bedingt liegen Angaben zum Gärverhalten und zu möglichen Prozessinstabilitäten des Rohstoffes von *S. hermaphrodita* vor. Bei ersten Batchversuchen konnten je Tonne (t) organischer Trockensubstanz (oTS) 561 m³ Biogas mit einem Methangehalt von rund 56% erreicht werden [6]. Zur Absicherung bzw. Verbesserung der Biogasausbeute sind umfangreichere Analysen und Verfahren notwendig. In einigen Literaturquellen sind deutlich unterschiedlich hohe Proteingehalte angeführt. Im Rahmen des Projektes sind somit bei den einzelnen Erntezeitpunkten bzw. den Chargen der Proteingehalt zu messen und auf eventuelle Hemmungen durch Stickstoff (N) bei der Biogasgewinnung hinzuweisen. Jedoch ist eine

ausschließliche Vergärung von *S. hermaphrodita* unwahrscheinlich, da es zu einer stärkeren Hemmung kommt.

Wirtschaftliche Einschätzung zur Produktion und Verwertung von *S. hermaphrodita*
Aus Sicht der RohstoffproduzentInnen ist überwiegend die Wirtschaftlichkeit einer Kultur ausschlaggebend für die Entscheidung zum Anbau. Dies wird vor allem durch monetäre Faktoren wie Anbaukosten, Kosten der Kulturführung und Erntekosten, Lagerkosten, Produkterlös etc. bestimmt. Daneben spielen aber auch Fragen bezüglich der Fruchtfolgegestaltung, vorhandene Maschinenausstattung, Absatzmärkte und Risiken eine Rolle bei der Entscheidungsfindung. Bei der Kultivierung von *S. hermaphrodita* zur Energiegewinnung mangelt es derzeit noch an relevanten Daten zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit. Da *S. hermaphrodita* eine mehrjährige Kultur ist, ergeben sich Vor- und Nachteile hinsichtlich des Anbaus. So können einerseits z.B. ab dem zweiten Jahr Kosten durch den Wegfall erneuter Anbaukosten eingespart werden, andererseits sind über einen längeren Zeitraum die Flexibilität und das Reagieren auf mögliche Kosten- und Erlösänderungen nicht gegeben. Mit Hilfe der im Projekt angestellten Untersuchungen sollen Aussagen zur Wettbewerbsfähigkeit und der Flexibilisierung des Verwertungsweges von *S. hermaphrodita* als Energiepflanzen getroffen werden.

1.2 Schwerpunkte des Projektes

Das zentrale Ziel des Projektes SIDecA ist die Bereitstellung eines konkurrenzfähigen nachwachsenden Rohstoffes sowie die Weiterentwicklung bestehender Methoden und Verfahren für die energetische Verwertung von *S. hermaphrodita.*

Daraus wurden folgende Schwerpunkte des Projektes abgeleitet:

- Reduzierung der Herstellungskosten des Rohstoffes von *S. hermaphrodita* durch Aussaat
- Verwertungsoptimierte Bestandesbegründung und Kulturführung
- Optimierung von Verfahren zur Behandlung der Biomasse von *S. hermaphrodita* zur Erhöhung der Energiedichte und Verbesserung der Eigenschaften für die thermische Verwertung
- Identifizierung von technologischen Anforderungen zur Verbesserung der Einsetzbarkeit von *S. hermaphrodita* für die thermische Verwertung
- Erzeugung effizient nutzbarer Sekundärenergieträger (Biogas, Bioethanol) aus dem optimierten Rohstoff
- Zielgruppenspezifische und gendergerechte Dissemination der Forschungsergebnisse
- Ökonomische Bewertung der unterschiedlichen Verwertungsschienen von *S. hermaphrodita* als Energiepflanze

1.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt „SIDecA“ wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „e!MISSION.at – 4.Ausschreibung“ durchgeführt.

Die Erzeugung eines nachwachsenden, biogenen Rohstoffes aus *S. hermaphrodita* zur energetischen Verwertung ist überwiegend dem Themenfeld 3 „Erneuerbare Energien“ (TF 3/3.1 Bioenergie) zuzuordnen. Durch den „Closed-Loop-Ansatz", beginnend bei der Bestandesbegründung durch Aussaat, der Optimierung der Rohstoffbereitstellung und –aufbereitung, der Nutzung unterschiedlicher, innovativer Verwertungsschienen sowie Nutzung der Reststoffe als Dünger, werden folgende Subschwerpunkte behandelt:

- Methoden und Verfahren zur Behandlung von Biomasse zur Erhöhung der Energiedichte und / oder der Lagerfähigkeit
- Verbesserung der Verbrennungseigenschaften von biogenen Brenn- und Kraftstoffen
- Erzeugung effizient nutzbarer Sekundärenergieträger aus biogenen Rohstoffen und Verwertung von biogenen Reststoffen wie z. B. Pyrolyse, hydrothermale Verfahren, Vergasung, Verflüssigung, Fermentation, Synthese- und Produktgasen

Zusätzlich zum Themenfeld 3 „Bioenergien“ lässt sich das Forschungsprojekt den, dem Themenfeld 1 „Emerging Technologies“, zugehörigen Subschwerpunkten „Erneuerbare Energien der nächsten Generation“ bzw. „Bioenergiekonversion der nächsten Generation“ zuordnen.

1.4 Verwendete Methoden

Die zum Projektstart von SIDecA definierten Aufgabenstellungen und Projektschwerpunkte wurden ausgehend von einer umfassenden Literaturrecherche und basierend auf Expertenwissen bearbeitet und dienten der Analyse des Potentials der neuartigen Energiepflanze *S. hermaphrodita* in Österreich entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Zur besseren strukturellen Bearbeitung erfolgte eine Untergliederung des Arbeitspensums in Arbeitspakete, in welche jeder Projektpartner sein Fachwissen einfließen ließ. Die Vernetzung und der Transfer von Wissen zwischen den definierten Arbeitspaketen wurden über die gesamte Projektdauer hinweg aufrechterhalten.

In umfangreichen Laborversuchen wurden die Keimcharakteristika von *S. hermaphrodita* untersucht, und verschiedene Vorbehandlungen zur Steigerung der Keimfähigkeit angewendet. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem multifaktoriellen Feldversuch im Split-Plot Design praktisch angewendet. Der Effekt einer Saatgutvorbehandlung und differenzierter Aussaattermine auf die Bestandesbegründung von *S. hermaphrodita* wurde mit agrarwissenschaftlichen Messungen (Erheben des Feldaufgangs, Messung des Blattflächenindex, Messung der Pflanzenhöhe, TM-Ertragserhebung) dokumentiert. Schlussendlich erfolgte eine statistische Auswertung aller erhobenen Messdaten (Lead: AGES GmbH).

An zwei unterschiedlichen Standorten in Österreich wurden Versuche zur Auspflanzung und zur Kultivierung von *S. hermaphrodita* Beständen durchgeführt. Diese Standorte dienten auch als Bezugsquelle für Biomasse (verholt/unverholzt) für die in der Wertschöpfungskette nachgelagerten Schritte der energetischen Verwertung (Lead: AGES GmbH).

Um das Ziel einer möglichst breiten Charakterisierung der verholzten *S. hermaphrodita* Biomasse für die thermische Verwertung zu erreichen, wurde ein Probenahme- und Messplan erstellt. In einem Partial-Factorial-Screening-Design wurden die Faktoren Standort, Erntejahr, Bestandesdichte und Düngung berücksichtigt. Mittels Standardverfahren zur Prüfung biogener Festbrennstoffe wurden alle wichtigen Parameter gemessen. Die mechanische Aufbereitung wurde im Biomassetechnikum anhand eines quasi

experimentellen Versuchsplanes untersucht und ein industrielles Verfahrenskonzept wurde entworfen (Lead: Holzforschung Austria).
Um das Verwertungspotential von *S. hermaphrodita* als Brennstoff für Kleinfeuerungsanlagen zu erheben, wurden zunächst Verbrennungsversuche durchgeführt. Durch einen standardisierten Versuchsaufbau, die kontinuierliche Messung der Gaszusammensetzung sowie die Bestimmung des Gesamtstaubs wurden die Verbrennungseigenschaften von *S. hermaphrodita* im Vergleich zu anderen Biomasse-Brennstoffen untersucht. Im Fokus lagen die Analyse der Verschlackungsneigung, der Freisetzung von Emissionen sowie des Korrosionspotentials. Abschließend erfolgte eine Brennstoffindizierung für die ausgewählte Kennzahlen ermittelt und mit anderen Biomasse-Brennstoffen verglichen wurden (Lead: Bioenergy 2020+ GmbH).
Bei der fermentativen Nutzung des Pflanzenmaterials zu Ethanol und ABE (Aceton, Butanol und Ethanol) wurde grüne Biomasse von *S. hermaphrodita* verwendet. Die Ethanolfermentation wurde mittels *Zymomonas mobilis* und die ABE mittels verschiedener Clostridienstämme durchgeführt.
Die Untersuchungen zur Biogaserzeugung erfolgten in Batch- und kontinuierlichen Versuchen. Dabei wurden die Messungen über den Projektzeitraum hinweg an Biomasse von unterschiedlichen Erntezeitpunkten und Standorten durchgeführt. Die Batchversuche dienen dazu, das Gaspotential der verschiedenen analysierten Proben zu ermitteln (Lead: BOKU).
Auf Basis der Erkenntnisse der einzelnen Arbeitspakete sowie zusätzlicher erhobener Daten wurde eine umfassende ökonomische Bewertung von *S. hermaphrodita* durchgeführt, um das ökonomische Potential der einzelnen Verwertungsmöglichkeiten gezielt zu untersuchen (Lead: BOKU).

2 Inhaltliche Darstellung der verwendeten Methoden

2.1 Wahl und Beschreibung der Versuchsstandorte

Um Aussagen über das Biomasseertragspotential in den unterschiedlichen Klimaräumen Österreichs treffen zu können, sind Feldversuche in zwei verschiedenen Referenzgebieten (Grabenegg und Großweikersdorf, beide in NÖ) durchgeführt worden (Abbildung 2).

Abbildung 2: Lage der Versuchsstandorte

Die Versuchsanlage am Standort **Grabenegg** befindet sich im semihumiden Klimaraum und liegt auf 260 m Seehöhe. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 8,4 °C und im Jahresmittel fallen 686 mm Niederschlag. Der Bodentyp stellt eine vergleyte, carbonathaltige Braunerde aus feinem Schwemmmaterial dar. Der A Horizont reicht bis 30 cm, ist mittelhumos (Mull) und karbonathaltig, gefolgt von einem schwach humosem AB Übergangshorizont bis ca. 80 cm Bodentiefe. Der Standort wird als hochwertiges Ackerland eingestuft. An diesem Standort wurden Versuchsflächen mit unterschiedlichen Pflanzenverbänden und Auspflanzzeitpunkten durch Auspflanzung sowie ein Aussaatversuch angelegt.
Der Versuchsstandort **Großweikersdorf** liegt im pannonischen Klimaraum auf 211 m Seehöhe. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt ca. 9,2 °C und im Jahresmittel fallen ca. 460 mm Niederschlag. Der Bodentyp ist ein kalkhaltiger grauer Auboden aus jungem, feinem Schwemmmaterial mit einem mittelhumosen A Horizont. Der A1 Horizont (lehmiger Schluff) reicht auf ca. 20 cm Tiefe, darunter findet sich ein ca. 80 cm tiefer A2 Horizont mit schluffigem Lehm. Auch dieser Standort wird als hochwertiges Ackerland eingestuft. Am Versuchsstandort Großweikersdorf wurden drei etablierte *S. hermaphrodita* Bestände für Versuche zur thermischen Verwertung der verholzten Biomasse herangezogen. Am Feld „Dietrich“ (etabliert 2011) wurden Praxis- und Exakternten durchgeführt sowie im Laufe des Projektes mehrmals Bodenproben erhoben. Dazu wurden vier Versuchsparzellen eingemessen, die im Projektzeitraum mehrmals beprobt wurden. Bei den beiden anderen Feldern „Brunnen“ (etabliert 2011) und „Wiesendorf“ (etabliert 2012) wurden nur Praxisernten durchgeführt.

2.2 Bestandesbegründung

2.2.1 Bestandesbegründung durch Pflanzung

Die Bestandesbegründung von *S. hermaphrodita* kann über einen längeren Zeitraum in der warmen Jahreszeit durch eine Auspflanzung von Setzlingen erfolgen. Am Standort Grabenegg wurden

Versuchsflächen in Form einer teilrandomisierten Split-Plot Anlage mit jeweils drei Wiederholungen angelegt. Für das Projekt wurden deshalb zu zwei Terminen Auspflanzungen durchgeführt, wobei am 23.06.2014 drei Flächen (je 150 m^2) mit unterschiedlichen Bestandesdichten (1,33/1,77/2,66 Pflanzen m^{-2}) und am 25.08.2014 eine weitere Fläche von 150 m^2 (1,77 Pflanzen m^{-2}) händisch bepflanzt wurden. Eine gute Jugendentwicklung führte zu vollständigen und geschlossenen Beständen die für die weitere Projektarbeit zur Verfügung standen. Die Reihenweite der Bestände wurden durchgängig auf 80 cm festgelegt. In der Reihe wurden die Pflanzen im Abstand von 47 cm, 71 cm und 94 cm gesetzt. Die Durchführung der Bodenuntersuchungen erfolgte auf Basis der geltenden ÖNORMEN. Ertragsfeststellungen (Frischmasse (FM) und TM) wurden mittels akkreditierter Feldversuchsmethoden und Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Grundlage der guten landwirtschaftlichen Praxis durchgeführt
Für die Versuche am Standort Großweikersdorf wurde eine seit 2010 bestehende Anlage (Bestandesdichte 1,77 Pflanzen m^{-2}) herangezogen. Am 03.02.2015 wurden in diesem Bestand vier Versuchsparzellen mit jeweils 15 m^2 eingemessen, vermarkt und für die weitere Projektarbeit verwendet.

2.2.2 Bestandesbegründung durch Aussaat

Definierter Forschungsschwerpunkt des Projektes war eine Bestandesbegründung mittels Aussaat. Dafür wurden in den ersten beiden Projektjahren die keimfähigkeitsbeeinflussenden Faktoren bestimmt. Aufbauend auf in der Literatur beschriebenen Methoden zur Brechung der physikalischen Dormanz wurden Vorbehandlungen ausgewählt und an *S. hermaphrodita* Saatgut zweier Herkünfte, Großweikersdorf 2015 (GRWK 2015) und Grabenegg 2016 (GRA 2016), angewendet (Tabelle 2). Nach der Saatgutvorbehandlung wurden 4 x 50 Samen in Faltenfilter angesetzt und bei 20 °C und Dunkelheit inkubiert. Eine Auszählung der gekeimten Samen erfolgte 7, 14 und 21 Tage nach dem Ansetzen. Ein Same zählte als gekeimt, wenn die Radicula die Samenschale sichtbar durchbrochen hatte. Simultan zu den angesetzten Keimversuchen wurde auch die Wasseraufnahmekapazität von vorbehandeltem Saatgut bestimmt. Dazu wurden 4 x 100 Samen nach der jeweiligen Vorbehandlung gewogen, und für 24 Stunden bei 10 °C im Dunkeln auf feuchtes Filterpapier gelegt. Nach Ablauf der 24 Stunden erfolgte ein erneutes Wiegen der Samen.

Tabelle 2: Getestete Faktoren und jeweilige Faktorstufen zur Brechung der physikalischen Dormanz von *S. hermaphrodita*

Faktor	Faktorstufe			
Kontrollvariante				
95-97% H_2SO_4	15 min	30 min	45 min	60 min
Wasserbad, 60 °C	30 min	60 min	90 min	
Wasserbad, 70 °C	30 min	60 min	90 min	
Wasserbad, 80 °C	30 min	60 min	90 min	
Wasserbad, 100 °C	10 sec	60 sec	120 sec	
Seed Scarifier	240 kPa, 45 sec	240 kPa, 90 sec	410 kPa, 45 sec	410 kPa, 90 sec

Samen bei denen die vorliegende physikalische Dormanz erfolgreich gebrochen werden konnte, wurden danach Methoden zur Brechung einer eventuell vorliegenden physiologischen Dormanz unterzogen (Tabelle 3), um alle keimfähigkeitsbeeinflussenden Faktoren definieren zu können.

Tabelle 3: Getestete Faktoren und jeweilige Faktorstufen zur Brechung der physiologischen Dormanz von *S. hermaphrodita*

Faktor	Faktorstufe		
Kontrollvariante			
Stratifikation	14 Tage, 7 °C	21 Tage, 7 °C	28 Tage, 7 °C
GA_3	0,02% GA_3	0,05% GA_3	0,1% GA_3
Licht	12 h L / 12 h D	24 h L	
Temperatur	15 °C / 25 °C	20 °C / 30 °C	

Aufbauend auf den Laborversuchen wurde ein Feldversuch in einem Split-Plot Design angelegt, bei dem der Einfluss der Faktoren Aussaattermin und Saatgutvorbehandlung auf den Feldaufgang untersucht wurde. Drei verschiedene Saatgutvorbehandlungen und eine Kontrollvariante wurden in vierfacher Wiederholung an drei, jeweils ca. 14 Tage auseinanderliegenden, Aussaatterminen mit einer handelsüblichen Drillmaschine (Wintersteiger AG, Ried im Innkreis, Österreich) ausgesät (Tabelle 4). Einen Monat nach dem letzten Aussaattermin wurde der Feldaufgang aller Parzellen mittels Auszählung erhoben und statistisch verrechnet. Zum Ende der Vegetationsperiode hin (24. und 25. Oktober 2016) wurde zudem der Blattflächenindex aller Parzellen mit dem AccuPAR Ceptometer LP-80 (Decagon Devices, USA) bestimmt. Ebenfalls zum selben Zeitpunkt wurde für jede Parzelle von fünf randomisiert ausgewählten Pflanzen die Wuchshöhe gemessen. Zum Abschluss der Datenerhebung des Aussaatversuches wurde für jeden der drei Aussaattermine die TM pro Hektar (ha) bestimmt. Alle erhobenen Daten wurden statistisch verrechnet.

Tabelle 4: Getestete Aussaattermine und Saatgutvorbehandlungen des Feldversuches

Faktor	Faktorstufe
Aussaattermin	
	10.05.2016
	31.05.2016
	14.06.2016
Saatgutvorbehandlung	
	Keine Saatgutvorbehandlung (Kontrollvariante)
	30 min H_2SO_4
	30 min H_2SO_4 + 24 h 0,1% GA_3
	Mechanische Skarifizierung

2.3 Bestandesführung

Unkrautbekämpfung

Die Unkrautbekämpfung bzw. Bestandespflege im ersten Vegetationsjahr am Standort Grabenegg beschränkte sich auf die Unkrautfreihaltung. Dazu waren bei der im Juni gepflanzten Fläche zwei Arbeitsgänge erforderlich. Eine davon wurde händisch durchgeführt und eine weitere Maßnahme erfolgte mit einer 4-reihigen Reihenfräse. Bei der im August gepflanzten Fläche war eine händische Maßnahme ausreichend. Im April 2015 war eine weitere händische Unkrautbekämpfung erforderlich. Aufgrund des raschen Bestandesschlusses im Frühjahr und der damit verbundenen Unterdrückung des Unkrautes waren 2016 keine weiteren Unkrautbekämpfungsmaßnahmen mehr notwendig.
Am Standort Großweikersdorf waren während der gesamten Projektdauer aufgrund des raschen Bestandesschlusses im Frühjahr des bereits mehrere Jahre etablierten Bestandes keine Unkrautbekämpfungsmaßnahmen notwendig.

Düngung

Auf der Versuchsfläche in Grabenegg wurden zu Vegetationsbeginn (Termin 25.02.2014) Grundbodenuntersuchungen durchgeführt, die am Standort Großweikersdorf im Frühjahr 2014. Auf Basis der Analysenergebnisse bzw. der guten Versorgung der Fläche war eine Düngung mit Phosphor und Kalium auf keinem der Standorte erforderlich. Aufgrund des erwartungsgemäßen geringen Jugendwachstums der Jungpflanzen am Standort Grabenegg erfolgte keine N-Düngung im ersten Vegetationsjahr (2014). Auch am Standort Großweikersdorf wurde 2014 keine N-Düngung durchgeführt.
2015 und 2016 wurden im Frühjahr auf allen Versuchsflächen 70 kg N ha^{-1} in Form von Nitramoncal (NAC) ausgebracht. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft und zur Überprüfung der Verträglichkeit erfolgte im Jahr 2016 am Standort Grabenegg auf einer Teilfläche von 44 m^2 eine Düngung mit Biogasgülle anstelle der mineralischen N-Gabe.

2.4 Ermittlung des Biomasseertragspotentials

Das Biomasseertragspotential von *S. hermaphrodita* unter österreichischen Klimabedingungen wurde sowohl für eine Biogas-Nutzung, bei der die grüne, unverholzte Biomasse eingesetzt wird, als auch für die thermische Nutzung, bei der verholzte Biomasse mit geringem Feuchtigkeitsgehalt verwendet wird, untersucht. Die Ernten für die Biogas-Nutzung (zwei Schnitte pro Jahr) wurden nur am Versuchsstandort Grabenegg am 30.06.2015 und 16.10.2015 sowie am 22.06.2016 und 25.10.2016 mit dem Grünfutterernter CIBUS mit integriertem Wiegesystem durchgeführt. Für die thermische Nutzung (ein Schnitt pro Jahr) wurde am Versuchsstandort Grabenegg am 27.01.2016, und 23./24.1.2017, in Großweikersdorf am 03.02.2015, 22.01.2016, bzw. 08.02.2017 die Versuchsernte mit einer Motorsäge durchgeführt. Unmittelbar nach den jeweiligen Ernten erfolgte neben der Bestimmung der Frischsubstanz bei beiden Nutzungsarten und die TS-Bestimmung im Trockenschrank. Bei der thermischen Nutzung wurden auch die Triebzahl pro Pflanze und die Stängelstärke erhoben. Zudem wurde die Wuchshöhe der Bestände bonitiert.

2.5 Energetische Verwertung

2.5.1 Fermentative Treib- oder Rohstoffproduktion

Die fermentative Nutzung des Pflanzenmaterials im Projekt unterteilte sich in drei Bereiche: Die Gewinnung von Biogas, Bioethanol und ABE. Hierzu waren verschiedene Methoden notwendig, um den jeweiligen eingesetzten Organismen eine Ihnen verfügbare Kohlenstoffquelle zur Verfügung zu stellen. Für die Fermentationen mit *Zymomonas mobilis* sowie Chlostridien konnte auf kein gängiges Verfahren zurückgegriffen werden, wodurch für *S. hermaphrodita* ein neues Verfahren entwickelt werden musste. Dies erfolgte in Anlehnung an die Richtlinien der National Renewable Energy Laboratory. Die für die fermentative Verwertung zu Ethanol und ABE verwendete Biomasse wurde im Versuchsjahr 2016 geerntet.

Substratvorbehandlung: Inhibierende Substanzen im Substrat wurden in einer Vorbehandlung zuerst entfernt. Das silierte Ausgangsmaterial wurde in je 500 ml deionisiertem Wasser für 30 min eingelegt und anschließend in ein Nylonnetz gefüllt und welches anschließend ausgepresst wurde. Um alle inhibierende und löslichen Stoffe zu entfernen wurde die Durchführung viermal wiederholt. Anschließend erfolgte eine Trocknung des ausgepressten Materials im Trockenschrank bei 65 °C für 24 h.
Deacetylierung: Das Substrat wurde eingewogen und basierend auf der eingewogenen TS mit einer entsprechenden Menge an 1,9% NaOH versetzt. Im Anschluss erfolgte eine thermische Behandlung bei 80 °C für 60 min (10 min aufheizen auf 80 °C, 60 min halten, 15 min Abkühlen).
Hydrolyse: Im Folgenden wurde das Aufschlussmaterial tröpfchenweise mit etwa 132µl 98% H_2SO_4 versetzt (die Menge basierte auf der Einwaage)und anschließend auf 160 °C erhitzt (20 min zur Aufheizung auf 160 °C, 5 min bei 160 °C halten, 30 min zum Abkühlen auf 20 °C). Anschließend wurde das Material mit NaOH auf einen pH-Wert von 5,0 eingestellt.
Saccharifizierung: Die Sachcharifizierung erfolgte mit Cellulase von *Trichoderma longibrachiatum*. Nach der Cellulase-Reaktion wurde das Material in 50 ml-Zentrifugengefäße gefüllt und bis zur Verwendung für die Versuche tiefgefroren.
Fermentation zu Ethanol und ABE: Die Organismen wurden vorab kultiviert und in Abhängigkeit der Organismendichte verwendet. Die Kultivierung erfolgt in Anlehnung an die Vorgaben von DSMZ. Für die verschiedenen Ansätze wurden unterschiedliche pH-Werte verwendet. In Vorversuchen wurde untersucht inwiefern es bei hohen Substratkonzentrationen zu Inhibierungen kommt.

2.5.2 Biogaserzeugung

Die Batchtests bei der Biogasgewinnung wurden in Anlehnung an die VDI 4630 durchgeführt. Hierbei wird eine definierte Menge an Inokulum verwendet, das zu vergärende Substrat hinzugegeben und bei 37 °C inkubiert. Die produzierte Gasmenge wurde täglich abgelesen.
Die kontinuierlichen Versuche wurden in 6-8 Liter (l) volldurchmischten Reaktoren durchgeführt. Die Vergärung wurde bei 37 °C durchgeführt. Die Beschickung erfolgte von Montag bis Freitag einmal täglich. Gasquantität wurde kontinuierlich, die Gasqualität mehrmals täglich gemessen. Die Messung der Parameter pH, volatile Fettsäuren (VFA), total Kjeldahl N (TKN), Ammoniumstickstoff (NH_4-N), TS und

oTS wurden zweimal pro Woche bzw. pro Monat durchgeführt. Die Raumlast wurde auf rund 2 kg oTS m^{-3} im Maximum festgelegt.

2.5.3 Thermische Verwertung

Rohstoffcharakterisierung

Um das Ziel einer möglichst breiten Charakterisierung des Erntegutes von *S. hermaphrodita* zu erreichen wurde ein Probenahme- und Messplan erstellt. In einem Partial-Factorial-Screening-Design wurden die Faktoren Standort, Erntejahr, Bestandesdichte, und Düngung berücksichtigt. Da die verfügbaren Bestände zum großen Teil schon vor dem Projektbeginn angelegt worden waren konnte die Bestandesdichte nur am Standort Grabenegg gezielt variiert werden. Tabelle 5 zeigt den Probenahme- und Messplan für die gesamte Projektdauer. Der Messumfang für die gewonnenen Proben wurde entsprechend der Bedeutung der jeweiligen Parameter und der erwarteten Variation in drei Abstufungen (a, b, c) gewählt, siehe Tabelle 6. Ebenfalls in Tabelle 6 angeführt sind die Prüfnormen welche für die jeweiligen Messparameter zur Anwendung kamen, die Vollbezeichnung der Normen findet sich jeweils im Literaturverzeichnis.

Tabelle 5: Probenahme- und Messplan für die Charakterisierung von *S. hermaphrodita*

Standort		**Auspflanz-zeitpunkt**	**Bestandes-dichte**	**Beprobungs-punkt**	**Analysenumfang je Erntejahr (lt. Tabelle 6)**		
	Bodengüte symbolisch	Monat Jahr	Pflanzen m^{-2}		2015	2016	2017
Grabenegg	++	Juni 2014	1,33	Exakternte	a	c	c
Grabenegg	++	Juni 2014	1,77	Exakternte	a	b	b
Grabenegg	++	Juni 2014	2,66	Exakternte	a	c	c
Großweikersd. Dietrich	+	Herbst 2011	1,77	Exakternte	a	b	b
Großweikersd. Dietrich	+	Herbst 2011	1,77	Praxisernte	c	-	-
Großweikersd. Dietrich	+	Herbst 2011	1,77	Pellets	b	-	-
Großweikersd. Wiesendorf	--	Herbst 2012	1,77	Praxisernte	a	c	c
Großweikersd. Brunnen	-	Herbst 2011	1,77	Praxisernte	a	c	c
Gmünd Böhm	-	Frühling 2010	2,38	Praxisernte	a	-	-

Tabelle 6: Aufschlüsselung der Analyseumfänge für die gewonnenen Proben

Analysen-code	**Wasser-gehalt**	**Heizwert**	**Asche-gehalt**	**Asche-schmelzverh.**	**S+CL**	**CHN**	**Ca Mg Ka Fe Na Al**	**As Cd Cr Cu Ni Pb Zn**	**Si**
Kürzel	ISO 18134	EN 14918	ISO 18122	CEN/TS 15370	ISO 16994	ISO 16948	EN ISO 11885		
a	x	x	x	x	x	x	x	x	x
b	x	x	x	x	x	x	x		x
c	x		x						

Zusätzlich zu den Messungen laut Plan wurden an einigen Proben der Ernte 2017 die Schüttdichte und der Phosphorgehalt nach ISO 11885 bestimmt.

Rohstoffaufbereitung (Pelletierung)

Die Pelletierung von Biomasse stellt prozesstechnisch gesehen ein komplexes Verfahren mit sehr vielen Einflussfaktoren dar. Weil es keine Vorerfahrungen zur Pelletierung der Biomasse von *S. hermaphrodita* gab, war auch eine Reihe von kategorischen Variablen wie z.B. Pressentechnologie und Vorzerkleinerungstechnik zu untersuchen. Unter solchen Umständen ist ein klassisches faktorielles Versuchsdesign nur mit sehr großem Aufwand und erheblichen Rohstoffmengen umsetzbar. Daher wurde ein quasi experimenteller Versuchsplan nach dem Best-Guess Ansatz erstellt. Ziel der Versuche war es, die optimalen Bedingungen für die Pelletierung von *S. hermaphrodita* soweit einzugrenzen, dass auf Grundlage der Ergebnisse ein industrieller Prozess entworfen werden kann. Im Versuchsplan wurden die Faktoren Zerkleinerungstechnik, Korngröße des Rohstoffes, Vortrocknung, Wassergehalt, Vorschubgeschwindigkeit, Pressentechnologie, Pressverhältnis, Materialvorlagerung und Kollerprofilierung variiert.

Insgesamt wurden 20 Hauptversuchseinstellungen definiert und im Zuge der Umsetzung diverse Unterversuche mit Variationen von Wassergehalt und Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt (Tabelle 7). Als Rohstoff wurde von Fa. Höller (Großweikersdorf) Erntematerial vom Feld „Dietrich“ aus mehreren Erntejahren zur Verfügung gestellt. Mit den Versuchseinstellungen des Versuches 473009 wurde ca. eine t Versuchsbrennstoff für Abbrandversuche erzeugt.

Tabelle 7: Versuchsplan für die Pelletierung von *S. hermaphrodita.*

Lfd Nr.	Rohstoff	Vorbehandlung	Zerkleinerung	Sieb / Matrize	Presse	Matrize	Koller 1	Koller 2
	Erntejahr		Typ	mm	Typ	mm		
473001	2014	n.z.	Keine	n.z.	Flachmatrize	30	Loch	Loch
473001.1	2014	n.z.	Hammermühle	14	Flachmatrize	30	Loch	Loch
473002	2014	n.z.	Hammermühle	14	Ringmatrize	30	Riffel	Loch
473003	2015	n.z.	Hammermühle	Ohne Sieb	Flachmatrize	24	Loch	Loch
473005	2015	n.z.	Hammermühle	10	Flachmatrize	24	Loch	Loch
473005.1	2015	n.z.	Hammermühle	10	Flachmatrize	27	Loch	Loch
473005.2	2015	n.z.	Hammermühle	10	Flachmatrize	30	Loch	Loch
473007	2015	n.z.	Hammermühle	10	Ringmatrize	30	Riffel	Loch
473007.1	2015	n.z.	Hammermühle	10	Ringmatrize	35	Riffel	Loch
473007.2	2015	n.z.	Hammermühle	10	Ringmatrize	40	Riffel	Loch
473008	2015	n.z.	Kollermühle	12	Flachmatrize	30	Loch	Loch
473009	2015	Trocknung	Kollermühle	6	Flachmatrize	30	Loch	Loch
473015	2015	n.z.	Kollermühle	6	Ringmatrize	30	Riffel	Loch
473016	2015	n.z.	Kollermühle	6	Ringmatrize	35	Riffel	Loch
473018	2015	n.z.	Kollermühle	6	Ringmatrize Labor	26	Riffel	n.z.
473021	2016	erntefrisch	Kollermühle	6	Ringmatrize	35	Riffel	Loch
473022	2016	erntefrisch	Kollermühle	6	Ringmatrize	40	Riffel	Loch

423023	2016	erntefrisch	Kollermühle	6	Flachmatrize	30	Loch	Loch
423024	2016	6 Monate gelagert	Kollermühle	6	Flachmatrize	30	Loch	Loch
423025	2016	6 Monate gelagert	Kollermühle	6	Ringmatrize	35	Loch	Loch

Legende: n.z. = nicht zutreffend

Die Versuche wurden im Biomassetechnikum der Holzforschung Austria durchgeführt,
Tabelle 8 gibt einen Überblick über die eingesetzten Maschinen, Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die Pelletpressen 1 und 2 mit welchen der Hauptteil der Pelletierversuche durchgeführt wurde. Für alle Versuche wurden Presskanäle mit 6 mm Durchmesser verwendet. Die in Abbildung 3 dargestellte Flachmatrizenpresse ist durch den Einsatz anderer Koller und Matrizen als Kollermühle einsetzbar.

Tabelle 8: Übersicht der eingesetzten Maschinen im Biomassetechnikum

Prozess-Einheit	Spezifikation	Hersteller/ Modell	Antrieb [kW]	Maximaloutput bei Weichholz [kg h^{-1}]
Mühle 1	Hammermühle	Tietjen HL2	30 (FU-Antrieb)	1000
Mühle 2	Kollermühle	Amandus Kahl 33-390	30 (FU-Antrieb)	~ 600
Trockner	Bandtrockner	Andritz - Einzelfabrikat	45 (Heizleistung)	30 (45% Eingangs-WG, 10% Ausgangs-WG)
Pelletpresse 1	Ringmatrizenpresse	Salmatec ECO Mini 360	22 (FU-Antrieb)	200
Pelletpresse 2	Flachmatrizenpresse	Amandus Kahl 33-390	30 (FU-Antrieb)	350
Pelletpresse 3	Ringmatrizenpresse	CPM CL5	5	20

Abbildung 3: Flachmatrizenpresse Kahl 33-390 mit Rohstoffzufuhr (Bildquelle: Holzforschung Austria), rechts: schematisches Funktionsprinzip, entspricht Kollermühle (Bildquelle: A. Kahl)

Abbildung 4: Ringmatrizenpresse Salamtec ECO Mini 360 mit geöffneter Pressentüre (links) und Koller gelocht (rechts vorne) sowie geriffelt (rechts hinten) (Bildquelle: Holzforschung Austria).

Mobile Pelletierung

Die Erkenntnisse aus den Pelletierversuchen wurden laufend an die Firma Schaider (ehemals SCM; im Projekt verantwortlich für die Entwicklung einer Technologie zur mobilen Pelletierung) weitergeleitet, um eine frühzeitige Anpassung der Technologie an die Biomasse von *S. hermapohrodita* zu gewährleisten (Entwicklungsinput durch Technologie Assessment). Mit dem zu Projektbeginn in Fertigstellung befindlichem Prototyp konnten keine Versuche mit *S. hermaphrodita* durchgeführt werden, da bereits bei den ersten Versuchen mit Weizenstroh Schäden an der Maschine auftraten. Folglich war eine grundlegende Überarbeitung der Kernkomponenten erforderlich. Daher wurde die Entwicklung des Re-Designs durch die Holzforschung Austria begleitet. Im Februar 2016 erfolgte ein Technologie-Assessment, bei welchem das gesamte Anlagenkonzept und auch die Auslegung von Einzelkomponenten intensiv untersucht wurden. Im Folgenden ist das Anlagenkonzept des Re-Designs beschrieben:

- Auf einen Trolley aufgebaut befindet sich eine Schneidmühle welche von der Zapfwelle der Zugmaschine angetrieben wird.
- Der Rohstoff wird mittels pneumatisch-mechanischem Transport an die Schneidmühle übergeben Nach der Zerkleinerung durch die Schneidmühle erfolgt der pneumatischem Transport in einen ausfahrbaren Pufferbehälter, wo eine Vortrocknung des Rohstoffes durch von unten eingeblasene Heißluft erfolgt. Die Heißluft besteht aus der Kühlerabluft und den Abgasen eines 500 kW Dieselaggregates. Es stehen etwa 500 kW an Abwärme zur Verfügung.
- Vom Pufferbehälter gelangt das Material mittels zweier Räumschleusen in den Konditionierbehälter wo der Rohstoff homogenisiert und in einen Schneckenkonditioneur übergeben wird. Hier können bei Bedarf Wasser oder flüssige Bindemittel zugegeben werden.
- Der Rohstoff gelangt mittels Steigförderband in den Vorverdichter, welcher aus einer sich verjüngenden Förderschnecke besteht. Hier wird der Rohstoff vorverdichtet um die erforderliche Rohstoffmenge in den Verdichter einführen zu können.
- Im Verdichter arbeiten zwei exzentrisch gelagerte ineinanderlaufende Ringmatrizen. Der Innenring wird durch ein Planetengetriebe angetrieben und nimmt den Außenring durch kraft- und formschlüssige Kraftübertragung mit. Der Zwischenraum zwischen den Ringen wird an der

breitesten Stelle mit dem Rohstoff befüttert. Abbildung 5 zeigt den Verdichter bei der Vormontage (links) und in Detailansicht die Öffnung für den Rohstoffeinlauf und den Ringspalt (rechts)

- Der Rohstoff wird durch die Rotation der beiden Ringe in den sich verjüngenden Ringspalt gezogen und bildet dabei einen hochverdichteten Materialteppich, welcher dann an der engsten Stelle des Ringspaltes sowohl über die Bohrungen des Innenringes als auch durch die Bohrungen des Außenringes entweicht. Das Verhältnis aus Bohrlochdurchmesser und Bohrlochlänge bestimmt den Presswiederstand und damit die Dichte der Presslinge.
- Die Presslinge verlassen den Außenring nach außen und den Innenring nach innen und werden von einer Vibrationsrinne aufgefangen welche sich unterhalb der Gehäuseöffnungen des Verdichters befindet.
- Die Vibrationsrinne beisitzt einen Siebboden und fungiert damit auch als Abscheider von Feinanteilen, welche in die Rohstoffbeschickung zurückgeführt werden.
- Von der Vibrationsrinne werden die Presslinge auf ein Steigförderband übergeben und von dort in den Pelletbehälter mit einem Fassungsvermögen von etwa vier m³ übergeben, welcher mittels Zwangsbelüftung als Gegenstromkühler dient.
- Aus dem Pelletbehälter werden die Pellets mit einem Förderband, welches sich unterhalb des Behälters befindet, ausgetragen.
- Der Antrieb des Verdichters erfolgt mittels 500 kW Dieselaggregat / Zahnriementrieb / Kardanwelle / Planetengetriebe.
- Ein Stromaggregat wird ebenfalls vom Dieselaggregat angetrieben und versorgt alle Nebenaggregate und elektrischen Komponenten der Maschine.

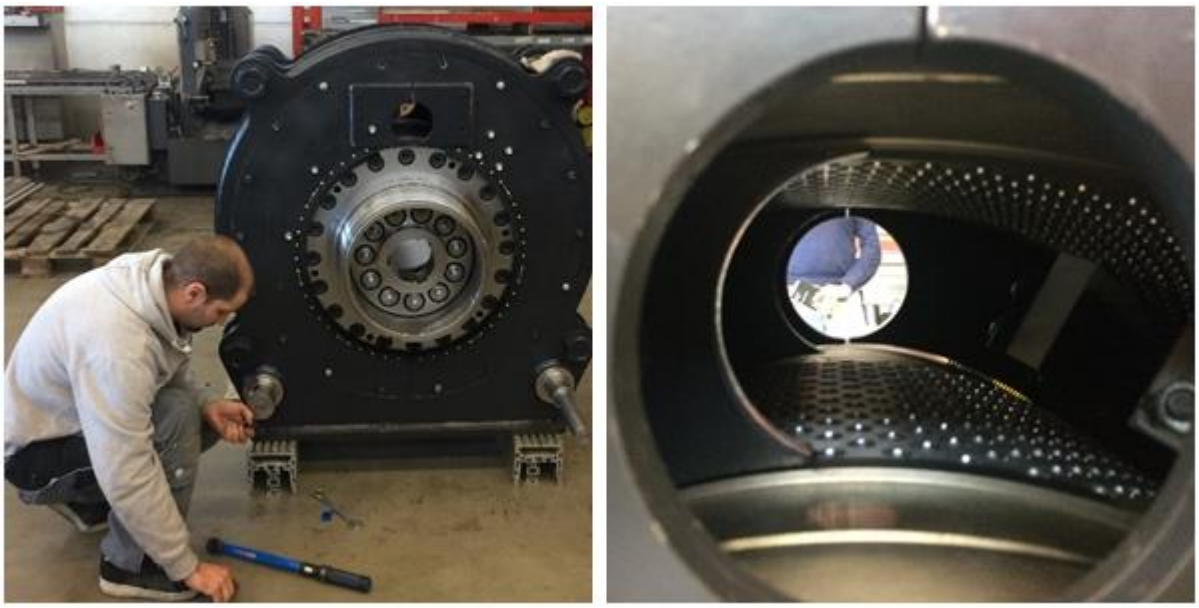


Abbildung 5: Verdichter bei der Vormontage (links), Öffnung für Rohstoffeinlauf und Ringspalt (rechts) (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Ausführlichere Informationen zum Entwicklungsprozess befinden sich in gesonderten Dokumenten.
Aufgrund diverser Lieferverzögerungen von Anlagenkomponenten, sowie auch Personalengpässen, erfolgte die Fertigstellung des Re-Design erst im März 2017. Die Versuche mit *S. hermaphrodita* wurden

am 17.05.2017 durchgeführt. Als Rohstoff für die Versuche wurden ca. 100 m³ Erntegut aus der Ernte 2017 zurückgestellt. Der Rohstoff wurde zuerst in einer Hammermühle vorzerkleinert und pneumatisch in den Pufferbehälter der mobilen Pelletiermaschine eingebracht. Es erfolgte im Versuch keine Vortrocknung/Erwärmung des Rohstoffes. Die Versuche wurden im unteren Teillastbereich der Maschine durchgeführt. Die Rohstofffeuchte wurde mit einer Darrwaage in regelmäßigen Abständen kontrolliert. Das erzeugte Produkt wurde Temperaturvermessen, beprobt und mittels einer transportablen Plattformwaage verwogen. Produktionszeit und Motordaten wurden händisch protokolliert. Die eingesetzten Presswerkzeuge wiesen einen Bohrdurchmesser von 12 mm und eine aktive Presskanallänge von 90 mm auf (Pressverhältnis 7,5). Die Entnommenen Proben wurden im Labor der Holzforschung Austria hinsichtlich Wassergehalt, Schüttdichte und mechanischer Festigkeit untersucht (Tabelle 9).

Tabelle 9: Versuchsdesign für die Versuche mit der mobilen Pelletiermaschine der Firma Schaider Group (ehemals SCM)

Run-Order	Pressspalt	Vorschub	Wassergehalt Rohstoff
	mm	$t\ h^{-1}$	%
1	0,1	8	12
2	1	4	12
3	0,1	8	14
4	1	4	14
5	0,1	4	14
6	1	8	12
7	1	8	14
8	0,1	4	12

Verbrennungsversuche

Da die Verwendung von landwirtschaftlichen Brennstoffen im Allgemeinen eine Herausforderung für Feuerungsanlagen darstellt, wurde das Potential von *S. hermaphrodita* für die thermische Verwertung in praktischen Verbrennungsversuchen in Anlehnung an [7] getestet. Neben den Punkten Emissionen, Schlackebildung, Korrosionspotential und Depositionsbildung (Wärmetauscher) wurde auch die Schwankungsbreite der Verbrennungseigenschaften von *S. hermaphrodita* bei unterschiedlichen Ernten und unterschiedlichen Feldern bewertet.

Für die praktischen Versuche wurde der Kessel HPK-VR80-1 des Projektpartners Gilles Energie- und Umwelttechnik GmbH und Co KG verwendet. Bei der Anlage handelte sich um eine Vorschub-Stufenrost-Feuerung mit einer Nennleistung von 80 kW. Um Bedarf und Umfang für allenfalls erforderliche Adaptierungsmaßnahmen zu klären wurden zunächst Vorversuche an den Versuchsständen der Firma Gilles durchgeführt. Der Hauptteil der Versuche fand im Technikum von BE2020 statt. Nach Aufstellung und Installation wurde die Feuerung mit Sensoren ausgestattet, um die einzelne Betriebsgrößen messen, und so die Performance der Anlage bewerten zu können. Kontinuierlich aufgezeichnet wurden Parameter wie Brennstoffzufuhr, Temperaturen auf dem Rost und in der Brennkammer, Abgastemperatur, Abgasgeschwindigkeit und Zusammensetzung (Lambda),

Emissionen (CO, NO_x), Vor- und Rücklauftemperatur sowie die Kesselparameter (Brennstoff- und Luftzufuhr, Abreinigungsintervalle, Kesselleistung).
Es wurden mehrere Versuchsreihen mit dem pelletierten Brennstoff von *S. hermaphrodita* durchgeführt. Ziel war zunächst, die Performance des Kessels bei unterschiedlichen Wärmeanforderungen – Nennlast sowie Teillast (30%) – zu untersuchen. Um *S. hermaphrodita* als Brennstoff einordnen zu können, wurden zusätzliche Versuche mit Fichtenpellets (Klasse A1) durchgeführt (Nennlast sowie 30% Teillast). Außerdem erfolgten Versuche mit Weidenpellets aus Kurzumtrieb sowie Pellets aus Miscanthus. Um die Ergebnisse der unterschiedlichen Testbrennstoffe vergleichen zu können, wurden die Verbrennungsversuche nach einem Standardverfahren in Anlehnung an EN 303-5 durchgeführt. Für jeden Verbrennungsversuch war eine Dauer von 6 Stunden im stabilen Betrieb vorgesehen.
Diskontinuierlich erfolgten Staubmessung in Anlehnung an [8] sowie die Probenahme für die Bestimmung von Chlor und Schwefel im Abgas. Dabei wurden Filterstaub und Waschflüssigkeit während des Verbrennungsversuches beprobt. Im Anschluss an die einzelnen Verbrennungsversuche wurden die Verbrennungsrückstände nach einer Abkühldauer von mindestens 12 h aus dem Kessel entfernt: Die Verbrennungsrückstände (Asche und Schlacke) aus dem Brennraum wurden gesammelt, und über Siebanalyse in Bezug auf Verschlackung charakterisiert. Ablagerungen aus der Zone vor dem Wärmetauscher-Eintritt wurden ebenfalls beprobt, quantifiziert, und für weitere Untersuchungen hinsichtlich der Korrosionseigenschaften herangezogen. Die dafür verwendete Methode simuliert die Umgebungsbedingungen in einem Kamin. Die getrockneten Wärmetauscher-Rückstände wurden einzeln auf Testplättchen aufgebracht und anschließend bei einer relativen Luftfeuchte von 75% und einer konstanten Temperatur von 50 °C in einem Exsikkator aufbewahrt. Nach einem Zeitraum von 48 h wurden die Rückstände makroskopisch hinsichtlich Korrosionsbildung beurteilt.
Die Bewertung der Einsetzbarkeit des Brennstoffes in der Feuerungsanlage erfolgte unter Berücksichtigung von Emissionsgrenzwerten, Schlackebildungsneigung, Korrosionspotential sowie Depositionsneigung von anorganischen Stäuben. Auf der Basis dieser Versuchsergebnisse wurde das Potential für den Einsatz von *S. hermaphrodita* als Brennstoff bewertet sowie die technischen Voraussetzungen für Feuerungsanlagen für die Verbrennung von *S. hermaphrodita* erarbeitet.
Die unterschiedlichen Rohstoffe von *S. hermaphrodita* (von unterschiedlichen Feldern, unterschiedlichen Ernten) wurden anhand der chemischen Zusammensetzung, welche ebenfalls im Projekt erhoben wurden, charakterisiert und eine mögliche Varianz der Verschlackungsneigung und Korrosion abgeschätzt. Dafür wurden ausgewählte Brennstoffindizes nach [9] ermittelt und die Kennzahlen mit anderen Biomasse-Brennstoffen verglichen. Abschließend wurde die prinzipielle Eignung als Brennstoff bewertet.

2.6 Ökonomische Bewertung

Im Rahmen dieses Kapitels wird die Energiepflanze *S. hermaphrodita* in wirtschaftlicher Hinsicht bewertet. Nach einem Überblick über Datengrundlage und Methoden, welche für sämtliche Verwertungsschienen gültig sind, erfolgen spezifische Angaben für die Bereiche Biogaserzeugung und thermische Verwertung.

2.6.1 Datengrundlage und verwendete Methoden

Auf Basis der in den einzelnen Arbeitspaketen gewonnenen Ergebnisse sowie einer darüber hinaus gehenden allgemeinen Datenerhebung wurden die im Rahmen des Projekts näher zu untersuchenden Produktionsverfahren definiert. Mittels der Annuitätenrechnung wurden durchschnittliche jährliche Deckungsbeiträge für diese Produktionsverfahren ermittelt, um *S. hermaphrodita* hinsichtlich wirtschaftlicher Konkurrenzfähigkeit mit anderen Kulturen vergleichen zu können sowie eine generelle Bewertung der untersuchten Aufbereitungs- und Verwertungsmöglichkeiten zu erleichtern. Da im Jahr der Bestandesbegründung normalerweise keine Ernte erfolgt, stehen für die Berechnungen am Standort Grabenegg lediglich die Erntejahre 2015 und 2016 für die Verwertung in Biogasanlagen sowie 2016 und 2017 für die thermische Verwertung zur Verfügung. Am Standort Großweikersdorf können die Daten der Erntejahre 2015, 2016 und 2017 herangezogen werden. Die weiteren Nutzungsjahre wurden durch eine Ertragsschätzung, in enger Absprache mit den KollegInnen des Arbeitspaketes, welche sich für die Optimierung der Rohstoffproduktion verantwortlich zeichnen, bewertet. Bei der Biogaserzeugung am Standort Grabenegg wird von einem langfristigen Ertragsniveau von acht t TM ha^{-1} ausgegangen. Für die thermische Verwertung fließt am Standort Grabenegg ein geschätzter Ertrag von 12 t TM ha^{-1} sowie am Standort Großweikersdorf 10 t TM ha^{-1} in die Berechnungen ein.

Generell ist anzumerken, dass die in sämtliche Berechnungen einfließenden Daten so weit als möglich experimenteller Natur sind, erhoben von den jeweiligen ProjektpartnerInnen. Lediglich in jenen Fällen, in denen dies als Datenbasis nicht ausreichte, wurde auf Standardwerte zurückgegriffen. Bei der Düngung, welche als Entzugsdüngung in die Berechnungen aufgenommen wurde, erfolgte die Ermittlung des ertragsabhängigen Entzuges von N und Kalium aus Brennstoffanalysen im Rahmen des Projektes. Auch der Entzug von Phosphor bei der thermischen Verwertung entstammt diesen Analysen. Der Phosphorentzug bei der Biogaserzeugung wurde auf Basis von Weender-Analysen ermittelt [10]. Kosten hinsichtlich Bestandesbegründung, Kulturführung, Ernte und Rodung des Bestandes wurden auf Basis von Werten aus verschiedenen Datensammlungen ermittelt [11-14]. Bei im landwirtschaftlichen Bereich generell gebräuchlichen Maschinen und Geräten wurden lediglich die variablen Kosten, bei Spezialmaschinen, wie sie beispielsweise im Zuge der Pflanzung zum Einsatz kommen, wurden die Gesamtkosten erfasst. Die Kosten für das Pflanzgut von *S. hermaphrodita* sind jene eines österreichischen Anbieters [15]. Die Kosten für den LKW-Transport wurden bei einem den verwendeten Versuchsflächen nahe gelegenen Transportunternehmen erfragt [16]. Die durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeiträge wurden für alle Produktionsverfahren mittels der Annuitätenrechnung und einer Nutzungsdauer von zehn Jahren mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 2% berechnet.

2.6.2 Biogaserzeugung

Um die Möglichkeiten der Verwertung von *S. hermaphrodita* in Biogasanlagen zu untersuchen, dienten die Versuchsergebnisse am Standort Grabenegg in sämtlichen Ausprägungen (unterschiedliche Pflanzzeitpunkte und Bestandesdichten) als Grundlage, wofür durchschnittliche jährliche Deckungsbeiträge kalkuliert wurden:

- Sida_Pflanzung_spät_1,77_Pfl./m²
- Sida_Pflanzung_früh_1,33_Pfl./m²
- Sida_Pflanzung_früh_1,77_Pfl./m²
- Sida_Pflanzung_früh_2,66_Pfl./m²

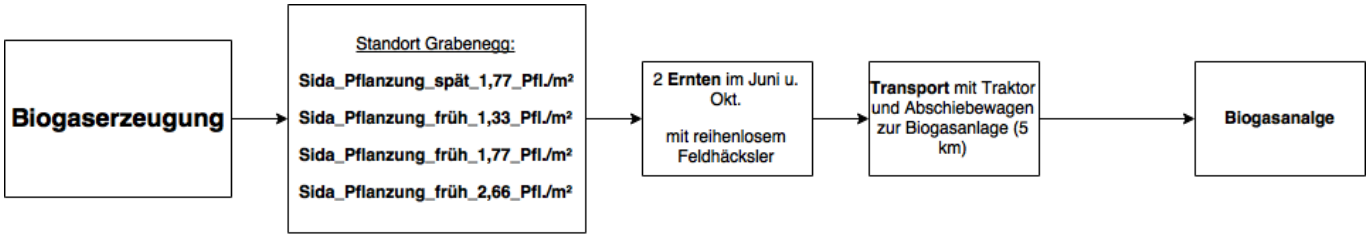


Abbildung 6: Schematische Darstellung der definierten Produktionsverfahren (Biogaserzeugung)

Abbildung 6 zeigt die definierten Produktionsverfahren hinsichtlich Biogaserzeugung. Drei unterschiedliche Kennzahlen wurden für den Vergleich mit anderen Substratpflanzen für die Biogasproduktion ermittelt:

- Durchschnittlicher Deckungsbeitrag pro Jahr unter Einbezug der Kosten für Bestandesbegründung, Kulturführung, Ernte, Transport, Rodung
- Deckungsbeitrag pro Jahr ohne Einbezug der Düngerkosten unter Annahme einer Kreislaufwirtschaft durch Rückführung der Gärreste auf das Feld
- Kosten je m³ Methan, berechnet ohne die Kosten der Bestandesbegründung im ersten Jahr, um eine Grenzbetrachtung lediglich der Erntejahre durchführen zu können.

Der durchschnittliche jährliche Deckungsbeitrag wird auf Basis eines Substratpreises von 100 € t^{-1} TM frei Biogasanlage errechnet. Die Ermittlung des durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeitrages von Mais als Vergleichskultur erfolgte über die Internet-Deckungsbeitragsanwendung der Bundesanstalt für Agrarwirtschaft (AWI, s.a.) mit niederösterreichischen Durchschnittserträgen, da sich die Versuchsflächen im Bundesland Niederösterreich befinden. Die Kosten je m³ Methan (mit berücksichtigten Silierverlusten von 12%) basieren auf den Methanerträgen des Jahres 2015, da darüber hinaus keine Daten zur Verfügung standen.

2.6.3 Thermische Verwertung

Hinsichtlich thermischer Verwertung wird zur Erhöhung der Brennstoffdichte von einer generellen Notwendigkeit einer Pelletierung des Häckselguts von *S. hermaphrodita*, welches erntefrisch eine Schüttdichte von lediglich 100 kg m^{-3} aufweist, ausgegangen. Als Grundlage für die ökonomische Bewertung dient in diesem Bereich einerseits der Versuchsstandort Großweikersdorf, auf welchem ausschließlich Ernteversuche hinsichtlich thermischer Verwertung durchgeführt wurden, und weiterhin die einmalig pro Jahr geernteten Flächen auf dem Standort Grabenegg. In Zusammenarbeit mit den ProjektpartnerInnen der Holzforschung Austria wurden die Gesamtkosten für eine Pelletierung in drei unterschiedlichen Varianten erhoben:

- Pelletierung in einer Kleinanlage (Ausstoß: ca. 3.000 t Pellets pro Jahr)
- Pelletierung in einer industriellen Anlage (Ausstoß: ca. 24.000 t Pellets pro Jahr)
- Mobile Pelletierung mittels Energy Harvester (Ausstoß: ca. 4.000 t Pellets pro Jahr)

Die Kalkulation von durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeiträgen erfolgte unter Einbezug sämtlicher Kosten (Bestandesbegründung, Kulturführung, Ernte, Transport, ggf. Lagerung, Pelletierung, Rodungskosten) für die einzelnen Produktionsverfahren, welche auch auf Abbildung 7 dargestellt sind:

Mobile Pelletierung am Feld

Stationäre Pelletierung mit vorheriger Zwischenlagerung am Hof

- Pelletierung in Kleinanlage
- Industrielle Pelletierung

Stationäre Pelletierung, Direktlieferung vom Feld zur Pelletieranlage

- Pelletierung in Kleinanlage
- Industrielle Pelletierung

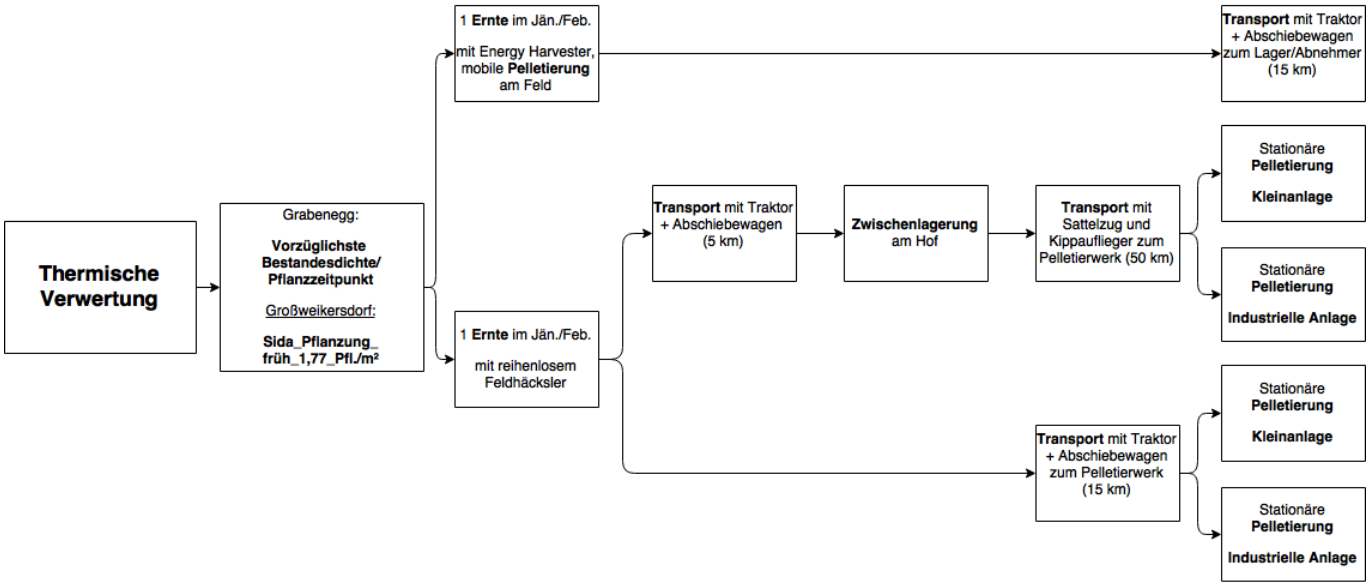


Abbildung 7: Schematische Darstellung der definierten Produktionsverfahren (thermische Verwertung)

Bei der Ermittlung der durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeiträge werden die Erträge der wirtschaftlich vielversprechendsten Versuchsparzelle am Versuchsstandort Grabenegg einbezogen. Diese wird durch eine Teilbetrachtung der Ein- und Auszahlungen von lediglich der ersten drei Jahre (Bestandesbegründung, erstes und zweites Ertragsjahr) ermittelt. Am Standort Großweikersdorf ist lediglich eine Bestandesdichte vorhanden, welche ebenfalls in die Berechnungen einfließt.
Die Leistung wird auf Basis eines geschätzten Pelletspreises von 204 € t^{-1} inkl. MWSt. berechnet, welcher sich zwischen dem Preis von Holzpellets der Qualität A2 (234 € inkl. MWSt.) und Hackschnitzel (180 € inkl. MWSt.) befindet.

3 Ergebnisse

3.1 Bestandesbegründung

3.1.1 Bestandesbegründung durch Pflanzung

Bei einer Bestandesbegründung durch Pflanzung zeigte sich, dass die Junipflanzung gegenüber zur Augustpflanzung deutliche Vorteile aufgrund rascherer Pflanzenentwicklung bringt. Ausschlaggebend dafür ist der im Sommer auftretende Wassermangel, der dazu führt, dass bei der Pflanzung im August die Pflanzen eine Trockenstresssituation ausgesetzt sind und dadurch eine langsamere Jugendentwicklung erfolgt. Diese bedingt eine geringere Bodenbedeckung, was die Gefahr des Überwachsens des Bestandes durch Unkräuter erhöht.

3.1.2 Bestandesbegründung durch Aussaat

Keimfähigkeit bei Behandlung gegen physikalische Dormanz

Die bei *S. hermaphrodita* durch die wasserundurchlässige Samenschale vorliegende physikalische Dormanz konnte mit einer differenzierten Vorbehandlung erfolgreich gebrochen werden, unabhängig von der Samenherkunft. Unterschiedliche, in der Literatur beschriebene Methoden hatten sowohl einen signifikanten Effekt auf die Keimfähigkeit (GRWK 2015: *Welch*-ANOVA, $F = 110{,}298$, $P = 0{,}000$; GRA 2016: *Welch*-ANOVA, $F = 256{,}183$, $P = 0{,}000$; Tabelle 10) als auch auf die ebenfalls gemessene Wasseraufnahmekapazität (GRWK 2015: *Welch*-ANOVA, $F = 116{,}238$, $P = 0{,}000$; GRA 2016: *Welch*-ANOVA, $F = 107{,}718$ $P = 0{,}000$; Tabelle 10) der behandelten Samen. Dabei korrelierte die Wasseraufnahmekapazität der Samen signifikant mit der Keimfähigkeit (GRWK 2015: $r = 0{,}446$, $P < 0{,}01$; GRA 2016: $r = 0{,}484$, $P < 0{,}01$).

Bei den basierend auf Literaturrecherche ausgewählten Vorbehandlungen zeigte sich, dass nicht alle physikalische Dormanz brechenden Methoden einen positiven Effekt auf die Keimfähigkeit von *S. hermaphrodita* Samen haben. Bei beiden Samenherkünften führte eine Behandlung im Wasserbad bei Temperaturen ab 80 °C zu einer signifikanten Verringerung der Keimfähigkeit. Es ist davon auszugehen, dass diese Behandlung zwar die Wasserdurchlässigkeit der Samenschale erhöht, was an der signifikant erhöhten Wasseraufnahme festzumachen ist, die eingesetzten hohen Temperaturen aber gleichzeitig den Embryo schädigen, womit man die signifikant verringerte Keimfähigkeit erklären kann. Im Gegensatz dazu zeigten Wasserbäder bei niedrigeren Temperaturen (60 °C und 70 °C) keinen signifikanten Effekt auf die Keimfähigkeit.

Eine Behandlung mit 95-97% H_2SO_4 zeigte bei frisch geernteten Samen (GRA 2016) einen deutlichen signifikanten positiven Effekt auf Keimfähigkeit und Wasseraufnahme, wohingegen bei Samen welche einen längeren Zeitraum lagernd verbracht hatten (GRWK 2015) die Keimfähigkeit nicht signifikant gesteigert wurde. Da sich auch die Keimfähigkeit und die Wasseraufnahmekapazität von unbehandelten Samen (Kontrolle) beider Samenherkünfte je nach Dauer der Lagerung nach der Samenernte unterscheidet (GRWK 2015: 36,5% Keimfähigkeit, 228 mg Wasseraufnahme; GRA 2016: 21% Keimfähigkeit, 96,75 mg Wasseraufnahme), kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Samenschale mit zunehmender Lagerdauer eine Zersetzung widerfährt. Die führt dazu, dass bei länger gelagerten Samen sich eine H_2SO_4 Vorbehandlung negativ auf die Keimfähigkeit auswirkt, da die Säure

leichter durch die Samenschale dringen kann, und im Inneren des Samens den Embryo beschädigt.
Die höchste gemessene Keimfähigkeit wurde durch eine Vorbehandlung der *S. hermaphrodita* Samen mit dem pneumatischen Seed Scarifier erzielt, bei der regelmäßig eine Keimfähigkeit von um die 90% erreicht wurde. Auch wurde bei dieser Methode mit den Einstellungen 410 kPa für 90 Sekunden die höchste Wasseraufnahme gemessen, unabhängig von der Samenherkunft, was ebenfalls ein Indikator für die Effizienz dieser Methode darstellt.

Tabelle 10: Einfluss verschiedener Vorbehandlungen zur Brechung der physikalischen Dormanz von *S. hermaphrodita* Samen auf die Keimfähigkeit und auf die Wasseraufnahme

Vorbehandlung	GRWK 2015				GRA 2016			
	Keimfähigkeit (%, Mittelwert ±SEM, n=4)		**Wasseraufnahme** (mg H_2O, Mittelwert ±SEM, n=4)		**Keimfähigkeit** (%, Mittelwert ±SEM, n=4)		**Wasseraufnahme** (mg H_2O, Mittelwert ±SEM, n=4)	
Kontrolle								
	36,50	±1,71	228,00	±7,46	21,00	±1,73	96,75	±9,40
95-97% H_2SO_4								
15 min	50,50 n.s.	±4,43	346,00 **	±9,21	66,00 **	±3,74	358,25 ***	±5,80
30 min	46,50 n.s.	±5,91	353,25 **	±3,81	67,50 **	±2,75	377,25 ***	±3,83
45 min	36,50 n.s.	±1,89	326,25 *	±9,27	50,00 **	±2,71	368,75 **	±3,38
60 min	25,50 n.s.	±2,22	345,25 **	±7,50	60,50 **	±2,87	361,50 ***	±6,54
Wasserbad, 60 °C								
30 min	32,50 n.s.	±5,85	186,25 n.s	±7,98	27,50 n.s.	±1,71	208,75 *	±11,59
60 min	23,00 n.s.	±4,04	223,25 n.s	±11,23	37,00 n.s.	±5,20	191,25 *	±8,71
90 min	16,50 n.s.	±5,50	218,75 n.s	±10,77	15,50 n.s.	±4,99	239,50 **	±8,41
Wasserbad, 70 °C								
30 min	53,00 n.s.	±3,70	264,75 n.s	±13,08	34,50 *	±0,96	185,25 n.s.	±11,59
60 min	39,00 n.s.	±4,36	254,00 n.s	±4,34	15,00 n.s.	±5,45	226,75 **	±8,71
90 min	38,00 n.s.	±3,56	264,75 n.s	±5,30	30,50 n.s.	±2,06	242,75 **	±8,41
Wasserbad, 80 °C								
30 min	27,50 n.s.	±2,06	287,00 n.s	±13,36	9,00 n.s.	±1,91	222,50 **	±7,18
60 min	4,50 ***	±1,26	296,50 *	±3,63	2,50 **	±1,26	250,75 **	±7,17
90 min	5,50 **	±1,71	283,25 n.s	±2,63	1,50 *	±0,50	205,75 *	±3,71
Wasserbad, 100 °C								
10 sec	30,00 n.s.	±3,83	318,25 n.s	±13,58	2,50 **	±0,96	323,75 ***	±9,81
60 sec	6,00 **	±1,15	364,25 **	±7,49	0,50 *	±0,50	361,75 ***	±5,41
120 sec	5,50 **	±2,06	368,00 **	±2,89	0,50 *	±0,50	319,75 **	±1,63
Seed Scarifier								
240 kPa, 45 sec	63,00 *	±3,70	288,50 n.s	±17,88	72,00 ***	±2,58	206,00 **	±6,45
240 kPa, 90 sec.	79,00 **	±3,79	369,00 *	±13,69	79,00 ***	±2,08	365,00 ***	±7,37
410 kPa, 45 sec.	87,00 **	±3,32	436,75 **	±2,22	84,50 ***	±2,50	365,00 ***	±4,27
410 kPa, 90 sec.	89,50 ***	±1,50	460,00 ***	±4,51	89,50 ***	±1,71	427,00 ***	±14,15

*** Signifikant unterschiedlich von der Kontrolle mit P<0,001, ** signifikant unterschiedlich von der Kontrolle mit P<0,01, * signifikant unterschiedlich von der Kontrolle mit P<0,05, n.s. nicht signifikant

Keimfähigkeit bei einer Behandlung gegen die physiologische Dormanz, wenn die physikalische Dormanz bereits gebrochen ist

Anhand unserer Versuche konnten wir keine vorliegende kombinierte Dormanz von physikalischer und physiologischer Dormanz wie sie für manche Malvenarten bereits beschrieben worden ist [17]. bei *S. hermaphrodita* Samen feststellen. Wenn Samen der Herkunft GRA 2016, nach einer die physikalische Dormanz brechende Vorbehandlung mit dem pneumatischen Seed Scarifier, einer Vorbehandlung zur Brechung einer möglichen physiologischen Dormanz unterzogen wurde, konnte kein signifikanter Effekt auf die Keimfähigkeit festgestellt werden (ANOVA, F = 1,395, P = 0,226, Tabelle 11). Auch bei der Samenherkunft GRWK 2015 trat keine Steigerung der Keimfähigkeit ein. Vielmehr hatte eine Stratifikation der Samen einen signifikant negativen Effekt auf die Keimfähigkeit (ANOVA, F = 7,906, P = 0,000, Tabelle 11). Samen welche einer Kältestratifikation als Vorbehandlung ausgesetzt wurden, zeigten oftmals einen deutlich erhöhten Schimmelpilzbefall, was als Ursache für die verringerte Keimfähigkeit herangezogen werden kann.

Tabelle 11: Effekt verschiedener Behandlungen zur Brechung der physiologischen Dormanz, bei vorheriger Brechung der physikalischen Dormanz

Vorbehandlung	Keimfähigkeit GRWK 2015			Keimfähigkeit GRA 2016		
Kontrolle	74,0		±3,56	87,00		±1,73
Stratifikation, 14 Tage 7 °C	64,5	n.s.	±0,50	87,50	n.s.	±2,36
Stratifikation, 21 Tage 7 °C	55,5	**	±3,77	81,00	n.s.	±3,11
Stratifikation, 28 Tage 7 °C	57,0	**	±2,08	85,00	n.s.	±4,43
GA_3, 0,02%	75,0	n.s.	±2,65	90,50	n.s.	±0,50
GA_3, 0,05%	77,0	n.s.	±2,52	90,50	n.s.	±1,71
GA_3, 0,1%	72,5	n.s.	±2,22	88,50	n.s.	±3,86
12 h Licht, 12 h Dunkelheit	71,0	n.s.	±1,29	86,50	n.s.	±0,96
24 h Licht	66,0	n.s.	±3,92	89,00	n.s.	±2,65
Wechseltemp. 15 °C/25 °C	78,5	n.s.	±0,50	91,00	n.s.	±3,00
Wechseltemp. 20 °C/30 °C	77,5	n.s.	±4,86	83,50	n.s.	±2,22

*** Signifikant unterschiedlich von der Kontrolle mit P<0,001, ** signifikant unterschiedlich von der Kontrolle mit P<0,01, * signifikant unterschiedlich von der Kontrolle mit P<0,05, n.s. nicht signifikant

Ergebnisse des Aussaatversuchs

Die in den Laborversuchen zur vorliegenden Dormanz bei *S. hermaphrodita* Samen gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem Aussaatversuch in die Praxis übertragen. An drei ca. 14 Tage auseinanderliegenden Aussaatterminen wurden drei vorbehandelte Varianten zusammen mit einer Kontrollvariante ausgesät. Anschließend wurde einen Monat nach dem letzten Aussaattermin (12.07.2016) der Feldaufgang erhoben. Dabei zeigte sich, dass alle drei getesteten Vorbehandlungen

einen signifikanten Effekt auf den Feldaufgang hatten (ANOVA; F = 4,797, P = 0,007, Tabelle 12). Bei unbehandeltem Saatgut gingen nur etwa 10% aller ausgesäten Samen auf, unabhängig vom Aussaattermin. Durch eine physikalische Dormanz brechende Vorbehandlung (H_2SO_4 oder mechanische Skarifizierung) konnte der gemessene Feldaufgang signifikant gesteigert werden. Interessanterweise zeigte eine sowohl physikalische als auch physiologische Dormanz brechende Vorbehandlung (H_2SO_4 + 24 h Einweichen in 0,1% GA_3 Lösung) einen weniger positiven Effekt auf den Feldaufgang als die beiden Vorbehandlungen, bei denen nur die physikalische Dormanz gebrochen wurde (Tabelle 12). Dies kann als weiterer Hinweise darauf gedeutet werden, dass bei *S. hermaphrodita* Samen keine kombinierte Dormanz vorliegt. Weiterhin zeigte sich im Aussaatversuch, dass ein früher Aussaattermin (Anfang Mai) sich positiv auf den Feldaufgang auswirkt. Der höchste ermittelte Feldaufgang konnte bei einer Aussaat zu diesem Zeitpunkt ermittelt werden (Abbildung 8). Mit fortschreitender Vegetationsperiode führt eine Aussaat zu einem verminderten Feldaufgang, wie der Feldversuch aufzeigen konnte. Ein hoher Feldaufgang ist vorteilhaft für einen schnellen und gleichförmigen Feldaufgang [18], weshalb ein früher Aussaattermin bei einer Bestandesbegründung von *S. hermaphrodita* durch Aussaat vorzuziehen ist. Ein noch früherer Aussaattermin könnte sich noch positiver auf den Feldaufgang auswirken und sollte für weiterführende Untersuchungen in Betracht gezogen werden.

Simultan zum Aussaatversuch wurde die Keimfähigkeit der ausgesäten Varianten ebenfalls unter Laborbedingungen ermittelt. Es zeigte sich ein vergleichbarer Trend wie bei dem Feldversuch. Die Kontrollvariante wies eine niedrige Keimfähigkeit auf, welche sich aber durch eine physikalische Dormanz brechende Vorbehandlung (H_2SO_4 und mechanische Skarifizierung) signifikant steigern ließ. Eine Vorbehandlung zur Brechung einer kombinierten Dormanz bewirkte ebenfalls eine signifikante Erhöhung der Keimfähigkeit, allerdings in einem geringeren Ausmaß als bei den anderen beiden Vorbehandlungen. Den generell niedrigeren Feldaufgang beim Aussaatversuch im Vergleich zu den Keimfähigkeiten unter Laborbedingungen führen wir auf externe und nicht zu kontrollierende externe Faktoren zurück (Tabelle 12).

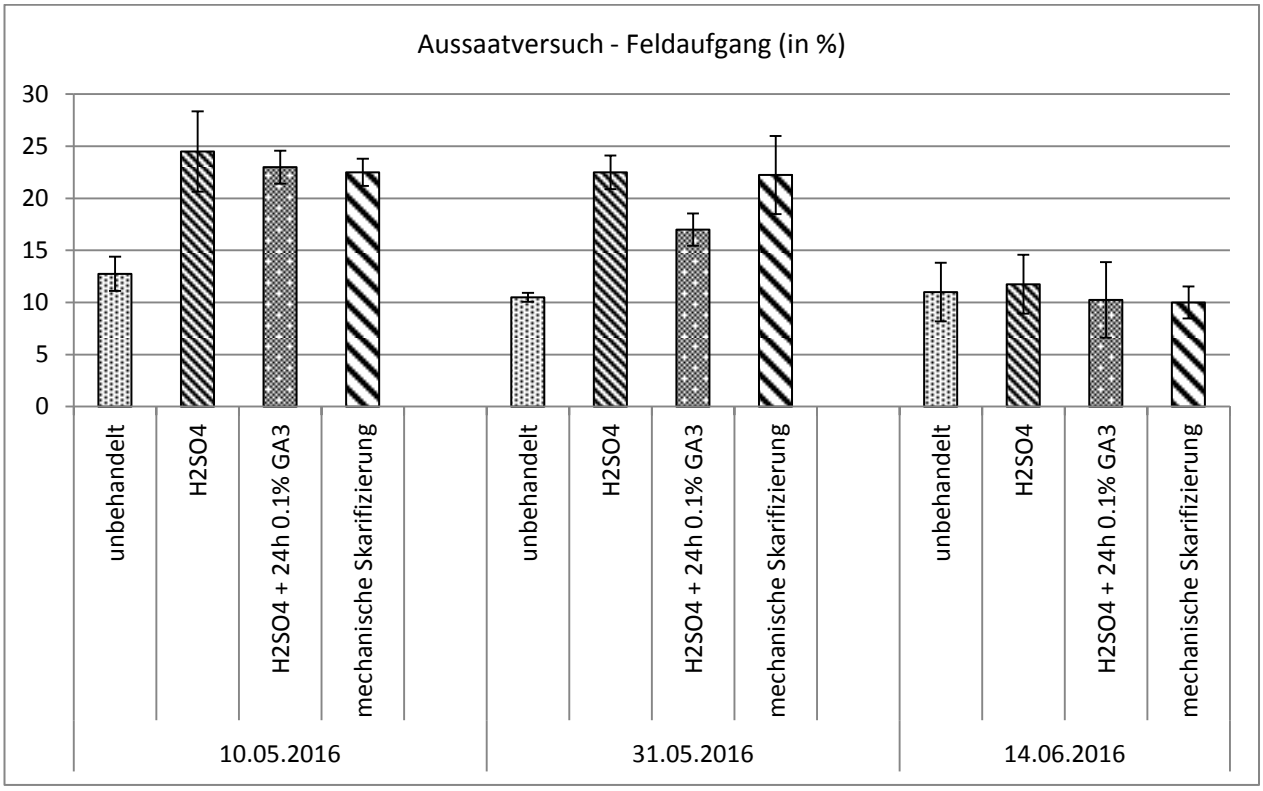


Abbildung 8: Feldaufgang der vier ausgesäten Varianten an den drei aufeinanderfolgenden Aussaatterminen

Tabelle 12: Mittlerer Feldaufgang der vier ausgesäten Varianten (zusätzlich ihrer Keimfähigkeit unter Laborbedingungen) und mittlerer Feldaufgang der drei aufeinanderfolgenden Aussaattermine

	Feldaufgang (%, Mittelwert ±SEM)		**Keimfähigkeit unter Laborbedingungen** (%, Mittelwert ±SEM)	
Vorbehandlung (n=12)				
Kontrolle	11,42 ±1,95	a	25,00 ±2,89	a
H_2SO_4	19,58 ±4,04	b	64,00 ±4,24	c
H_2SO_4 + 24 h 0,1% GA_3	16,75 ±3,57	ab	44,50 ±3,30	b
Mechanische Skarifizierung	18,25 ±3,81	b	64,50 ±4,57	c
Aussaattermin (n=16)				
10.05.2016	20,69 ±3,29	b		
31.05.2016	18,06 ±3,28	b		
14.06.2016	10,75 ±2,82	a		

Neben dem höchsten Feldaufgang wies der am frühesten Aussaattermin (10.05.2016) etablierte Bestand zum Ende der Vegetationsperiode ebenfalls die vielversprechendste Pflanzenentwicklung auf. Pflanzenhöhe, Blattflächenindex und TM-Ertrag wiesen bei einer Aussaat Anfang Mai die höchsten Werte auf (Tabelle 13). Eine spätere Aussaat hatte einen signifikant negativen Effekt auf diese Messwerte. Ein über Wurzelstecklinge etablierter Feldversuch von *S. hermaphrodita* ergab einen TM-Ertrag von 2,51 t ha^{-1} am Ende der Vegetationsperiode des Etablierungsjahres [1]. In einem anderen Aussaatversuch [19] variierten die erhobenen TM-Ertragswerte im Etablierungsjahr zwischen 2,44 und

3,86 t ha^{-1}, während eine Pflanzenwuchshöhe von 152,0 bis 191,3 cm gemessen wurde. In diesen beiden Experimenten steigerte sich der in den darauffolgenden vier Vegetationsjahren gemessene TM-Ertrag um ein vielfaches. Da die erhobenen Werte für den TM-Ertrag und die Pflanzenhöhe des ersten Aussaattermins des im Projektes SIDecA durchgeführten Aussaatversuches sich in einem vergleichbaren Bereich befanden, erwarten wir hohe und stabile Erträge in den nachfolgenden Anbaujahren.

Tabelle 13: Pflanzenhöhe, Blattflächenindex und TM-Ertrag der drei im Feldversuch getesteten Aussaattermine am Ende der ersten Vegetationsperiode

Aussaattermin	Pflanzenhöhe (cm, Mittelwert ±SEM, n=80)			Blattflächenindex (Mittelwert ±SEM, n=48)			Ertrag (TM t ha^{-1})
10.05.2016	173,98	a	±3,79	2,507	a	±0,1	4,41
31.05.2016	116,80	b	±4,18	1,616	b	±0,09	1,84
14.06.2016	82,73	c	±3,91	1,265	c	±0,12	1,43

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die bei *S. hermaphrodita* vorliegende physikalische Dormanz der Samen, bedingt durch die wasserundurchlässige Samenschale, am effizientesten durch eine Behandlung mit dem pneumatischen Seed Scarifier brechen ließ. Die hohe Anzahl an gekeimten skarifizierten Samen sowie kein signifikanter positiver Effekt von allen getesteten physiologische Dormanz brechenden Vorbehandlungen deuten darauf hin, dass keine kombinierte Dormanz vorliegt. Diese Ergebnisse konnten im Aussaatversuch praktisch angewendet werden, um den Feldaufgang signifikant zu erhöhen. Vorbehandelte *S. hermaphrodita* Samen kombiniert mit einem frühen Aussaattermin resultierte in einen Pflanzenbestand, welcher in Bezug auf TM-Ertrag und Pflanzenhöhe vergleichbar war mit den Versuchsflächen, welche im Projekt durch eine kosten- und arbeitsintensive Pflanzung von Jungpflanzen etabliert wurden.

3.2 Bestandesführung

Herausfordernd im Anlagejahr ist die Unkrautbekämpfung. Die Anlage der Bestände mit Reihenweiten von 80 cm ermöglicht die mechanische Unkrautbekämpfung mittels Reihenfräsen, jedoch ist eine zusätzliche, zwei- bis dreimalige händische Bearbeitung in den Reihen, je nach Unkrautdruck, erforderlich. In den Folgejahren sind durch den raschen Bestandesschluss und die vollständige Bodenbedeckung keine Unkrautmaßnahmen erforderlich.
Dadurch ist ab dem ersten vollen Ertragsjahr bzw. nach der Etablierung des Bestandes außer einer jährlichen Frühjahrsdüngung zu Vegetationsbeginn keine weitere Bestandespflege notwendig.

3.3 Biomasseertragspotentials

3.3.1 Biomasseerträge bei einer Biogasnutzung

Die Ernten der im Juni 2014 in Grabenegg gepflanzten *S. hermaphrodita* Bestände brachten im zweiten Vegetationsjahr (2015) als grüne Biomasse je nach Bestandesdichte zwischen 6,65 t TM ha^{-1} (1,33

Pfl. m^{-2}) und 9,50 t TM ha^{-1} (2,66 Pfl. m^{-2}) Gesamterträge pro Jahr (Tabelle 14). Der Ertrag der Augustpflanzung lag bei 6,69 t TM ha^{-1}. Im Vegetationsjahr 2016 lagen die Erträge zwischen 7,30 t TM ha^{-1} (1,33 Pfl. m^{-2}, Junipflanzung) und 10,89 t TM ha^{-1} (1,77 Pfl. m^{-2} Augustpflanzung).
Auffällig ist bei der zweimaligen Ernte der erhöhte TS-Gehalt bei der Biomasseernte im Herbst. Dies zeigt, dass zu diesem Zeitpunkt bereits die Verholzung der Bestände beginnt. Durch unzureichende Niederschläge zwischen der ersten und zweiten Ernte, wie dies im Jahr 2016 der Fall war, reduziert sich der Ertrag zum zweiten Erntetermin stark und auch der TS-Gehalt ist deutlich höher. Tendenziell lässt sich feststellen, dass eine höhere Pflanzendichte auch höhere Erträge einbringt.
Zudem ist aus den Ergebnissen abzulesen, dass die Augustpflanzung auf die niedrigen Jahresniederschläge im ersten Nutzungsjahr 2015 (634,7 mm Jahresniederschlag) stärker reagiert als die im Juni gepflanzten Bestände.

Tabelle 14: Ernteergebnisse Biogasnutzung – 1. und 2. Erntetermin der Jahre 2015 und 2016

Biogasnutzung 1. Termin		**TS-Gehalt**	**TM (t ha^{-1})**	**TS-Gehalt**	**TM (t ha^{-1})**
		30.06.2015		22.06.2016	
Auspfl. 23 Juni 2014	1,33 Pfl. m^{-2}	23,5%	4,08	21,5%	5,94
	1,77 Pfl. m^{-2}	22,4%	4,71	21,8%	7,23
	2,66 Pfl. m^{-2}	23,2%	5,96	23,6%	6,37
Auspfl. 25 August 2014	1,77 Pfl. m^{-2}	19,0%	2,72	18,9%	6,81

Biogasnutzung 2. Termin		**TS-Gehalt**	**TM (t ha^{-1})**	**TS-Gehalt**	**TM (t ha^{-1})**
		16.10.2015		25.10.2016	
Auspfl. 23 Juni 2014	1,33 Pfl. m^{-2}	27,90%	2,57	36,57%	1,36
	1,77 Pfl. m^{-2}	27,90%	3,74	37,24%	1,38
	2,66 Pfl. m^{-2}	29,60%	3,53	36,88%	1,56
Auspfl. 25 August 2014	1,77 Pfl. m^{-2}	27,9%	3,97	36,9%	4,08
Biogasnutzung GESAMT		**TS-Gehalt**	**TM (t ha^{-1})**	**TS-Gehalt**	**TM (t ha^{-1})**
		2015		2016	
Auspfl. 23 Juni 2014	1,33 Pfl. m^{-2}		6,65		7,30
	1,77 Pfl. m^{-2}		8,45		8,62
	2,66 Pfl. m^{-2}		9,50		7,93
Auspfl. 25 August 2014	1,77 Pfl. m^{-2}		6,69		10,89

3.3.2 Biomasseerträge bei einer thermischen Nutzung

Grundsätzlich konnten bei der einmaligen Ernte zur thermischen Nutzung (Tabelle 15) in beiden Erntejahren und unabhängig von Pflanzzeitpunkt und Pflanzendichte höhere TM-Erträge erzielt werden als bei der zweimaligen Biomasseernte. Auch hier zeigt sich, dass durch eine gute Wasserversorgung der Bestände ein deutlich erhöhtes Ertragspotential vorhanden ist. Die Erträge lagen 2015 zwischen 5,33 t ha^{-1} (Augustpflanzung) und 9,71 t ha^{-1} bei der Junipflanzung mit 2,66 Pfl. m^{-2}. Wie auch bei den Biomasseerträgen erbrachte die Augustpflanzung im Erntejahr 2016 die höchsten Erträge mit 17,79 t ha^{-1}. Die in diesem Jahr niedrigsten Erträge von 13,21 t ha^{-1} hatte die Versuchsfläche mit der

geringsten Pflanzenanzahl. Es bestätigt sich also auch bei der Ernte für die thermische Nutzung, dass höhere Pflanzenzahlen zu höheren Erträgen führen.

Bei den Versuchen zur thermischen Nutzung wurden zum Zeitpunkt der Ernte auch Einzelpflanzenuntersuchungen durchgeführt. Dabei wurde bei fünf zufällig ausgewählten Pflanzen die Triebanzahl pro Pflanze gezählt und von dreißig Trieben die Stängeldicke gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 zusammengefasst und bestätigen die oben angeführten Ernteergebnisse. Geringere Triebzahlen, Stängeldurchmesser und auch Wuchshöhen sind der Beleg für die niedrigeren Erträge 2015 gegenüber 2016. Weiter konnte tendenziell festgestellt werden, dass geringere Triebzahlen pro Pflanze zu stärkeren Einzeltrieben führen. Ein Einfluss der unterschiedlichen Pflanzdichten konnte auf die erhobenen Parameter nicht festgestellt werden.

Tabelle 15: Ernteergebnisse thermische Nutzung – Erntetermin der Jahre 2015 und 2016

thermische Verwertung		TS-Gehalt	TM (t ha^{-1})	TS-Gehalt	TM (t ha^{-1})
		27.01.2016		23./24.01.2017	
Auspfl. 23 Juni 2014	1,33 Pfl. m^{-2}	78,4%	7,08	79,9%	13,21
	1,77 Pfl. m^{-2}	79,0%	8,91	80,0%	13,59
	2,66 Pfl. m^{-2}	78,5%	9,71	80,3%	14,35
Auspfl. 25 August 2014	1,77 Pfl. m^{-2}	78,7%	5,33	79,8%	17,79
		22.01.2016		08.02.2017	
Auspfl. Juni 2010	Großweikersdorf; 1,77 Pfl. m^{-2}	81,9%	8,55	80,6%	13,18

Tabelle 16: Anzahl der Triebe pro Pflanze und Stängeldurchmesser bei den Versuchen zur thermischen Nutzung zum Zeitpunkt der Erntetermin der Jahre 2015 und 2016

thermische Verwertung	Wuchshöhe (cm)	Triebanzahl	Stängel (mm)	Wuchshöhe (cm)	Triebanzahl	Stängel (mm)
	27.01.2016			23. u. 24.01.2017		
Auspfl. 23 Juni 2014	330	12,1	14,2	400	16,5	15,8
Auspfl. 25 August 2014	230	--	18,0	400	13,9	18,1
	22.01.2016			08.02.2017		
Auspfl. Juni 2010	310	15,5	13,8	400	16,2	14,6

3.3.3 Grundbodenuntersuchungen und N_{min}-Bodenuntersuchungen

Zu Versuchsbeginn wurden auf den Versuchsflächen Grundbodenuntersuchungen durchgeführt (Tabelle 17). Die Analysen ergaben, dass sowohl die Versuchsfläche in Grabenegg als auch die Versuchsfläche in Großweikersdorf mit den Grundnährstoffen ausreichend bis hoch versorgt waren. Somit wurde festgelegt im Versuchszeitraum keine Grunddüngung von Phosphor und Kalium durchzuführen. Eine weitere Grundbodenuntersuchung am 27.10.2016 der Versuchsfläche in Grabenegg zeigte, dass es zu keinen nennenswerten Veränderungen bei den Nährstoffgehalten nach zwei Versuchsjahren gekommen war.

Um das Potential von *S. hermaphrodita* auf die Vermeidung von N-Austrägen ins Grundwasser bewerten zu können wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten N_{min}-Beprobungen an den Beständen durchgeführt (Tabelle 18). Es zeigt sich, dass die N_{min}-Gehalte unabhängig von den Bestandesdichten außer zu

Vegetationsbeginn auf einem niedrigen Niveau liegen. Sowohl nach der 1. Ernte als auch nach der 2. Ernte für die Biogasnutzung finden sich N_{min}-Gehalte die darauf schließen lassen, dass die Pflanzen den im Boden vorliegenden N gut verwerten können.

Tabelle 17: Grundbodenuntersuchungen an den Versuchsstandorten Grabenegg und Großweikersdorf

		Einstufung der Phosphor- und Kaliumversorgung des Bodens (0-30)			
		mg P kg^{-1}		**mg K kg^{-1}**	
Versuchsstandort	Beprobungs-zeitpunkt	nach CAL (ÖNORM L 1087)	Gehaltsklasse (für Ackerland)	nach CAL (ÖNORM L 1087)	Gehaltsklasse (für Ackerland)
Grabenegg	28.04.2014	84	**C** (ausreichend)	124	**C** (ausreichend)
	27.10.2016	74	**C** (ausreichend)	135	**C** (ausreichend)
Großweikersdorf	28.04.2014	88	**C** (ausreichend)	318	**D** (hoch)

Tabelle 18: N_{min}-Gehalt unterschiedlicher Bodenschichten, zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei zweimaliger Ernte für die Biogasnutzung, im Mittelwert über alle Bestandesdichten in Grabenegg in den Jahren 2015 und 2016

Bodentiefe (cm)	**N_{min} (kg ha^{-1})**					
	2015			**2016**		
	Veg.-Beginn (26.02.2015)*	nach 1. Ernte (01.07.2015)*	nach 2. Ernte (21.10.2015)**	Veg.-Beginn (27.01.2016)**	nach 1. Ernte (24.06.2016)**	nach 2. Ernte (27.10.2016)**
0-30	20,7 ± 2,5	24,7 ± 2,4	8,3 ± 1,1	13,0 ± 1,4	10,9 ± 1,1	4,7 ± 0,3
30-60	21,0 ± 4,2	11,7 ± 2,4	6,8 ± 0,8	12,0 ± 1,9	5,3 ± 0,7	2,6 ± 0,3
60-90	21,3 ± 1,7	9,0 ± 5,7	3,9 ± 1,0	8,8 ± 2,6	3,7 ± 0,3	2,0 ± 0,5

* 1 Wh je Bestandesdichte

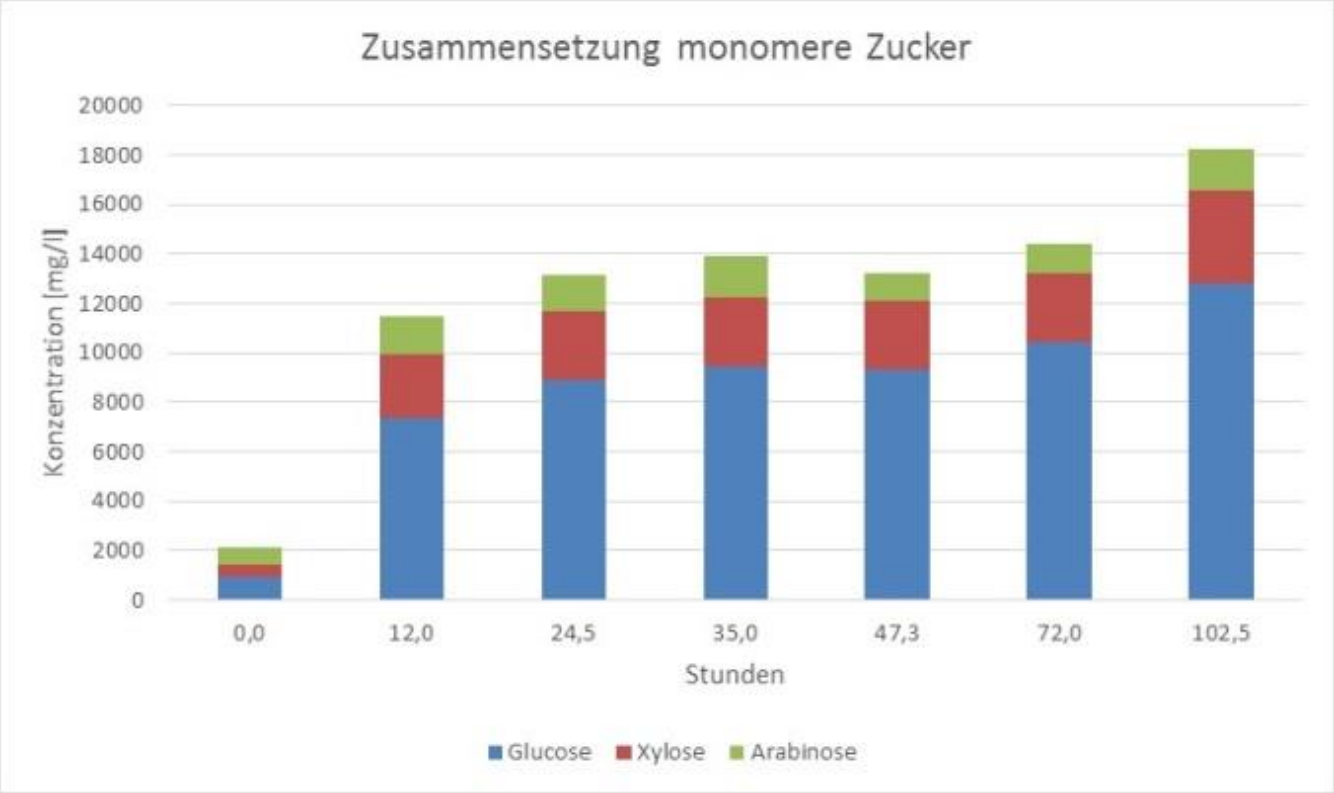
** 3 Wh je Bestandesdichte

3.4 Energetische Verwertung

3.4.1 Fermentative Treib- oder Rohstoffproduktion

Für eine energetische Nutzung von *S. hermaphrodita* wurden verschiedene Untersuchungen abseits der gängigen Prozesse Biogas oder thermische Verwertung durchgeführt. Für eine fermentative Nutzung lassen sich verschiedene Organismen verwenden, woraus unterschiedliche Endprodukte wie Alkohole und Lösungsmittel resultieren können. Der Fokus der in diesem Arbeitspaket durchgeführten Fermentationen lag auf bakteriellen Fermentationen. Für die Ethanolgewinnung wurde *Zymomonas mobilis* verwendet, für die ABE Fermentation Clostridien. Die Organismen nutzen verschiedene Kohlenhydrate, manche Clostridien auch Aminosäuren, zur Produktion von Alkoholen und Lösungsmitteln. Um die Kohlenhydrate verfügbar zu machen, sind die Organismen relativ limitiert, da sie die vorliegenden chemischen Bindungen nicht spalten können. In der Regel verfügen Organismen über

Enzyme zur Spaltung der poly- oder oligomeren Kohlenhydrate und können somit die verfügbaren Kohlenhydrate nutzen. Allerdings können die in den Versuchen verwendeten Bakterien die längerkettigen Kohlenhydrate nicht direkt aufschließen, weshalb das Pflanzenmaterial durch einen zusätzlichen Aufschluss für die Bakterien verfügbar gemacht werden muss. Hierzu wurden verschiedene Verfahren auf ihre Tauglichkeit bei der Anwendung auf *S. hermaphrodita* Biomasse hin untersucht. Das angewendete Verfahren wurde in Anlehnung an Verfahren zur Bioethanolgewinnung aus zellulosereichem Pflanzenmaterial entwickelt. Die thermische Vorbehandlung und enzymatische Verzuckerung des Pflanzenmaterials ergab eine Ausbeute von rund 18 g l^{-1}. Es wurden zwei Enzymkonzentrationen untersucht, wobei keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten (Abbildung 9). Die Verzuckerungsdauer wurde bis zu 102,5 h untersucht. Wobei bereits nach 24 h der Großteil der Glucose freigesetzt wurde. Die Zugabe der Cellulase erfolgt bewusst in hohen Konzentrationen, da eine Limitierung der Ausbeute durch die Organismen vermieden werden sollte. Die Oligo- und Disaccharide hatten einen Anteil von 20 g l^{-1}.



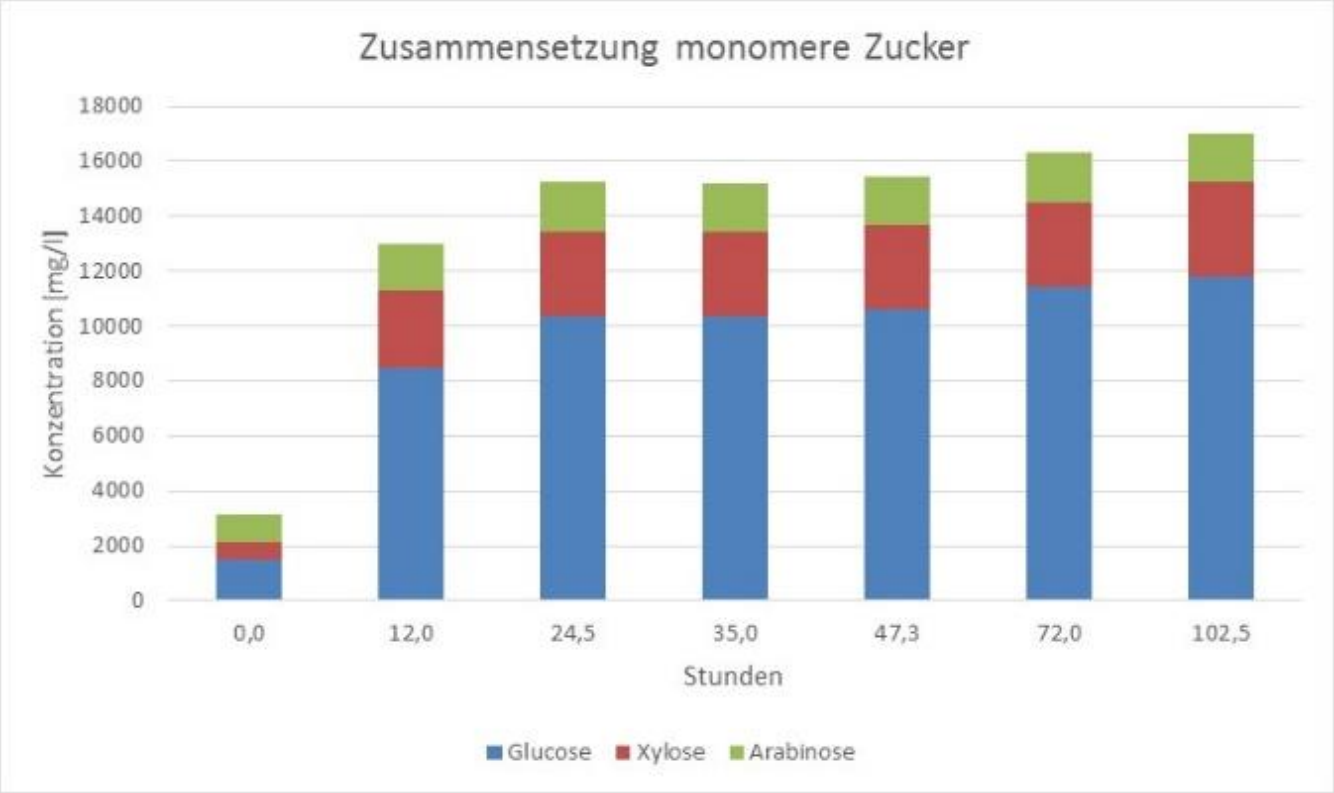


Abbildung 9: Verzuckerung mit zwei verschiedenen Enzymkonzentrationen 3,5 (oben) und 7 ‰ (unten) bezogen auf die Frischmasse

Das somit vorbehandelte Pflanzenmaterial wurde mittels *Zymomonas mobilis* zu Bioethanol und mittels Clostridien zu ABE vergoren.

Das zuvor behandelte Substrat wurde für die Ethanolfermentation mit *Zymomonas mobilis* verwendet. Auf Grund der geringen Menge an freigesetzten verwertbaren Kohlenhydraten (von 12-15 g l^{-1}) konnte mit 6 g l^{-1} nur ein sehr geringer Ethanolgehalt erreicht werden. Der verwendete Organismus verwertete innerhalb eines halben Tages die gesamte Glucose, erst danach wurde auf die vorliegende Maltose zurückgegriffen (Abbildung 10).

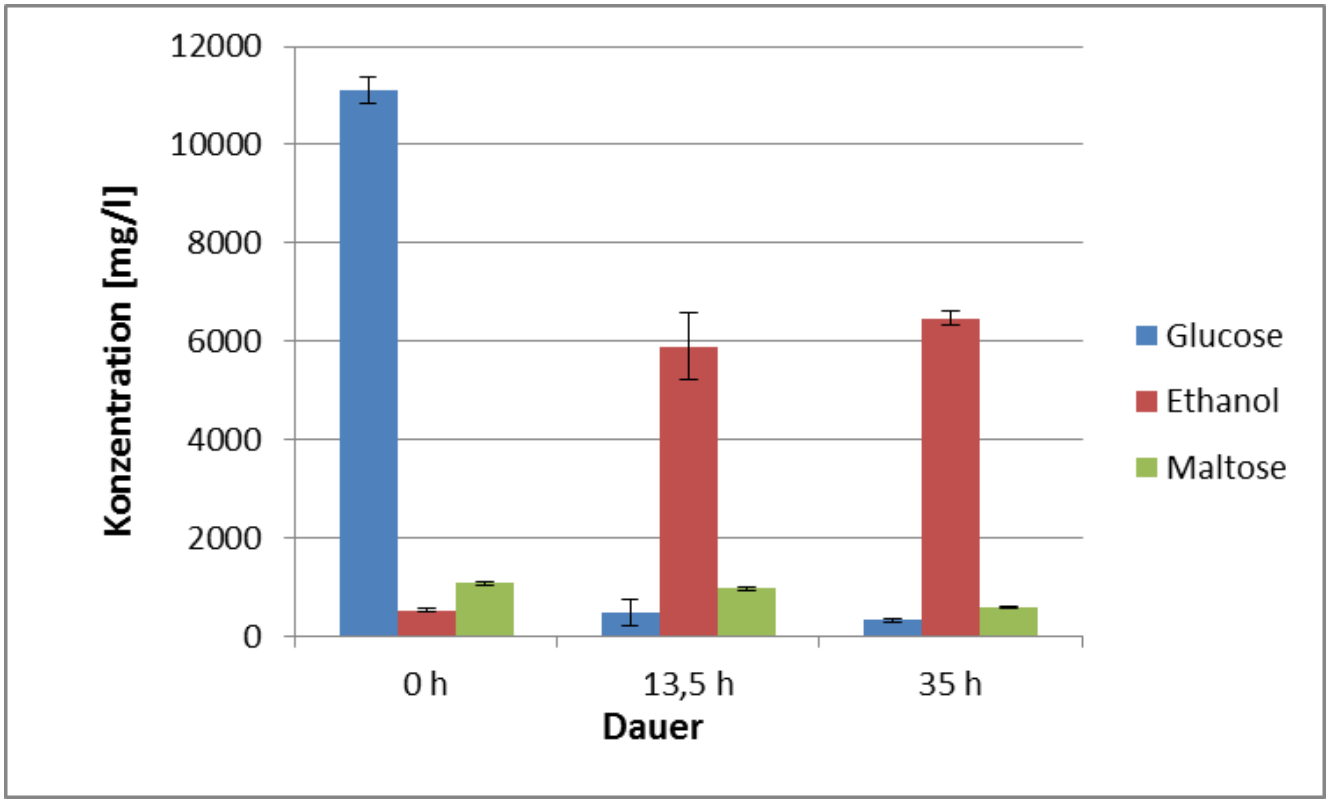


Abbildung 10: Fermentation mit *Zymomonas mobilis*

Anders als bei der reinen Ethanolgewinnung muss bei der ABE Fermentation mittels Clostridien ein zweistufiger Prozess durchgeführt werden. Im ersten Schritt produzieren die Clostridien aus Kohlenhydraten als flüssige Produkte Essigsäure und Buttersäure sowie als gasförmige Produkte H_2 und CO_2. Dabei fällt der pH-Wert ab. Fällt der pH-Wert unter einen spezifischen Wert, fangen die Clostridien an, in die Solventogenese überzugehen. Dies resultiert in der Bildung von Aceton, Butanol und Ethanol aus den flüssigen Produkten.

Vor den Versuchen wurden verschiedene Clostridienstämme auf ihre Tauglichkeit für die durchzuführenden Versuche untersucht. Darunter waren *Clostridium acetobutylicum* DSMZ 1731, DSMZ 792 und *Clostridium beijerinckii* DSMZ 6422.

Die Untersuchungen zeigen leider nur eine geringe bis keine Ausbeute an Aceton, Butanol und Ethanol, insbesondere im Vergleich zu bisherigen Arbeiten sind die erreichten Ausbeuten sehr gering. Ursache ist die schlechte Verfügbarkeit der Kohlenhydrate, die durch die Vorbehandlung nicht wesentlich gesteigert werden konnte. Wie in Abbildung 11 zu sehen ist, konnte keine nennenswerte Produktion von ABE stattfinden. Dies ist auf das Verhalten bei der zweiphasigen Fermentation zurückzuführen. Im Ausgangssubstrat konnte nur eine geringe Kohlenhydratkonzentration detektiert werden (siehe Abbildung 9 oben). Diese wurde in der ersten Phase (Abbildung 10) zu den Intermediaten (VFA, CO_2

und H_2) umgesetzt. Für die zweite Phase der ABE Fermentation (Solventogenese) blieben somit nicht ausreichend Kohlenhydrate übrig, um ATP zu generieren, welches für die Bildung von ABE benötigt wird. Aus diesem Grund kann mit diesem Substrat keine vollständige ABE Fermentation durchgeführt werden. In Vorversuchen wurde eine geringere Verdünnung, also eine höhere Zuckerkonzentration, von aufgeschlossenem Substrat verwendet. Hierbei kam es zu keiner nennenswerten Intermediatbildung (VFA). Ursache ist eine starke Inhibierung, da bei höheren Verdünnungsreihen die Clostridien Stoffwechselaktivitäten zeigten.

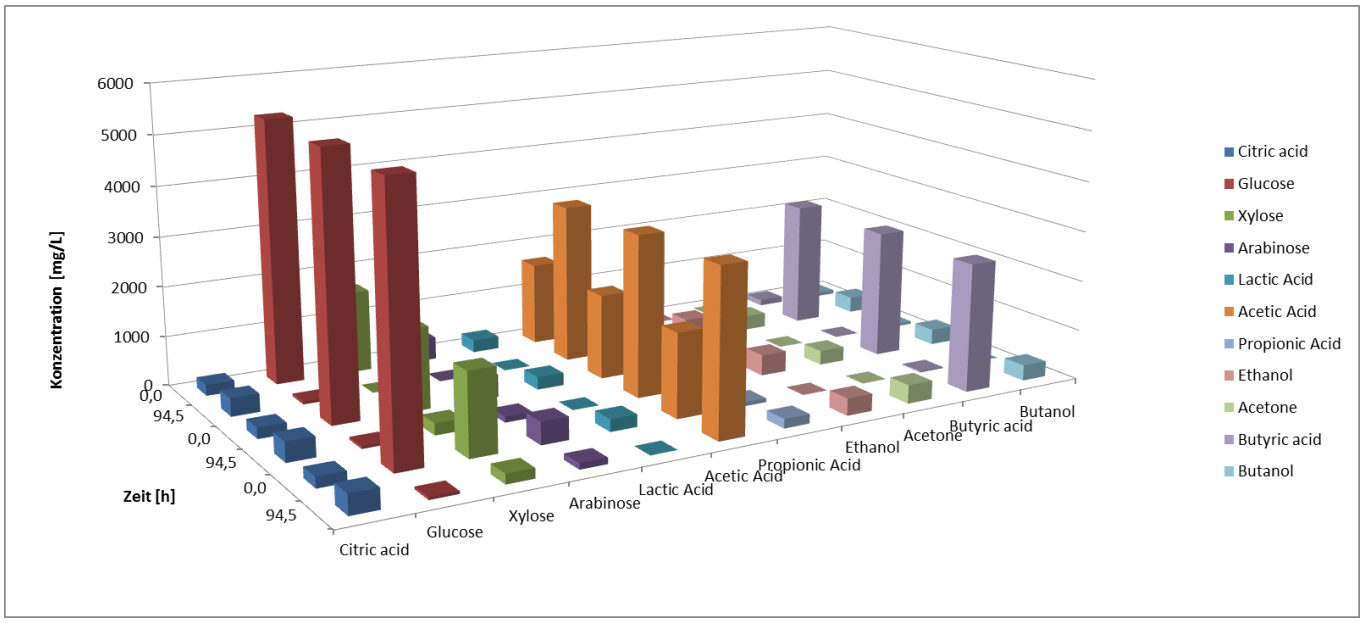


Abbildung 11: *Clostridium acetobutylicum DSMZ 792* mit Anfangs pH-Wert 4,87

3.4.2 Biogaserzeugung

Die Nutzung anaerober Konsortien zur Biogasgewinnung ist Stand der Technik und wird für die Bereitstellung von Biogas und Biomethan zur Gewinnung von Elektrizität und Wärme bereits umfangreich eingesetzt. Als Einsatzstoffe kommen Rohstoffe wie Mais, Grassilage und Getreide oder Reststoffe aus der Landwirtschaft oder der Lebensmittelindustrie (Gülle, Schlachtabfälle, etc.) zum Einsatz. Im vorliegenden Projekt wurde das Pflanzenmaterial auch für die Biogasgewinnung verwendet. In ersten Versuchen wurden die unterschiedlichen Ernten auf das Biomethanpotential hin untersucht. Im zweiten Versuchsjahr wurden die folgenden Biomethanpotentiale der unterschiedlichen Anpflanzvarianten erreicht (Abbildung 12).

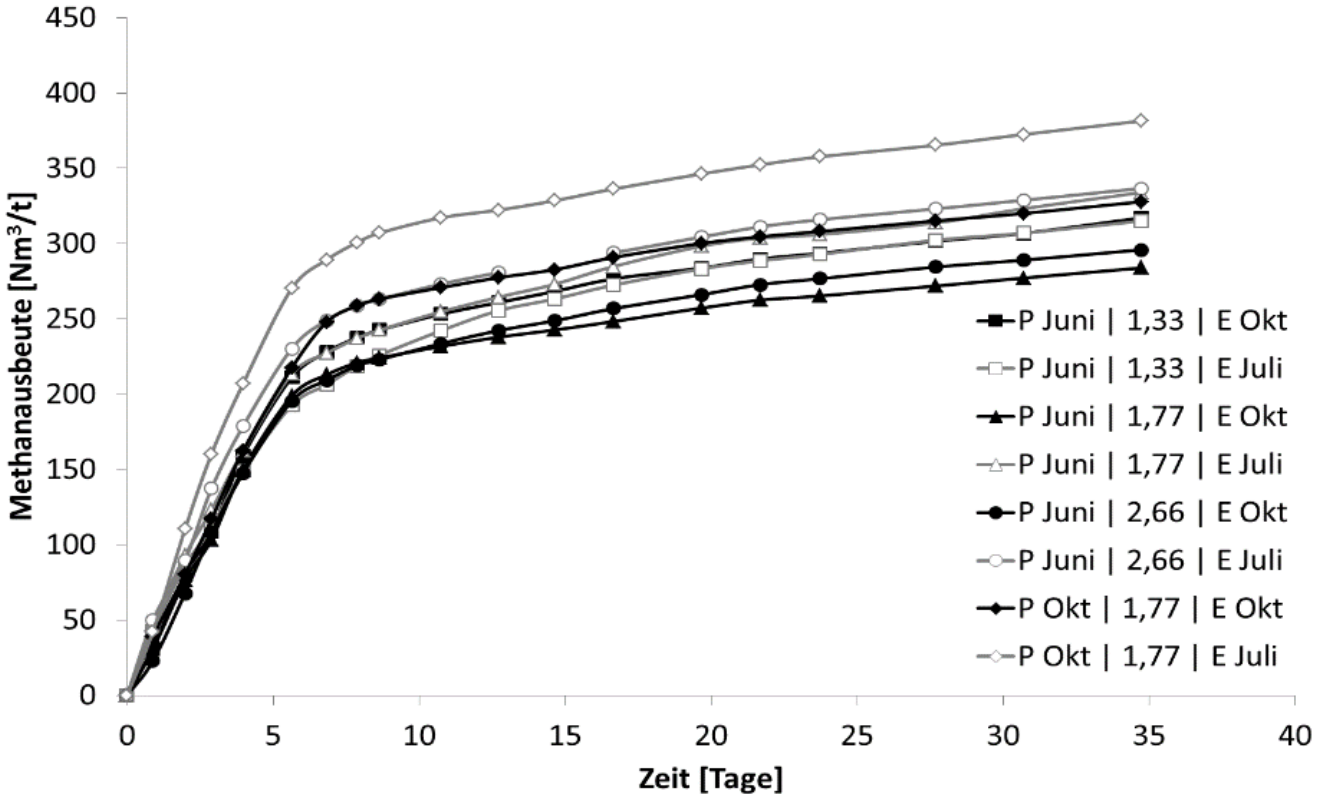


Abbildung 12: Methanpotenzial von *S. hermaphrodita* ausgepflanzt (P) im Juni oder Oktober 2014 mit verschiedenen Bestandesdichten (Zahl, Pfl. m^{-2}), geerntet (E) im Juni oder Oktober 2015

Das Methanpotenzial der Biomasse von *S. hermaphrodita* geerntet im Oktober war im Durchschnitt etwas geringer als das von der Juniernte. Im Mittel lag es um 10% niedriger. Die Pflanzdichte bei der Auspflanzung von *S. hermaphrodita* hatte keinen klaren Effekt auf das Methanpotenzial. Bei der Oktoberernte hatte die Pflanzdichte mit 1,33 Pfl. m^{-2} das höchste Methanpotenzial wohingegen bei der Juniernte die Pflanzdichte von 2,66 Pfl. m^{-2} das höchste Methanpotenzial aufwies. *S. hermaphrodita*, die im Oktober ausgepflanzt worden ist, hatte ein um durchschnittlich 16% höheres Methanpotenzial als die im Juni ausgepflanzten Pflanzen.

Zum direkten Vergleich werden die Gaserträge vom Jahr 2016 gestellt. Das Pflanzenmaterial wurde länger als in der Ernte 2015 vergoren. Wenn der Gasertrag bezüglich 35 Tage verglichen wird, kommen für die Gaserträge folgende Ergebnisse.

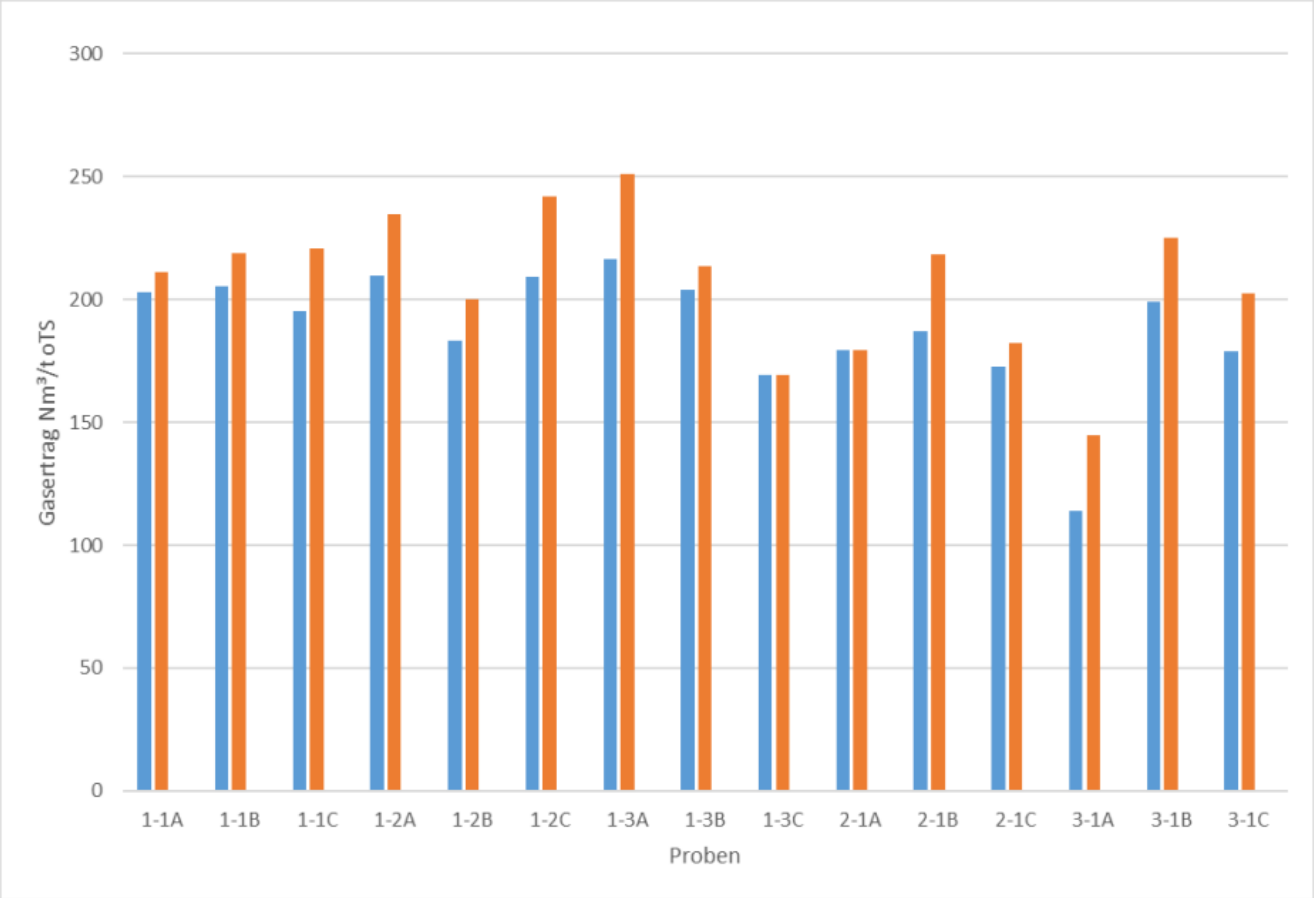


Abbildung 13: Gaserträge der Ernte 2016 nach 35 und 52 d VWZ (blau 35 d, rot 52 d)

In Abbildung 13 wurde neben dem Methanpotential untersucht inwieweit längere Verweilzeiten zu höheren Methanerträgen führen. Dabei zeigte sich, dass durch eine längere Verweilzeit in den Fermentern eine höhere Methanausbeute erreicht werden konnte. Geringere Bestandsdichten führen in der Regel zu höheren Gaserträgen. In Summe sind die Gaserträge gegenüber 2015 wesentlich geringer ausgefallen. Ursache hierfür kann in den klimatischen Bedingungen liegen aber auch an den Pflanzen selber. Hierzu müssten jedoch noch weitere und umfangreichere Untersuchungen gemacht werden.

<u>Vorbehandlung für Biogasgewinnung</u>

Auf Grund der Zusammensetzung der Pflanzen wurden Untersuchungen zur Vorbehandlung des Pflanzenmaterials durchgeführt. Für die Aufschlüsse wurde ein thermisches Verfahren eingesetzt.

Eine Vorbehandlung hat den Sinn den vergärbaren Pflanzenanteil schneller und besser verfügbar zu machen. Durch die schnellere Verfügbarkeit soll schneller Biogas produziert werden, wodurch der Ertrag in Biogasanlagen erhöht werden kann.

Die Wahl der Temperatur hat bei den thermischen Aufschlüssen einen sehr großen Einfluss auf den Biogasertrag. So kann bis zu einer bestimmten Aufschlusstemperatur ein steigend positiver Effekt beobachtet werden und dann ab einer leicht höheren Temperatur von einigen Kelvin ein zunehmend negativer Effekt auftreten. Somit wurde bei den Untersuchungen der Einfluss verschiedener Temperaturen auf das Biogaspotential hin untersucht. Die Temperaturschritte wurden von 120 bis 180 °C durchgeführt. Dabei konnte ein positiver Effekt mit steigender Temperatur beobachtet werden.

Bei vielen Substraten kommt es ab einer Temperatur von 160 °C zum Absinken der Gaserträge. Die Ursache dafür liegt darin, dass bei diesen Temperaturen als Erstes der Lignozellulosekomplex aufgelöst wird. Dabei werden unter anderem die verschiedenen Kohlenhydrate freigesetzt. Bei höheren Temperaturen werden diese in thermische Zwischenprodukte wie beispielsweise Furfural und 5-Hydroxymethylfurfural umgewandelt. Diese können in hohen Konzentrationen inhibierend auf die Biogasgewinnung wirken. Bei einer weiteren Steigerung der Temperatur werden aus den Intermediaten Melanoidine gebildet. Diese gelten als schwer bis nicht abbaubar. Somit kommt es ab einer Vorbehandlungstemperatur von 160-180 °C zu einer reduzierten Gasausbeute. Bei den vorliegenden Proben trat dieser Effekt bei 180 °C nicht auf. Ursache hierfür liegt in der starken Verholzung des Pflanzenmaterials. In Abbildung 14 sind die unbehandelten und bei 160 °C und 180 °C für 15 Minuten behandelten Proben aufgeführt.

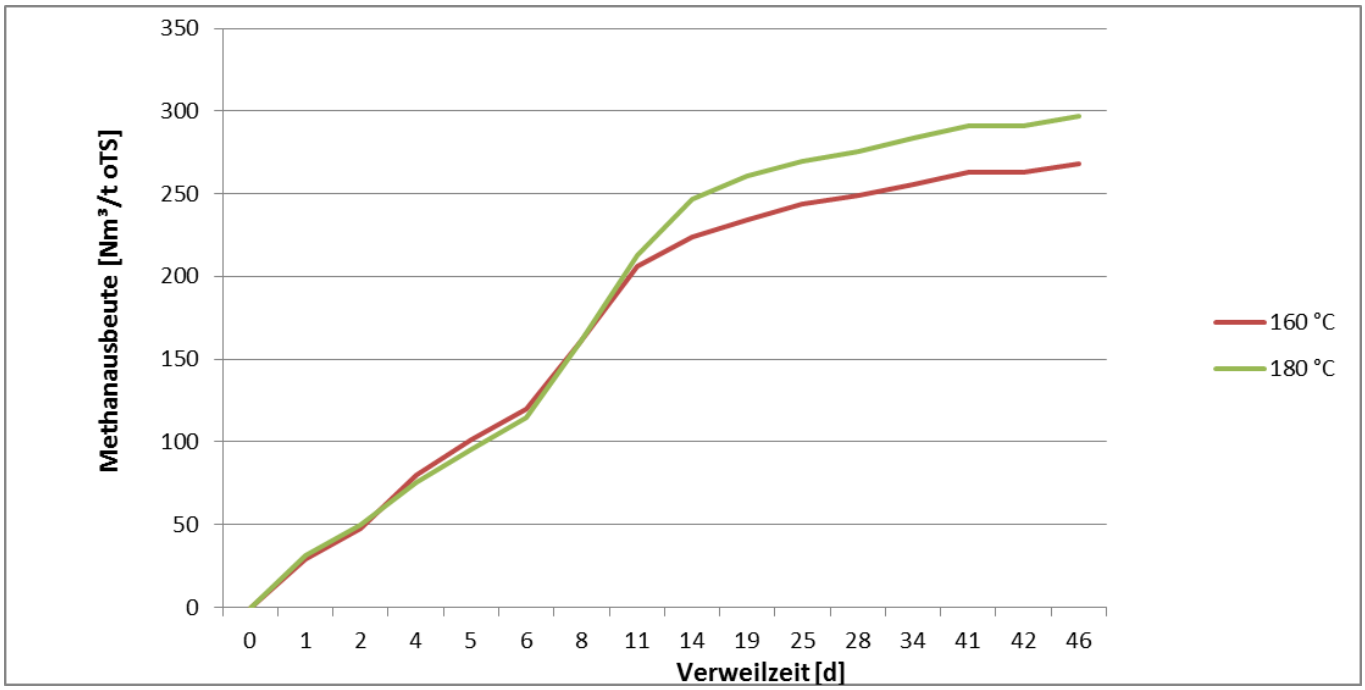


Abbildung 14: Biomethanerträge der aufgeschlossenen Proben bei 160 °C und 180 °C

Kontinuierliche Versuche zur Biogasgewinnung

Neben den Batchversuchen wurde das Pflanzenmaterial aus einem Schnitt mit einer Bestandesdichte von 1,77 Pfl. m^{-2} in kontinuierlichen Versuchen verwertet (Tabelle 19).

Tabelle 19: Biogaserträge und Zusammensetzung bei der kontinuierlichen Vergärung von *S. hermaphrodita*

	Biogasertrag [Nm³ t^{-1} oTS]	**CH_4 [%]**	**CO_2 [%]**	**H_2S [ppm]**
S. hermaphrodita (unbehandelt)	252	54	45,47	443,45
S. hermaphrodita (behandelt)	287	54,81	45,15	526,45

Die Gasausbeute lag bei 252 Nm³ t^{-1} oTS. Die Gaszusammensetzung bei unbehandelter Biomasse von *S. hermaphrodita* lag bei 54% CH_4, 45,47% CO_2 und H_2S von 443,45 ppm. Bei der Vergärung von thermisch vorbehandeltem Pflanzenmaterial wurde ein Gesamtbiogasertrag von 287 Nm³ t^{-1} oTS

gemessen. Die Zusammensetzung lag bei 54,81% CH_4, 45,15% CO_2 und einem H_2S Gehalt von 526,45 ppm. Auf Grund der im Pflanzenmaterial vorhandenen Spurenelemente müssen bei einigen Fermentationen Spurenelemente zusätzlich zugesetzt werden. Hierzu können verschiedene kommerziell vertriebene Produkte, die die fehlenden Elemente ersetzen, verwendet werden.

3.4.3 Thermische Verwertung

Rohstoffcharakterisierung

Tabelle 20 zeigt die Zusammenfassung der brennstofftechnischen Parameter für den Rohstoff von *S. hermaphrodita* im erntefrischen Zustand. Zusätzlich sind in der Tabelle die Grenzwerte der ISO 17225-6 (Klassifizierung von nicht-holzartigen Pellets) angegeben. Die Winterernte im Zeitraum Jänner - Februar führt zu einem relativ konstanten Wassergehalt von rund 21%. Der Aschegehalt des Rohstoffes liegt meist unter 3%, lediglich bei jungen Beständen kann er wesentlich höher ausfallen. Der Brennwert im Trockenzustand liegt bei 17,5 MJ kg^{-1} und erreicht damit etwa 95% des Energieinhaltes von getrocknetem Laubholz. Der Heizwert im Anlieferungszustand beträgt rund 14 MJ kg^{-1}, durch eine geringfügige Trocknung ist der Grenzwert für nicht-holzartige Pellets leicht einzuhalten. Das Ascheschmelzverhalten ist bei neun von zehn Messungen als unproblematisch einzustufen (der Grenzwert für den Ascheerweichungspunkt DT für A1 Holzpellets laut ENplus Zertifizierungsprogramm beträgt 1200 °C). Die emissionsrelevanten Inhaltsstoffe N, Schwefel und Chlor halten die geltenden Grenzwerte ebenfalls ein.

Tabelle 20: Übersicht der brennstofftechnisch relevanten Parameter von erntefrischem *S. hermaphrodita* Rohstoff

	Wasser gehalt	**Asche**	**Brenn-wert**	**Heiz-wert**	**Ascheschmelzverhalten**				**Hauptelemente**				
Mess-methode	ISO 18134	ISO 18122	EN 14918	EN 14918	CEN/TS 15370				ISO 16948		ISO 16994		
Abk.	M	A	$q_{pnet\ d}$	$q_{pnet\ ar}$	SST	DT	HT	FT	C	H	N	S	Cl
Einheit	%	%	MJ kg^{-1}	MJ kg^{-1}	°C	°C	°C	°C	%	%	%	%	%
Mittel	21,1	2,8	17,5	13,9	1123,0	1420	1471	1483	47,6	6,0	0,3	0,034	0,023
Anzahl (n)	16	18	10	6	10	8	7	7	11	11	11	11	11
Stdabw.	1,8	0,7	0,2	0,4	164	73	54	46	0,6	0,1	0,1	0,007	0,019
Min.	19,0	1,9	17,0	13,0	890	1300	1430	1450	46,3	5,9	0,1	0,024	0,005
Max.	25,0	5,1	17,8	14,2	1370	1550	1550	1550	48,6	6,2	0,5	0,043	0,059
ISO 17225-6	≤10*	≤6	n.z.	≥14,5*	n.z.	1200**	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	≤1,5	≤0,2	≤0,3

Legende: * = Der Grenzwert gilt für Pellets, und kann daher für erntefrisches Material nur bedingt angewandt werden; ** = Grenzwert laut ENplus Zertifizierungsprogramm für A1 Holzpellets; n.z. = nicht zutreffend

Tabelle 21 zeigt die Zusammenfassung für die Ergebnisse der wichtigsten aschebildenden Substanzen und Schermetalle. Alle Grenzwerte für Schwermetallkonzentrationen laut ISO 17725-6 werden eingehalten. Die Asche besteht hauptsächlich aus Calcium, Kalium und Magnesium.
Die Gehalte der wichtigsten aschebildenden Substanzen wie Calcium, Kalium und Silizium unterliegen großen Schwankungen; der Standardfehler des Mittelwertes beträgt 30-80%.

Tabelle 21: Übersicht über Aschebildner und Schwermetalle

	Aschebildner								**Schwermetalle**					
Mess-methode	EN ISO 11885								EN ISO 11885					
Abk.	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	P	Cu	Zn	Pb	Cr	Ni	Cd
Einheit	mg kg^{-1}								mg kg^{-1}					
Mittelw.	226	1168	36	349	3606	7488	36	539	3,6	10,1	1,9	<1	<1	0,1
Anzahl	9	10	9	10	10	10	9	2	5	5	5	5	5	5
Stdabw.	87	399	13	278	1647	2265	11	145	1,1	2,4	0,5	n.z.	n.z.	n.z.
Min.	158	627	22	98	1550	4945	25	436	2,6	7,1	1,3	<1	<1	<0,1
Max.	424	1813	64	850	6624	12868	59	641	5,3	13,8	2,5	1,1	0,0	0,2
ISO 17225-6	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	≤20	≤100	≤10	≤50	≤10	≤0,5

Legende: n.z. = nicht zutreffend

Rohstoffaufbereitung (Pelletierung)

Im Winter verholzen die Stängel von *S. hermaphrodita*. An der Basis weisen diese dann bis zu 5 cm Stärke auf und verzweigen sich nach oben hin mit starker Verjüngung. Das mittels Maishäcksler gewonnene Erntegut entspricht von der Korngröße und Struktur feinem Holzhackgut der Größe P16S (EN ISO 17225-1); die Schüttdichte beträgt im Erntezustand 80 - 100 kg. Die Versuche dieses Hackgut direkt ohne weitere Zerkleinerung zu pelletieren waren nicht erfolgreich, dies lag insbesondere daran, dass das Schüttgut in diesem Zustand sehr schlecht förderfähig ist. Die Zerkleinerung des Rohstoffes mittels Hammermühle unter Einsatz verschiedener Siebeinsätze hat zum Ergebnis, dass aufgrund der Auftrennung und Separation des Faseranteils die Schüttdichte noch weiter verringert wird. Wird *S. hermaphrodita* mittels Hammermühle zerkleinert, kommt es zu einer Vereinzelung von faserigen, holzigen und markhaltigen Pflanzenteilen (Abbildung 17 bis Abbildung 19 sowie Abbildung 21). Dadurch entstehen in den Förderaggregaten Entmischungen der Biomasse was zu Diskontinuitäten in der zu Förderung und auch im Pelletierprozess führt. Abbildung 15 bis Abbildung 23 zeigen den Rohstoff in seinen verschiedenen Aufbereitungsstufen.

Abbildung 15: Erntegut von *S. hermaphrodita:* Stängelbasis M1:3 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Abbildung 16: Erntegut von *S. hermaphrodita:* Blütenstand M1:3 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Abbildung 17: Bast / Faseranteil *S. hermaphrodita* M1:3 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Abbildung 18: Holzanteil *S. hermaphrodita* M1:3 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Abbildung 19: Markanteil *S. hermaphrodita* M 1:3 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Abbildung 20: Erntegut von *S. hermaphrodita:* Maishäcksler M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Abbildung 21: gemahlen mit Hammermühle Sieb 14 mm M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Abbildung 22: gemahlen mit Hammermühle Sieb 7 mm M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Abbildung 23: gemahlen mit Kollermühle Matrize 6 mm M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Um einen kontinuierlichen Transport in Förderschnecken zu erreichen muss der Rohstoff in Hammermühlen mit einem Siebeinsatz kleiner als 8 mm gemahlen werden (Abbildung 22). Als sehr vorteilhaft hat sich die Zerkleinerung in der Kollermühle erwiesen, damit kommt es zu einer festen Agglomeration zwischen den faserigen Teilen und Holzanteilen der Biomasse. Die Schüttdichte wird dabei auf rund 240 kg m^{-3} erhöht (Abbildung 23). Der Wassergehalt der Biomasse ist mit über 20% im Erntezustand zu hoch für direkte Pelletierung. Im Zuge der notwendigen Vermahlung kann der Wassergehalt um einige Prozentpunkte auf rund 17 bis 18% gesenkt werden. In diesem Zustand ist eine Pelletierung möglich, jedoch mit eingeschränkter Produktqualität (brüchige Pellets, geringe Rohdichte). Für qualitativ hochwertige Pellets ist es notwendig den Rohstoff auf unter 15%, idealerweise 10-12% Wassergehalt zu trocknen, wozu etwa 50-100 kWh t^{-1} an thermischer Energie erforderlich sind. Im Technikum wurde diese Trocknung mittels Bandtrockner durchgeführt, in der Praxis wäre hier ein in der Anschaffung günstigeres Trocknungssystem wie Flugstromtrocknung oder Trommeltrocknung vorzuziehen. Ein Teil der erforderlichen thermischen Energie kann aus der Prozessabwärme zurückgewonnen werden. Tabelle 22 zeigt den Überblick über die Versuchsergebnisse der Pelletierung.

Tabelle 22: Ergebnisübersicht über die Pelletierversuche

Lfd Nr.	Vorbe-handlung	Zerklein-erung	Sieb / Matrize	Presse	Matrize	Ergebnis / Bemerkung	Energie-eintrag	Mech-Festigk.	Schütt-dichte
		Typ	mm	Typ	mm		kWh t^{-1}	%	kg m^{-3}
473001	n.z.	Keine	n.z.	Flachmatrize	30	Nicht prozessfähig	-	-	-
473001.1	n.z.	HM	14	Flachmatrize	30	hoher Energieeintrag, Gute Pelletqualität	194	98,5	710
473002	n.z.	HM	14	Ringmatrize	30	Hoher Energieeintrag, instabiler Prozess, mittlere Pelletqualität	>200	93,5	--
473003	n.z.	HM	ohne	Flachmatrize	24	Nicht Prozessfähig	-	-	-
473005	n.z.	HM	10	Flachmatrize	24	Instabiler Prozess/zu geringe Kompression	-	-	-
473005.1	n.z.	HM	10	Flachmatrize	27	Instabiler Prozess /zu geringe Kompression	-	-	-
473005.2	n.z.	HM	10	Flachmatrize	30	Instabiler Prozess /Verstopfung	-	-	-
473007	n.z.	HM	10	Ringmatrize	30	Instabiler Prozess/zu geringe Kompression	-	-	-
473007.1	n.z.	HM	10	Ringmatrize	35	Instabiler Prozess/zu geringe Kompression	-	-	-
473007.2	n.z.	HM	10	Ringmatrize	40	Prozess teilstabil / schlechte Pelletqualität	>200	-	-
473008	n.z.	KM	12	Flachmatrize	30	Prozess stabil hohe Stromschwankung, hoher Energieeintrag, mittlere Pelletqualität	143	-	-
473009	Trocknung	KM	6	Flachmatrize	30	Prozess stabil, geringer Energieeintrag, gute Pelletqualität	70	96,1	640
473015	n.z.	KM	6	Ringmatrize	30	Instabiler Prozess/zu geringe Kompression	-	-	-
473016	n.z.	KM	6	Ringmatrize	35	Prozess stabil hohe Stromschwankung, hoher Energieeintrag, schlechte Pelletqualität	157	88	<600
473018	n.z.	KM	6	Ringmatrize Labor	26	Prozess stabil, geringer Energieeintrag/mittlere Pelletqualität	141	90	<600
473021	Erntefrisch	KM	6	Ringmatrize	35	Instabiler Prozess/zu geringe Kompression	-	-	-
473022	Erntefrisch	KM	6	Ringmatrize	40	Hoher Energieeintrag/geringe Massenleistung/gute Pelletqualität	>200	95,9	>600
473023	Erntefrisch	KM	6	Flachmatrize	30	Prozess stabil, geringer Energieeintrag, gute Pelletqualität	107	97,3	<600
473024	6 Monate gelagert	KM	6	Flachmatrize	30	Prozess stabil, geringer Energieeintrag, gute Pelletqualität	76	95,9	640
473025	6 Monate gelagert	KM	6	Ringmatrize	35	Instabiler Prozess, verbessert gegenüber 473021, hoher Energieeintrag, mittlere Pelletqualität	209	93,9	600

Legende: HM = Hammermühle, KM =Kollermühle, n.z. = nicht zutreffend, - = kein Messwert; grün/gelb: Versuchsparameter; orange: Ergebnisse

Die Versuche zeigten, dass die Pelletierung von *S. hermaphrodita* innerhalb eines relativ engen Prozessfensters stabil betrieben werden kann. Wenn dieses Prozessfenster erreicht wird, ist jedoch eine gute Performance erzielbar, mit einem gesamten Energieeintrag (Zerkleinerung und Pelletierung) kleiner als 100 kWh elektrischer Leistung, sowie einer guten Pelletqualität, auch ohne Einsatz von Additiven. Stichprobenartige Messungen ergaben, dass ab einer Produkt-Rohdichte von 1,25 g cm^{-3} eine ausreichende Pelletqualität zu erwarten ist. Dazu ist es erforderlich den Rohstoff auf unter 15% Wassergehalt zu trocknen. Das Pressverhältnis sollte für 6 mm Pellets mindestens 1:5 betragen, bei kleinem Einlaufkonus 1:6-1:7. Die Versuchsergebnisse lassen vermuten, dass ein Einlaufkonus von 60° mit einer Tiefe von mindestens 2 mm optimal ist. Abbildung 24 bis Abbildung 27 zeigen beispielhaft die Qualität der hergestellten Pelletproben.

Abbildung 24: Pellets aus Versuch 473001.1 M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Abbildung 25: Pellets aus Versuch 473002 M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Abbildung 26: Pellets aus Versuch 473016 M1:1,5

Bild 14: Pellets aus Versuch 473016 M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Abbildung 27: Pellets aus Versuch 473023 M1:1,5

Bild 15: Pellets aus Versuch 473023 M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria)

Mobile Pelletierung:

Der Pelletierprozess verlief im angewandten Lastbereich stabil ohne Blockaden oder Verstopfung der Presswerkzeuge. Das Wasserregime konnte im Versuchsverlauf wegen Softwareproblemen nicht vollständig optimiert werden. Daher kam es im Versuch zu einem erhöhten Anteil von Feinanteil im Produkt (27% Feinanteil >3,15 mm) und einer reduzierten mechanischen Festigkeit. Bei einer Motorleistung von 125 kW (75 kW Nutzleistung, 50 kW Leerlaufleistung) konnte ein Ausstoß von 1,18 t h^{-1} erzeugt werden. Bei Ausschöpfung der gesamten verfügbaren Motorleistung zu 90% ergibt sich daraus eine nicht genutzte Leistungsreserve von 325 kW. Nimmt man einen linearen Verlauf von Massenausstoß und Motorleistung an, dann kann der maximale Ausstoß von *S. hermaphrodita* mit ca. 6 t h^{-1} geschätzt werden, was einem spezifischen Energieverbrauch von 80 kWh t^{-1} entspricht.

Das erzeugte Produkt (Abbildung 28) hat einen Wassergehalt von 10,1%, mechanische Festigkeit von 71,8% und eine Schüttdichte von 394 kg m^{-3}. Der Wassergehalt zeigt, dass im Versuch nicht das ideale Wasserregime eingehalten wurde. Die erzielten Werte entsprechen nicht dem mit *S. hermaphrodita* erzielbaren Optimum. Versuche mit Stroh zeigten jedoch, dass die Technologie grundsätzlich in der Lage ist Pellets mit derselben Qualität herzustellen wie konventionelle Anlagen, wenn optimale Betriebsparameter eingehalten werden.

Abbildung 28: *S. hermaphrodita* Pellets aus der mobilen Pelletierung (M 1:1)

Abbrandversuche

Die Qualität von Brennstoffen, die nicht aus hochqualitativen Holzrohstoffen bestehen, kann vor allem aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung für viele Feuerungsanlagen ein Problem darstellen. Es wurden daher Laboranalysen und praktische Verbrennungsversuche durchgeführt um das thermische Verwertungspotential von *S. hermaphrodita* als Brennstoff zu untersuchen. Konkret wurde die Einsetzbarkeit der Pellets von *S. hermaphrodita* in einer marktüblichen Feuerungsanlage (Nennleistung 80 kW) getestet und dadurch erste praktische Betriebserfahrungen gewonnen. Im Rahmen der durchgeführten standardisierten Verbrennungsversuche konnte die Feuerungsanlage gut mit dem erhöhten Aschegehalt des Brennstoffes von *S. hermaphrodita* umgehen. Für einen langfristigen Betrieb ist es jedoch erforderlich, einige Kesselparameter zu adaptieren. Insbesondere betrifft das die Sicherstellung eines ausreichenden Ascheaustrags (z.B. durch Erhöhung der Intervalle der Rostbewegung sowie der Ascheaustragsschnecke), um die vermehrt anfallende Asche aus dem Brennraum zu entfernen. Dadurch kann eine Verschlackung auf dem Rost vermieden werden, und das Glutbett wird niedrig gehalten

Wie erwartet, wurde beim Betrieb mit Pellets von *S. hermaphrodita* eine erhöhte NO_x-Emission (Tabelle 23) festgestellt, was auf den höheren N-Gehalt des Brennstoffes zurückzuführen ist. Die erhöhten Staubemissionen sind bedingt durch den höheren Aschegehalt.

Tabelle 23: Abgaszusammensetzung im stabilen Volllastbetrieb

Brennstoff	O_2 in Vol.-%	CO_2 in Vol.-%	Lambda	CO in mg MJ^{-1}	NO_x in mg MJ^{-1}	PM in mg MJ^{-1}
Holz	10,9 +/- 0,5	9,8 +/- 0,5	2,1	16	71	6+/-5
Weide	9,9 +/- 0,4	10,5 +/- 0,4	1,9	9	142	24 +/- 2
Miscanthus	11,4+/-0,6	8,5+/-0,6	2,2	3	155	n.b.
S. hermaphrodita	11,0+/-0,6	9,1+/-0,6	2,1	41	167	154+/-4

n.b. → nicht bestimmt (kein stabiler Betrieb aufgrund Verschlackung)

Brennstoffindizierung

Die Brennstoffanalyse der verwendeten Charge von *S. hermaphrodita* zeigte ein mit Holzbrennstoffen vergleichbares Ascheschmelzverhalten. Im Rahmen der praktischen Verbrennungsversuche wurde weder nennenswerte Verschlackung noch Korrosion am Wärmetauscher festgestellt. Diese beiden Auswirkungen sind hauptsächlich von der Zusammensetzung des Brennstoffes abhängig. Der Einfluss unterschiedlicher Erntezeitpunkte, Bodenqualität, Dünger, etc. wurde über eine Analyse aller im Projekt erhobenen Daten und die Berechnung von Brennstoffindizes abgeschätzt. Abhängig vom Standort ergab sich speziell bei den Elementgehalten von Calcium, Magnesium, Kalium, Silicium und Chlor eine hohe Varianz. Unter Einbeziehen der Schwankungsbreite bei einzelnen Brennstoffeigenschaften konnte *S. hermaphrodita* als Brennstoff für Kleinfeuerungsanlagen evaluiert werden.

Der Einfluss unterschiedlicher Erntezeitpunkte, Bodenqualität, Dünger, etc. wurde über eine Analyse aller im Projekt erhobenen Daten und die Berechnung von ausgewählten Brennstoffindizes abgeschätzt. Die Summe der Konzentrationen der Aerosolbildner (Kalium, Natrium, Zink, Blei) im Brennstoff ist ein Indikator für Staubemissionen bei der Verbrennung (Abbildung 29). Der Anteil dieser Aerosolbildner ist

bei den untersuchten Pellets von *S. hermaphrodita* höher als bei Pellets aus Holz oder Kurzumtrieb, jedoch wesentlich geringer als bei Pellets aus Stroh, Getreide oder Mais-Ganzpflanzen.

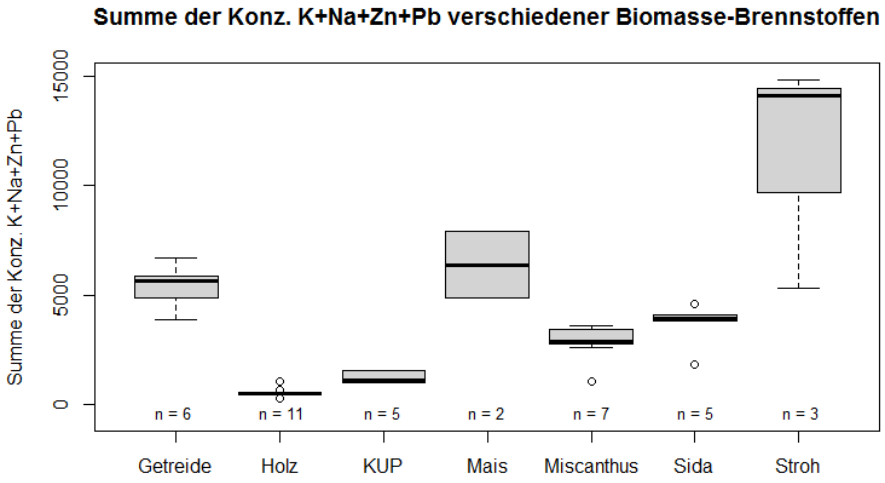


Abbildung 29: Summe der Konzentrationen an Kalium, Natrium, Zink und Blei. Schwankungsbreite bei unterschiedlichen Biomasse-Kategorien

Bei der Verbrennung der Pellets von *S. hermaphrodita* sind somit höhere Staubemissionen zu erwarten als beim Betrieb mit Holz- bzw. Kurzumtriebs-Pellets, jedoch geringere Emissionen als bei der Verbrennung von Strohpellets. Der Vergleich der Anteile an Aerosolbildnern mit den gemessenen Staubemissionen während der Verbrennungsversuche bestätigt, dass beim Betrieb mit *S. hermaphrodita* mit höheren Emissionen zu rechnen ist (Abbildung 30).

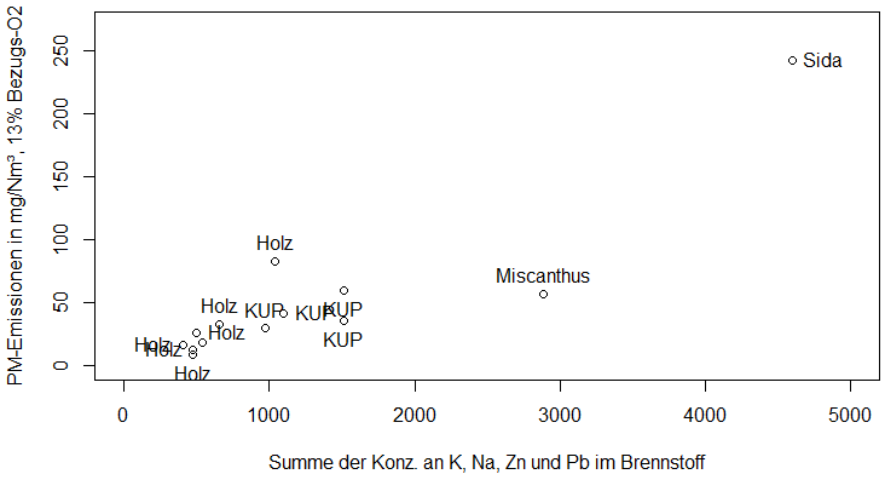


Abbildung 30: Staubemissionen bei den praktischen Verbrennungsversuchen in Abhängigkeit der Summe der Konzentrationen an Kalium, Natrium, Zink und Blei im Brennstoff

Das molare (Silicium)/(Calcium + Magnesium)-Verhältnis ist ein Indikator bezüglich der Verschlackungsneigung [20]. Je höher diese Kennzahl desto höher ist das Verschlackungsrisiko beim Verwendung des Brennstoffes in Kleinfeuerungsanlagen. Der Wert von *S. hermaphrodita* ist vergleichbar mit Holz und Biomasse aus Kurzumtriebplantagen (KUP, Abbildung 31).

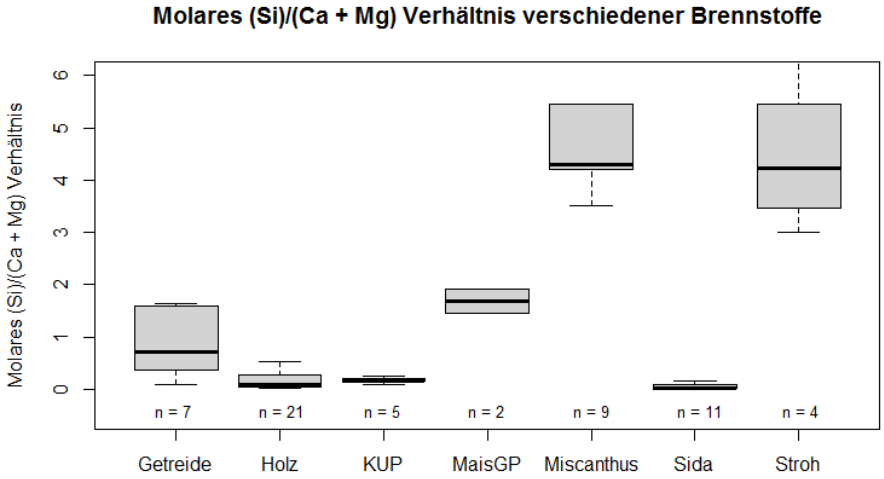


Abbildung 31: Molares (Silicium)/(Calcium + Magnesium)-Verhältnis. Schwankungsbreite bei unterschiedlichen Biomasse-Kategorien

Die ermittelten Werte der molaren (Silicium)/(Calcium + Magnesium)-Verhältnisse wurden mit den untersuchten Aschen verglichen. Im Vergleich zu Holzpellets war die Schlackebildung beim Betrieb mit Pellets von *S. hermaphrodita* etwas höher und vergleichbar mit der Schlackebildung von Pellets aus Kurzumtrieb. Bei der Verbrennung von halmgutartiger Biomasse-Brennstoffe (Stroh, Miscanthus) wurde eine wesentlich höhere Verschlackungsneigung festgestellt (Abbildung 32).

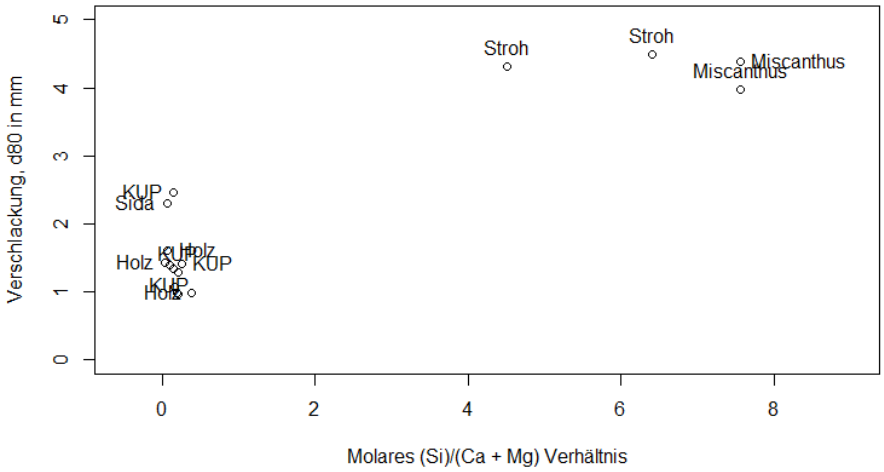


Abbildung 32: Verschlackungsneigung bei den praktischen Verbrennungsversuchen in Abhängigkeit des molaren (Si)/(Ca + Mg)-Verhältnisses

Der Chlorgehalt der untersuchten Pellets von *S. hermaphrodita* ist in jedem Fall höher als der Chlorgehalt von Fichtenpellets. Bezüglich des Schwefelgehalts sind die Chargen mit *S. hermaphrodita* in etwa vergleichbar mit untersuchten Miscanthus-Pellets. Auch wenn bei den Verbrennungsversuchen keine Korrosion festgestellt wurde, ist das Risiko bei der Verwendung der Pellets von *S. hermaphrodita* höher.

3.5 Ökonomische Bewertung

Auf Basis der in Kapitel 2.6 definierten Produktionsverfahren erfolgten die wirtschaftlichen Berechnungen für die einzelnen Verwertungsmöglichkeiten. Hinsichtlich Biogaserzeugung werden sämtliche Bestandesdichten am Standort Grabenegg in die Berechnungen einbezogen. Zur thermischen Verwertung am Standort Grabenegg zeigte eine Teilbetrachtung der Ein- und Auszahlungen der ersten drei Jahre (Bestandesbegründung, erstes und zweites Ertragsjahr), dass eine höhere Bestandesdichte als 1,33 Pfl. m^{-2} keinen wirtschaftlichen Mehrwert bringt. Diese Erkenntnis konnte auch durch die Versuche zur Optimierung der Rohstoffproduktion hinsichtlich des Ertragspotentials aus pflanzenbaulicher Sicht tendenziell bestätigt werden. Aus diesem Grund werden im Bereich der thermischen Verwertung alle weiteren Berechnungen für den Standort Grabenegg mit dieser Bestandesdichte durchgeführt. Die Versuchsfläche am Standort Großweikersdorf wurde lediglich hinsichtlich thermischer Verwertung untersucht und fließt mit der dort vorhandenen Bestandesdichte von 1,77 Pfl. m^{-2} in die Berechnungen ein.

3.5.1 Biogaserzeugung

Tabelle 24 zeigt die durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeiträge in € ha^{-1} sowie die Kosten in € m^{-3} produziertes Methan. Dabei zeigt sich, dass sämtliche untersuchten Bestandesdichten sowie Pflanzzeitpunkte einen negativen Deckungsbeitrag aufweisen. Die Kosten je m^3 Methan sind, verglichen mit den Kosten, welche im Rahmen des Projekts „Bioenergy-Silphium“ [21], einer ebenfalls neueren potentiellen Substratpflanze zur Biogaserzeugung, erhoben wurden, zum Teil beträchtlich höher.

Tabelle 24: Durchschnittliche jährliche Deckungsbeiträge in € ha^{-1} (mit und ohne Düngerkosten) sowie Kosten (während der Erntejahre, ohne Bestandesbegründung) in € m^{-3} Methan am Standort Grabenegg

Kultur	DB (inkl. Düngerkosten) [€ ha-1]	DB (ohne Düngerkosten) [€ ha-1]	Kosten (Erntejahre) [€ m^{-3} Methan]
Sida_Pflanzung_spät_1,77_Pfl./m²	-635	-531	0,19
Sida_Pflanzung_früh_1,33_Pfl./m²	-672	-599	0,28
Sida_Pflanzung_früh_1,77_Pfl./m²	-764	-678	0,24
Sida_Pflanzung_früh_2,66_Pfl./m²	-1.184	-1.103	0,26
Mais	349	633	0,14

(Quelle: [21, 22] und eigene Berechnungen)

3.5.2 Thermische Verwertung

In Tabelle 25 sind die unterschiedlichen Pelletierkosten nach Verfahrenstechnik zusammengefasst. Eine Kleinanlage im stationären Betrieb mit einem Ausstoß von knapp 0,5 t Pellets pro Stunde bzw. 2.808 t pro Jahr weist die höchsten Pelletierkosten von 140 € t^{-1} Pellets auf. Mit 50 € t^{-1} Pellets liegen die Kosten bei einer industriellen Anlage im Vergleich um fast zwei Drittel niedriger – bei einer Stundenleistung von vier t bzw. einer Jahresleistung von 24.000 t Pellets. Als sowohl in verfahrenstechnischer als auch hinsichtlich des Endprodukts stabilster Prozess stellte sich bei der stationären Pelletierung im Zuge der Charakterisierung und Aufbereitung der Biomasse eine Pelletierung mittels Flachmatrize nach vorhergehender Trocknung heraus. Aus diesem Grund fand ausschließlich dieses Verfahren Eingang in die wirtschaftlichen Berechnungen.

Der Energy Harvester weist ebenfalls eine Stundenleistung von vier t auf. Bei einer Jahresproduktion von 4.000 t ist mit Kosten von 106 € t^{-1} Pellets zu kalkulieren. Wichtig ist an dieser Stelle zu betonen, dass die für die Berechnungen angenommenen Werte des Energy Harvesters hinsichtlich Pelletierprozess an die Daten einer industriellen Pelletieranlage angelehnt sind und noch nicht im Praxiseinsatz bestätigt werden konnten.

Generell wurden die Kosten unter der Annahme einer Nutzungsdauer von 15 Jahren bei der stationären Pelletierung sowie zehn Jahren beim Energy Harvester ermittelt. Die Anschaffungskosten für die Pelletieranlage sowie einer bei der stationären Pelletierung notwendigen Halle fanden Eingang in die durchschnittlichen jährlichen Kapitalkosten.

Tabelle 25: Pelletierkosten bei drei unterschiedlichen Verfahrenstechniken

Allgemeine Daten	**Kleinanlage**		**Industrieanlage**		**Energy Harvester**	
Jahresauslastung [h a^{-1}]	6.000		6.000		1.000	
Ausstoß [t Pellets h^{-1}]	0,468		4		4	
Ausstoß [t Pellets a^{-1}]	2.808		24.000		4.000	
Investitionen [€ exkl. MWSt.]						
Gebäude	150 000		1 500 000			
Fördertechnik	70 000		300 000			
Trocknung	120 000		300 000			
Zerkleinerung	80 000		230 000			
Pelletierung	65 000		270 000			
Nebenaggregate (Elektronik, Steuerung, Absaugung)	120 000		250 000			
Kühler und Sieb			65 000			
Pelletieranlage gesamt ohne Gebäude [€ exkl. MWSt.]	**455.000**		**1.415.000**		**700.000**	Mobile Pelletier-anlage inkl. Zug-maschine und Häcksler
Fixkosten						
Wartung Gebäude (1 % der Investitionssumme)	1 500		15 000		-	
Verwaltung Pelletieranlage (0,5 % der Investitionssumme)	2 275		7 075		3 500	
Versicherung Pelletieranlage (1 % der Investitionssumme)	4 550		14 150		7 000	
Kapitalkosten (Ø pro Jahr), Zinssatz 4 %	50 263		242 174		114 035	
Fixkosten gesamt [€ exkl. MWSt.]	**58.588**		**278.399**		**124.535**	
Fixkosten [€ t^{-1} Pellets exkl. MWSt.	**21**		**12**		**31**	
Variable Kosten						
Einsatz elektrischer Energie [0,07 €/kWh]	14	205 kWh	8	120 kWh		
Einsatz thermischer Energie [0,05 €/kWh]	5	100 kWh	2	38 kWh	32	29 l Diesel
Instandhaltung/Wartung/Reparaturen	5		7		14	
Anlagenpersonal [33,33 €/Akh]	71	2,14 Akh/t	13	0,38 Akh/t (1,5 Per-sonen)	12	0,25 Akh/t + 0,1 Akh/t Rüst- u. Neben-zeiten
Variable Kosten gesamt [€ t^{-1} exkl. MWSt.)	**96**		**30**		**58**	
Gesamtkosten [€ t^{-1} inkl. 20 % MWST.]	**140**		**50**		**106**	

(Quelle: eigene Berechnungen)

Tabelle 26, Tabelle 27 und Tabelle 28 illustrieren beispielhaft die in die Berechnung der durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeiträge eingeflossenen Ausgangsdaten. Die Düngerkosten in

Tabelle 27 sowie die Transportkosten in Tabelle 28 wurden ertragsabhängig modelliert. Bei den Transportkosten sind die unterschiedlichen Merkmale der einzelnen Transportmittel (LKW, Traktor mit Abschiebewagen) wie Fahrgeschwindigkeit, Kubatur sowie Nutzlast berücksichtigt. Tabelle 28 veranschaulicht die großen Unterschiede in den Kosten für Transport und ggf. Lagerung des Ernteguts, je nach Produktionsverfahren.

Tabelle 26: Kosten der Bestandesbegründung am Beispiel des Standorts Grabenegg

Position		Menge	Preis	Betrag in € ha^{-1}
Variable Maschinenkosten Feldvorbereitung/Pflege				102
Pflanzung				
	Pflanzgut	13 300 Stk	0,399 € Stk^{-1}.	5.307
	Lohnkosten Pflanzung	28 Akh ha^{-1}	7,50 € h^{-1}	210
	Maschinenkosten Pflanzung			185
Manuelle Unkrautbekämpfung		200 Akh ha^{-1}	7,50 € h^{-1}	1.500
Hagelversicherung				21
Summe Kosten Bestandesbegründung				7.325

(Quelle: [11-15] und eigene Berechnungen)

Tabelle 27: Leistung und Kosten der Bestandesführung am Beispiel des ersten Ertragsjahres am Standort Grabenegg

Position		Menge	Preis	Betrag in € ha^{-1}
Leistung	9.0 t FM ha^{-1}	7.1 t TM ha^{-1}	204,00 € t^{-1} P.	1.570
	7.7 t Pellets ha^{-1}			
Summe Leistung				1.570
variable Kosten				
	N [kg t^{-1}]	25 kg ha^{-1}	1,20 € kg^{-1}	30
	P2O5 [kg t^{-1}]	5 kg ha^{-1}	1,12 € kg^{-1}	6
	K2O [kg t^{-1}]	29 kg ha^{-1}	0,77 € kg^{-1}	22
Hagelversicherung				21
Summe Kosten Bestandesführung				79

(Quelle: [22] und eigene Berechnungen)

Tabelle 28: Kosten Ernte, Logistik (Transport, Lagerung) und Pelletierung am Beispiel des ersten Ertragsjahres am Standort Grabenegg

Position	Transportentfernung	Menge	Preis	Betrag in € ha^{-1}
Lohnernte mit Energy Harvester (Ernte u. Pelletierung)			106,44 € t^{-1} P.	819
Transport Feld - Abnehmer (Eigen inkl. Laden)	15 km			70
Summe Kosten mobile Pelletierung				889
Lohnernte (Feldhäcksler)				200
Transport Feld - Hof (Abschiebewagen, inkl. Laden)	5 km			80
Lagerung (inkl. ein- und auslagern)		9,0 t FM ha^{-1}	33,89 € t^{-1} FM	306
Transport Hof - Pelletierwerk (Spedition)	50 km			235
Kosten Pelletierung Kleinanlage			139,73 € t^{-1} P.	1.075
Summe Kosten Ernte, Zwischenlagerung am Hof, Pelletierung in Kleinanlage				1.895
Lohnernte (Feldhäcksler)				200
Transport Feld - Hof (Abschiebewagen, inkl. Laden)	5 km			80
Lagerung (inkl. ein- und auslagern)		9,0 t FM ha^{-1}	33,89 € t^{-1} FM	306
Transport Hof - Pelletierwerk (Spedition)	50 km			235
Kosten Pelletierung industrielle Anlage			49,68 € t^{-1} P.	382
Summe Kosten Ernte, Zwischenlagerung am Hof, Pelletierung in industrieller Anlage				1.203
Lohnernte (Feldhäcksler)				200
Transport Feld - Pelletierwerk (Abschiebewagen)	15 km			276
Kosten Pelletierung Kleinanlage			139,73 € t^{-1} P.	1.075
Summe Kosten Ernte, Direktlieferung, Pelletierung in Kleinanlage				1.551
Lohnernte (Feldhäcksler)				200
Transport Feld - Pelletierwerk (Abschiebewagen)	15 km			276
Kosten Pelletierung industrielle Anlage			49,68 € t^{-1} P.	382
Summe Kosten Ernte, Direktlieferung, Pelletierung in industrieller Anlage				858

(Quelle: [11-14, 22] und eigene Berechnungen)

Tabelle 29 zeigt die erzielbaren durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeiträge in € ha^{-1} bei verschiedenen Pelletierungs- sowie logistischen Varianten. Ein positiver durchschnittlicher jährlicher Deckungsbeitrag kann generell lediglich am Standort Grabenegg erzielt werden. Bei mobiler Pelletierung am Feld beträgt dieser 93 € ha^{-1}. Bei Pelletierung im industriellen Maßstab und direkter Anlieferung vom Feld zum Pelletierwerk kann ein durchschnittlicher jährlicher Deckungsbeitrag von 238 € ha^{-1} erzielt werden. Die niedrigsten Werte sind hingegen – im Vergleich zur Direktlieferung vom Feld – bei Zwischenlagerung am Hof und anschließender Lieferung in ein Pelletierwerk (Kleinanlage) zu erwarten.

Demgegenüber können zurzeit – ohne nähere Betrachtung der Kosten- und Erlösstruktur – über Kurzumtriebsplantagen mit Vermarktung von Hackschnitzel durchschnittliche jährliche Deckungsbeiträge von 200 – 600 € ha^{-1}, je nach Zuwachs und Transportentfernung, erzielt werden [23].

Tabelle 29: Durchschnittliche jährliche Deckungsbeiträge in € ha^{-1} unter Berücksichtigung verschiedener Pelletierungs- sowie logistischer Varianten

	Mobile Pelletierung	**Pelletierung Kleinanlage**		**Pelletierung industrielle Anlage**	
		Zwischen-lagerung	Direkt-lieferung	Zwischen-lagerung	Direkt-lieferung
Sida_Pflanzung_früh_1,33_Pfl./m² Grabenegg	93	-1.257	-769	-250	238
Sida_Pflanzung_früh_1,77_Pfl./m² Großweikersdorf	-305	-1.374	-1.003	-593	-196

(Quelle: eigene Berechnungen)

3.5.3 Sensitivitätsanlaysen

Im Rahmen von Sensitivitätsanlysen werden die Auswirkungen der Änderung einzelner Eingangsparameter in die wirtschaftlichen Berechnungen betrachtet. Da der Energy Harvester noch nicht im praktischen Einsatz getestet werden konnte, wurden in Abbildung 33 die Auswirkungen einer niedrigeren Auslastung auf die Deckungsbeiträge dargestellt.

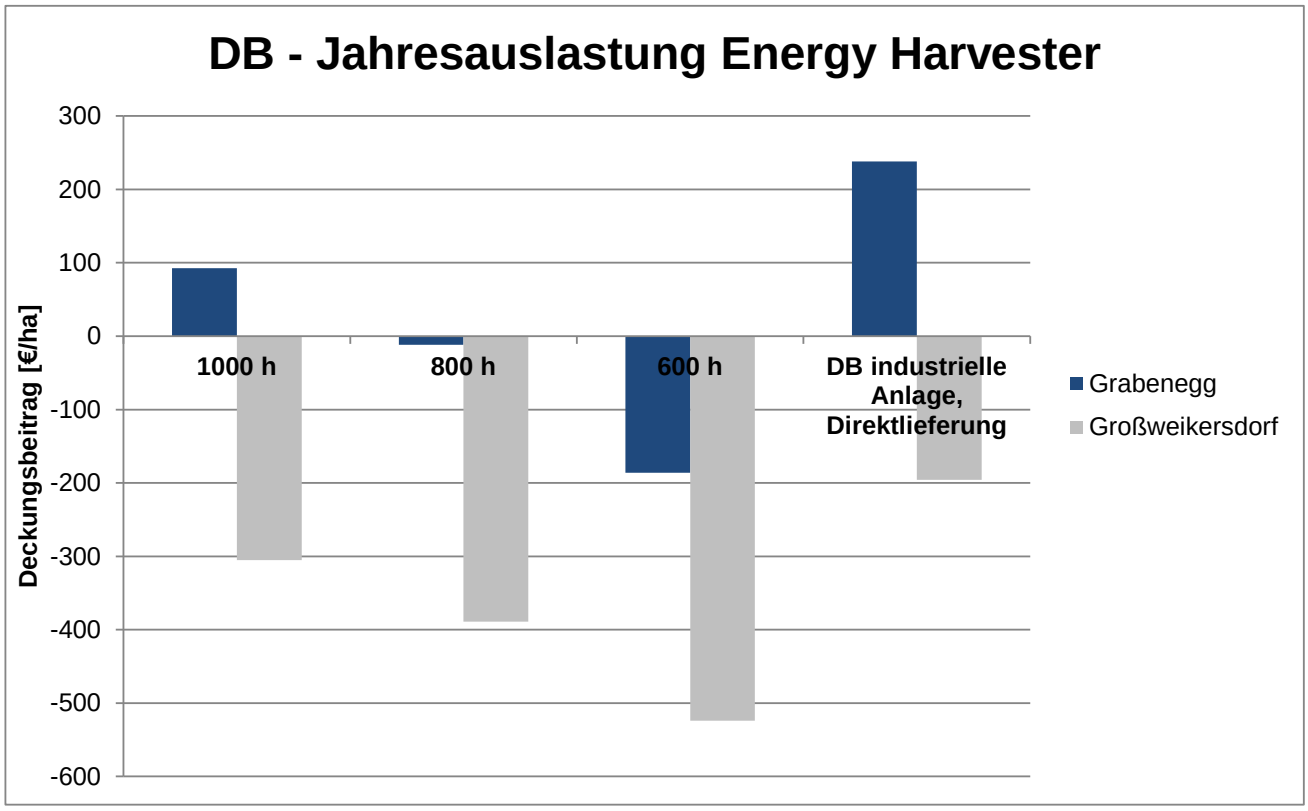


Abbildung 33: Auswirkungen einer niedrigeren Auslastung des Energy Harvesters auf die durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeiträge in € ha^{-1} bei der mobilen Pelletierung

Tabelle 30 zeigt die Auswirkungen auf die durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeiträge unter der Prämisse einer Halbierung der Kosten der Bestandesbegründung.

Tabelle 30: Durchschnittliche jährliche Deckungsbeiträge in € ha^{-1} bei Halbierung der Kosten der Bestandesbegründung

	Mobile Pelletierung	**Pelletierung Kleinanlage**		**Pelletierung industrielle Anlage**	
		Zwischen-lagerung	Direkt-lieferung	Zwischen-lagerung	Direkt-lieferung
Sida_Pflanzung_früh_1,33_Pfl./m² Grabenegg	492	-857	-369	150	638
Sida_Pflanzung_früh_1,77_Pfl./m² Großweikersdorf	190	-878	-508	-98	300

(Quelle: eigene Berechnungen)

Abbildung 34 illustriert die Auswirkungen unterschiedlicher Pelletspreise auf die durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeiträge am Standort Grabenegg

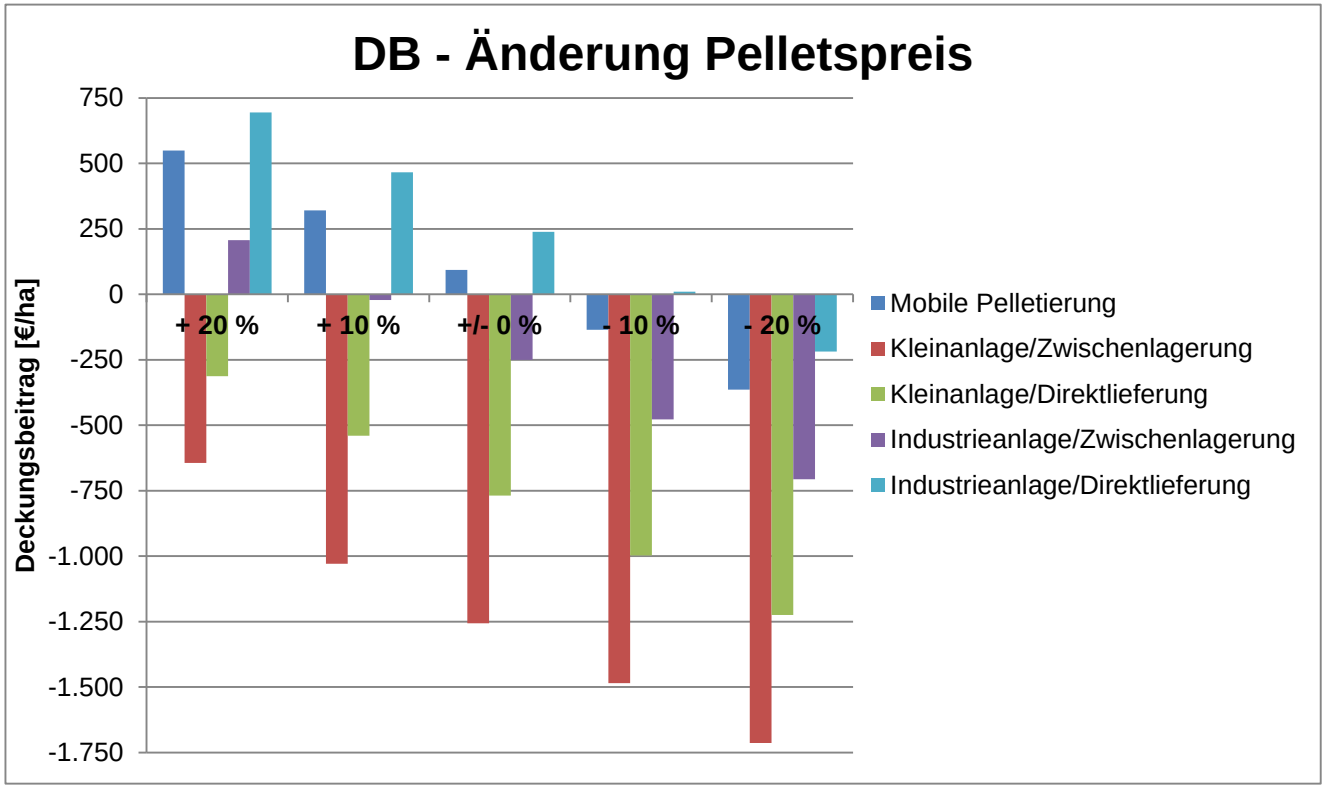


Abbildung 34: Durchschnittliche jährliche Deckungsbeiträge in € ha^{-1} am Standort Grabenegg bei unterschiedlichen Pelletspreisen

4 Schlussfolgerungen

Bestandesbegründung durch Aussaat zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Rohstoffproduktion

Durch die klare Definition der bei *S. hermaphrodita* Samen vorliegenden Dormanz konnte eine standardisierte Methode zum Erzielen einer hohen Keimfähigkeit unter Laborbedingungen erarbeitet werden. Folglich wurden die im Labor gewonnenen Erkenntnisse auf den im Projekt vorgesehenen Aussaatversuch angewendet. Zur Erhöhung der Keimfähigkeit und somit des Feldaufgangs ist eine Brechung der physikalischen Dormanz des *S. hermaphrodita* Saatguts, bedingt durch die wasserundurchlässige Samenschale, notwendig. Eine physiologische Dormanz liegt nachweislich nicht vor, sodass eine zusätzliche Behandlung des Saatguts mit keimfördernden Pflanzenhormonen wie GA_3 nicht zielführend ist. Bei dem im SIDecA Projekt durchgeführten Aussaatversuch erzielte der früheste durchgeführte Aussaattermin (10.05.2016) den höchsten Feldaufgang, und am Ende der Vegetationsperiode auch den höchsten mittleren Blattflächenindex, die höchste mittlere Pflanzenhöhe und den höchsten TM-Ertrag, und ist somit für die Bestandesbegründung durch Aussaat zu bevorzugen. Die mit diesem Aussaattermin am Ende des Anbaujahrs erzielten TM-Erträge liegen über denen des ersten Anbaujahrs der in Grabenegg durch Auspflanzung etablierten Bestände. Ein ähnlicher Ertragsverlauf des ausgesäten Bestandes wie bei den ausgepflanzten Beständen ist somit denkbar.

Abstimmung der Rohstoffproduktion auf die verschiedenen energetischen Verwertungsmöglichkeiten und Erhebung des Biomasseertrages unter österreichischen Klimabedingungen

Bestandesbegründung und Kulturführung erwiesen sich in Bezug auf die Unkrautbekämpfung im Anlagejahr als sehr aufwendig. Nach dem Anlagejahr ist hingegen die Kulturführung durch die rasche Bodenbedeckung äußerst anspruchslos. Außer einer N-Düngung sind keine nennenswerten Pflegearbeiten erforderlich.

Aus den dargestellten Ertragsergebnissen lässt sich ableiten, dass die thermische Nutzung mit einer einmaligen Ernte im Winter der Biologie der Pflanze besser entgegenkommt, da beim zweimaligen Schnitt für die Biogasnutzung die Pflanzen einer Stresssituation ausgesetzt werden. Diese äußert sich in einer niedrigeren Ertragsleistung. Weiterhin konnte ein positiver Effekt einer guten Wasserversorgung auf den Ertrag von *S. hermaphrodita* festgestellt werden.

Ökologisch gesehen erscheint der Anbau von *S. hermaphrodita* großes Potential zu haben. Die durchgeführten N_{min} Untersuchungen belegen, dass durch die ganzjährige Bodenbedeckung dem Boden kontinuierlich Nährstoffe entzogen werden. Diese verbleiben somit im Kreislauf. Die Auswaschung von vor allem N wird reduziert.

Aufbereitung von inhomogener, verholzter Biomasse mit geringer Energiedichte

Tabelle 31 zeigt eine überblicksmäßige Bewertung der eingesetzten Technologie für die Verarbeitung der Biomasse von *S. hermaphrodita*. Alle angegebenen Technologien, mit Ausnahme des Flugstromtrockners, wurden im Technikum eingesetzt. Aufgrund der Ergebnisse lässt sich folgende Prozesskette als optimal für die Verarbeitung von vier t *S. hermaphrodita* Biomasse h^{-1} darstellen:

- Schubboden zur Rohstoffaufgabe
- Vorzerkleinerung des Rohstoffes mittels Kollermühle – 6 mm Matrizeneinsatz, 200-250 kW Antrieb, Absaugung von Brüden
- Isolierter Trocknervorbehälter ca. 5 m³
- Trocknung des Rohstoffes mittels Flugstromtrockner oder Trommeltrockner unter Mitnutzung von Prozessabwärme, thermische Gesamtleistung von ca. 400 kW
- Trockenspansilo ca. 150 m³ (entspricht einem Produktionspuffer von etwa 8 h)
- Konditionierung und Reifebehälter
- Flachmatrizenpresse, 30-35 mm Presskanal, 300 kW Antrieb
- Kühlung mittels Gegenstromkühler oder Kontaktkühler und Wärmerückgewinnung

Tabelle 31: Bewertung der eingesetzten Technologien für die Verarbeitung von *S. hermaphrodita*

	Zerkleinerung		**Trocknung**		**Pelletierung**	
	Hammer-mühle	Kollermühle	Bandtrockner	Flugstrom-trockner	Ring-matrize	Flach-matrize
Vorteil	kostengünstig	Agglomeration und Verdichtung, Trocknung	Abwärmenutzung, Niedertemperatur	Günstig, Abwärme nutzbar	Viele Anbieter	gut geeignet für *S. hermaphrodita*
Nachteil	Ex-Schutz erforderlich, Faser-entmischung	Teuer, erhöhter Energieeintrag	teuer, überdimensioniert für *S. hermaphrodita*	nachge-schaltete Abluftreinigung nötig	instabiler Prozess für *S. hermaphrodita*	teuer, wenige Anbieter
Energieinput (kWh t^{-1}) Technikum	44	51	~100	n.z.	~160	~60
Energieinput (kWh t^{-1}) industriell (skalierte Werte)	~ 15 (elektrisch)	~25 (elektrisch)	100 (thermisch)	100 (thermisch)	~70-90	~60

Legende: n.z. = nicht zutreffend

Die mobile Pelletierung von *S. hermaphrodita* kann nach den erfolgten Versuchen als machbar eingestuft werden. Es ist davon auszugehen, dass durch Optimierung der Prozessbedingungen noch wesentliche Verbesserungen hinsichtlich Produktqualität und Prozesseffizienz erreicht werden können. Das Potenzial der von der Schaider Group neu entwickelten Pelletiertechnologie ist sowohl im mobilen, als auch im stationären Bereich als hoch einzustufen.

Bestimmung der Brennstoffqualitäten von *S. hermaphrodita* sowie Anforderungen an Feuerungsanlagen

Aus den Versuchsergebnissen der Verbrennungsversuche lassen sich grundsätzliche technologische Anforderungen – vor allem im Bereich Asche-Management und Emissionen ableiten. Als größte technologische Herausforderungen stellte sich einerseits der relativ hohe Aschegehalt heraus, der bei ungünstiger Brennstoffzusammensetzung zu Verschlackung führen kann. Andererseits ist das erhöhte Korrosionsrisiko zu beachten. Referenzversuche mit anderen Rohstoffen (z.B. Weide, Miscanthus) dienen einer ersten qualitativen Einordnung von *S. hermaphrodita* im Vergleich zu bereits erforschten Alternativ-Brennstoffen, und zeigen in verschiedener Hinsicht durchaus Ähnlichkeiten mit Holzbrennstoffen auf. Erwartungsgemäß zeigte die Charge mit *S. hermaphrodita*, die bei den praktischen Verbrennungsversuchen getestet wurde, aufgrund des N-Gehaltes von 0,26% erhöhte NO_x-Emissionen im Vergleich zum Betrieb mit Holzpellets (0,1% N-Gehalt). Durch den ebenfalls erhöhten Anteil von Aerosolbildnern sind bei der Verbrennung von *S. hermaphrodita* außerdem höhere Staubemissionen sowie Ablagerungen zu erwarten.

Brennstoffindizierung:

Eine Brennstoffindizierung ergab, dass die Kennzahlen, welche die Verschlackungsneigung beschreiben, bei den untersuchten Proben von *S. hermaphrodita* meist vergleichbar mit den Werten von Holzpellets und Pellets aus Kurzumtriebsplantagen sind. Unter Einbeziehen der Schwankungsbreite bei einzelnen Brennstoffeigenschaften konnte *S. hermaphrodita* als Brennstoff für Kleinfeuerungsanlagen evaluiert werden. Aufgrund des hohen Aschegehalts der Pellets von bis zu 5,1% ist eine Klassifizierung als Brennstoff nach EN ISO 17225-2 nicht möglich, da ein Grenzwert von 3% eingehalten werden muss. Eine Klassifizierung nach EN ISO 17225-6 („nicht-holzartige Pellets“) wäre eine mögliche Alternative. Die erhobenen Daten lassen *S. hermaphrodita* als durchaus vielversprechenden Rohstoff für die Brennstoffproduktion erscheinen.

Erzeugung von Bioethanol und Ermittlungen zum Gärverhalten sowie zu möglichen Prozessinstabilitäten der grünen *S. hermaphrodita* Biomasse

Die Gewinnung von flüssigen und gasförmigen Energieträgern aus *S. hermaphrodita* ist möglich. Bei der fermentativen Energiegewinnung wirkt sich die Zusammensetzung und hierbei insbesondere die stärkere Verholzung des Probenmaterials negativ aus. So können nur geringe Erträge bei der Gewinnung flüssiger Stoffe erreicht werden. Bei der Biogasgewinnung wirkt sich ebenfalls die Verholzung negativ auf die Vergärung aus. Als Co-Substrat ist ein Einsatz der Pflanze durchaus denkbar.

Wirtschaftliche Einschätzung zur Produktion und Verwertung von *S. hermaphrodita*

Wie die vorliegenden Ergebnisse aus den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen gezeigt haben, kann zurzeit mit *S. hermaphrodita* als Energiepflanze nur unter bestimmten Voraussetzungen ein positiver durchschnittlicher jährlicher Deckungsbeitrag erzielt werden. Das Verfahren der mobilen Pelletierung hat den Vorteil geringer Pelletier-, Lager- und Transportkosten. Da die für eine effiziente Verwertung notwendige Erhöhung der Schüttdichte durch Pelletierung bereits unmittelbar am Feld erfolgt, kann bei Nutzung dieser Verfahrenstechnik auch eine überregionale Vermarktung angedacht werden. Es bleibt zu

beobachten, ob die für den Energy Harvester erzielten Ergebnisse einer praktischen Erprobung des Prototyps standhalten werden. Eine stationäre Pelletierung ist unter den gegebenen Voraussetzungen lediglich im industriellen Maßstab sinnvoll, diese jedoch nur bei geringen Transportentfernungen – ein Aspekt, welcher die Attraktivität dieser Möglichkeit wiederum beträchtlich einschränkt. Eine Nutzung der Pflanze als Substrat in Biogasanlagen kann, trotz einer geringen angenommenen Transportentfernung von fünf km zwischen Feld und Biogasanlage, keinen positiven durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeitrag erwirtschaften.
Unabhängig von der jeweiligen Nutzung ist generell anzumerken, dass derzeit die hohen Kosten der Bestandesbegründung durch vorgezogene Jungpflanzen einer wirtschaftlich sinnvollen Verwertung entgegenstehen. Gelingt es beispielsweise, die Kosten der Bestandesbegründung, etwa durch Entwicklung eines kostengünstigen und praktikablen Anbauverfahrens, auf die Hälfte zu senken, können die wirtschaftlichen Kennzahlen wesentlich verbessert werden, wie Tabelle 30 veranschaulicht.

5 Ausblick und Empfehlungen

Mit einer angepassten Saatgutvorbehandlung und einem frühen Aussaattermin konnte der Feldaufgang von *S. hermaphrodita* signifikant gesteigert werden. Die für den ersten Aussaattermin (10.05.2016) gemessenen Parameter TM-Ertrag und Pflanzenhöhe am Ende des ersten Anbaujahres waren vergleichbar mit denen der im Projekt SIDecA ausgepflanzten Bestände, womit eine kostengünstige und erfolgreiche Bestandesbegründung von *S. hermaphrodita* durch eine Aussaat möglich erscheint. Als weitere Forschungspunkte für eine effizientere Bestandesbegründung wären ein noch früherer Aussaattermin, sowie eine mögliche Pillierung oder ein Beizen der Samen als Schutz vor Pilzbefall denkbar.
Auf Grund des Biomassepotentials sowie den ökologischen Vorteilen von *S. hermaphrodita* erscheint zukünftige eine thermischen Nutzung der Biomasse durchaus möglich. Vor allem auf extensiven und erosionsgefährdeten Flächen kann die Pflanze eine Alternative darstellen. Aussagen über die Ausdauer von Beständen bei langjähriger Nutzung sind auf Grund der vorliegenden Ergebnisse nicht möglich, weshalb ein Langzeitversuch mit *S. hermaphrodita* von großem Interesse wäre.
S. hermaphrodita zeigt hinsichtlich der chemischen und brennstofftechnischen Charakteristik interessante Eigenschaften als agrarischer Brennstoff, für den Einsatz in landwirtschaftlichen und gewerblichen Feuerungen, oder auch in Fernwärmenetzten. Für die mechanische Aufbereitung von *S. hermaphrodita* kann die Pelletierung im Rahmen einer Lohnpelletierung empfohlen werden. Da das Hauptaufkommen der verholzten Biomasse saisonal in der Zeit von Jänner bis Februar zu erwarten ist, kann die Pelletierung um diese Zeit z.B. in entsprechend ausgestatteten Mischfutterwerken umgesetzt werden. Ein Mischfutterwerk durchschnittlicher Größe kann in diesem Zeitraum bei Vollauslastung im Zwei-Schichtbetrieb täglich 60-80 t *S. hermaphrodita* verarbeiten, was einer Anbaufläche von 5 bis 10 ha entspricht. In einem regionalen Einzugsgebiet kann daher eine Anbaufläche von 200-400 ha von einem entsprechend ausgelegten Pelletwerk abgedeckt werden. Die Transportstrecke des Rohstoffes sollte unbedingt kurz gehalten werden, idealerweise weniger als 20 km. Kommt es zur Marktreife einer mobilen Pelletiertechnik so ist dieser eindeutig der Vorzug zu geben, da so sowohl Investitions-, als auch

Energie- und Transportkosten wesentlich eingespart werden können. In diesem Fall ist auch ein Anbauszenario mit weitläufiger verteilten Flächen realistisch.
S. hermaphrodita eignet sich prinzipiell sehr gut für eine thermische Verwertung. Trotz des relativ hohen Aschegehaltes konnte der Brennstoff in der verwendeten Feuerungstechnologie problemlos eingesetzt werden. Die hohe Schwankungsbreite der Rohstoffqualität muss jedoch berücksichtigt werden. Daher ist eine uneingeschränkte Verwendung ohne vorherige Brennstoffanalyse nicht empfehlenswert. Die Brennstoffindizierung zeigte, dass bei *S. hermaphrodita* durchaus die Möglichkeit von Korrosion sowie Verschlackung besteht. Um Aussagen bezüglich Betriebssicherheit mit Fokus auf Schlackebildung und Korrosion treffen zu können, ist zunächst die Durchführung von Langzeitversuchen und Feldtests erforderlich. Zusätzlich sollte die Eignung von *S. hermaphrodita* in weiteren Feuerungsanlagen untersucht werden, um einen möglichen Technologieeinfluss identifizieren zu können.
Bei der Gewinnung von flüssigen Energieträgern müssen die Vorbehandlungsmethoden näher betrachtet werden. Hier besteht noch Potential, effizientere und bessere Verfahren entwickeln zu können. Auf Grund der Verholzung kann überlegt werden, ob der Steam Explosion Prozess zu einer höheren und verbesserten mikrobiologischen Verfügbarkeit führt.
Bezüglich der Biogasgewinnung aber auch der fermentativen Nutzung muss untersucht werden wie sich die Ausbeuten im Laufe der Jahre verhalten, also inwieweit es zu einer stärkeren Verholzung in späteren Anbaujahren kommt und ob dies zur Reduzierung der Ausbeuten führt.
Im Zuge der Wirtschaftlichkeitsberechnungen haben sich die Sicherstellung der Praxistauglichkeit der mobilen Pelletierung, eine beträchtliche Senkung der Kosten der Bestandesbegründung durch Entwicklung eines effizienten Aussaatverfahrens sowie der erzielbare Pelletspreis als wesentliche ökonomische Stellschrauben herausgestellt. Aus wirtschaftlicher Sicht sollte daher in den kommenden Jahren der Weiterentwicklung dieser Aspekte die größte Aufmerksamkeit zukommen.

6 Literaturverzeichnis

[1] BORKOWSKA, H. AND MOLAS, R. (2013): Yield comparison of four lignocellulosic perennial energy crop species. *Biomass and Bioenergy*, 51, 145-153. http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.017

[2] FRANZARING, J., HOLZ, I., KAUF, Z., FANGMEIER, A. (2015): Responses of the novel bioenergy plant species *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby and Silphium perfoliatum L. to CO_2 fertilization at different temperatures and water supply. *Biomass & Bioenergy*, 81, 574-583 http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.031

[3] JABLONOWSKI, N.D., KOLLMANN, T., NABEL, M., DAMM, T., KLOSE, H., MÜLLER, M., BLÄSING, M., SEEBOLD, S., KRAFFT, S., KUPERJANS, I., DAHMEN, M. AND SCHURR, U. (2016): Valorization of Sida (*Sida hermaphrodita*) biomass for multiple energy purposes. *GCB Bioenergy*, 9, 202-214. http://doi.org/10.1111/gcbb.12346

[4] PACKA, D., KWIATKOWSKI, J., GRABAN, Ł. AND LAJSZNER, W. (2014): Germination and dormancy of *Sida hermaphrodita* seeds. *Seed Science and Technology*, 42, 1-15. http://doi.org/10.15258/sst.2014.42.1.01

[5] HÖLLER, M. (2013): Persönliche Mitteilung am 10.09.2013

[6] HEIDECKER, B. (2012): Anbauinformation: „Neue Energiepflanzen"; Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Nördlingen. [URL: http://www.aelfnd.bayern.de/laendlicher_raum/linkurl_1.pdf] (02.09.2013)

[7] EN 303-5: Heating boilers - Part 5: Heating boilers for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 kW - Terminology, requirements, testing and marking, 2012

[8] VDI 2066-1: Particulate matter measurement - Dust measurement in flowing gases - Gravimetric determination of dust load, 2006

[9] SOMMERSACHER, P., BRUNNER, T. AND OBERNBERGER, I. (2012): Fuel Indexes: A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels. *Energy & Fuels,* 26, 380-390

[10] AGES (Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit) - Institut für Tierernährung und Futtermittel (2016). Prüfbericht Nr. D-10658327: Weender Analyse von zwei Sida-Proben (1 x getrocknet, 1 x siliert)

[11] ÖKL (Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung). (2017). ÖKL-Richtwerte. verfügbar unter: http://oekl.at/richtwerte-online/ (abgefragt am: 08.02.2017).

[12] KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft). (2017): Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. verfügbar unter: http://daten.ktbl.de/dslkrpflanze/postHv.html;jsessionid=7880BB78EFD354D6A41B94FF0374FD7C (abgefragt am: 08.02.2017)

[13] KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft). (2017): MaKost Maschinenkosten und Reparaturkosten. verfügbar unter: http://daten.ktbl.de/makost/#search (abgefragt am: 08.02.2017)

[14] KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft). (2017): Verfahrensrechner Pflanze. verfügbar unter: http://daten.ktbl.de/vrpflanze/prodverfahren/loadWirtschaftsart.action#auswahl (abgefragt am: 08.02.2017)

[15] SPERR, R. (2016). Online-Shop. verfügbar unter: http://www.energiepflanzen.com/energiepflanzen-miscanthus-pappel-weide-online-shop/sidapflanze-sida-hermaphrodita-sida-east/ (abgefragt am: 08.02.2017)

[16] GAMSJÄGER, F. (2016): LKW-Transportkosten. Mündliche Mitteilung am 01.12.2016

[17] FINCH-SAVAGE, W.E. AND LEUBNER-METZGER, G. (2006): Seed dormancy and the control of germination. *New Phytologist*, 171, 501-523. http://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01787.x

[18] MARCOS-FILHO, J. (2015): Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. *Scientia Agricola*, 72, 363-374. http://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0007.^

[19] BORKOWSKA, H., MOLAS, R. AND KUPCZYK, A. (2009): Virginia fanpetals (*Sida hermaphrodita* Rusby) cultivated on light soil; height of yield and biomass productivity. *Polish Journal of Environmental Studies*, 18, 563-568

[20] LINDSTRÖM, E., ÖHMAN, M., BACKMAN, R. AND BOSTRÖM, D., (2008): Influence of sand contamination on slag formation during combustion of wood derived fuels, *Energy Fuels,* 22, 2216-2220.

[21] MAYR ET AL (2016): Erhöhung der Biomasseproduktion durch *Silphium perfoliatum* L. zur energetischen Verwertung in Österreich. Projektendbericht. Österreichische Forschungsforderungsgesellschaft mbH (FFG)

[22] AWI (Bundesanstalt für Agrarwirtschaft). (s.a.). IDB Internetdeckungsbeiträge. verfügbar unter: http://www.awi.bmlfuw.gv.at/idb/default.html;jsessionid=9AB0FB169A9E89AE37C1999D94A87D12 (abgefragt am: 21.02.2017)

[23] RUHM, W. UND SCHUSTER, K. (2012): Kurzumtriebsflächen. BFW-Praxisinformation 28: 15 – 16. verfügbar unter: https://bfw.ac.at/050/pdf/BFW-Praxisinfo%2028_2012_KL.pdf (abgefragt am: 02.03.2017)

7 Anhang

7.1 ISO Normen

ÖNORM EN 14918: Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Heizwertes

ÖNORM CEN/TS 15370 Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung des Schmelzverhaltens der Asche - Teil 1: Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Temperaturen

ÖNORM EN ISO 11885 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES)

ÖNORM EN ISO 16948 Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff

ÖNORM EN ISO 16994 Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor

ÖNORM EN ISO 18122:2015 Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes

ÖNORM EN ISO 18134-2:2015: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Wassergehalts - Ofentrocknung, Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser - Vereinfachtes Verfahren

7.2 Ergänzende Tabellen

Tabelle 32: Ökonomische Bewertung - Kosten der Bestandesbegründung, sämtliche Standorte in € ha^{-1}

Position	Pflanzdichte [Pflanzen je m²]		
	1,33	1,77	2,66
Kosten Pflanzgut	5.307	7.062	10.613
Lohnkosten Pflanzung/Unkrautbekämpfung	1.710	1.710	1.710
Sonstige Kosten	308	308	308
Summe	7.326	9.082	12.634

(Quelle: eigene Berechnungen)

Tabelle 33: Ökonomische Bewertung - Leistung und Kosten (inkl. Düngerkosten) während der Ertragsjahre, Biogaserzeugung, Standort Grabenegg in € ha^{-1}

Jahr	Position	Sida_Pflanzung_spät___1,77_Pfl./m²	Sida_Pflanzung_früh___1,33_Pfl./m²	Sida_Pflanzung_früh___1,77_Pfl./m²	Sida_Pflanzung_früh___2,66_Pfl./m²
2	Leistung	669	665	845	950
	variable Kosten gesamt	562	559	591	608
3 - 9	Leistung	1.089	730	862	793
	variable Kosten gesamt	638	572	597	582
10	Leistung	1.089	730	862	793
	variable Kosten gesamt	719	651	677	661
Durchschnittlicher jährlicher Deckungsbeitrag (inkl. Kosten der Bestandesbegründung)		**-635**	**-672**	**-764**	**-1.184**

(Quelle: eigene Berechnungen)

Tabelle 34: Ökonomische Bewertung - Leistung und Kosten während der Ertragsjahre, thermische Verwertung, Standort Grabenegg in € ha^{-1}

Jahr	Position	Mobile Pelletierung	Pelletierung Kleinanlage		Pelletierung industrielle Anlage	
			Zwischen-lagerung	Direkt-lieferung	Zwischen-lagerung	Direkt-lieferung
2	Leistung	1.570	1.570	1.570	1.570	1.570
	variable Kosten gesamt	967	1.974	1.629	1.281	937
	davon Transport, Lagerung, Pelletierung	889	1.696	1.351	1.003	358
3	Leistung	2.928	2.928	2.928	2.928	2.928
	variable Kosten gesamt	1.766	3.451	2.839	2.159	1.546
	davon Transport, Lagerung, Pelletierung	1.639	3.124	2.511	1.831	1.218
4 - 9	Leistung	2.661	2.661	2.661	2.661	2.661
	variable Kosten gesamt	1.611	3.180	2.610	2.005	1.435
	davon Transport, Lagerung, Pelletierung	1.492	2.862	2.292	1.687	1.117
10	Leistung	2.661	2.661	2.661	2.661	2.661
	variable Kosten gesamt	1.690	3.259	2.689	2.085	1.515
	davon Transport, Lagerung, Pelletierung	1.492	2.862	2.292	1.687	1.117
Durchschnittlicher jährlicher Deckungsbeitrag		**93**	**-1.257**	**-769**	**-250**	**238**

(Quelle: eigene Berechnungen)

Tabelle 35: Ökonomische Bewertung - Leistung und Kosten während der Ertragsjahre, thermische Verwertung, Standort Großweikersdorf in € ha^{-1}

Jahr	Position	Mobile Pelletierung	Pelletierung Kleinanlage		Pelletierung industrielle Anlage	
			Zwischen-lagerung	Direkt-lieferung	Zwischen-lagerung	Direkt-lieferung
2	Leistung	1.292	1.292	1.292	1.292	1.292
	variable Kosten gesamt	802	1.651	1.373	1.080	802
	davon Transport, Lagerung, Pelletierung	734	1.382	1.105	812	535
3	Leistung	1.486	1.486	1.486	1.486	1.486
	variable Kosten gesamt	916	1.862	1.545	1.206	635
	davon Transport, Lagerung, Pelletierung	841	1.587	1.270	931	614
4	Leistung	1.708	1.708	1.708	1.708	1.708
	variable Kosten gesamt	1.047	2.106	1.744	1.352	990
	davon Transport, Lagerung, Pelletierung	964	1.822	1.461	1.068	707
5	Leistung	1.895	1.895	1.895	1.895	1.895
	variable Kosten gesamt	1.156	2.302	1.907	1.465	1.071
	davon Transport, Lagerung, Pelletierung	1.067	2.012	1.617	1.175	780
6	Leistung	2.921	2.921	2.921	2.921	2.921
	variable Kosten gesamt	1.762	3.435	2.829	2.145	1.539
	davon Transport, Lagerung, Pelletierung	1.634	3.107	2.501	1.817	1.211
7 - 9	Leistung	2.175	2.175	2.175	2.175	2.175
	variable Kosten gesamt	1.322	2.613	2.160	1.653	1.200
	davon Transport, Lagerung, Pelletierung	1.222	2.314	1.860	1.354	900
10	Leistung	2.175	2.175	2.175	2.175	2.175
	variable Kosten gesamt	1.401	2.693	2.239	1.733	1.279
	davon Transport, Lagerung, Pelletierung	1.222	2.314	1.860	1.354	900
Durchschnittlicher jährlicher Deckungsbeitrag		**-305**	**-1.374**	**-1.003**	**-593**	**-196**

(Quelle: eigene Berechnungen)

Tabelle 36: Daten zur chemisch- brennstofftechnischen Charakterisierung von *S. hermaphrodita*: Wassergehalt, Brennwert, Asche und Hauptelemente im Erntegut der Winterernte

Standort	Bestandesdichte	Beprobungspunkt	Erntejahr		Wasser-gehalt	Asche	Brenn-wert	Heizwert	Aschenschmelzverhalten				Hauptelemente				
				Analysenorm	EN 14774	EN 14918	EN 14775	EN 14775	CEN/TS 15370				EN 15104	EN 15104	EN 15104	EN 15289	EN 15289
				Abkz.	M	A	qpnet d	qpnet ar	SST	DT	HT	FT	C	H	N	S	Cl
Pflanzen / m³				Einheit	%	%	MJ/kg	MJ/kg	°C	°C	°C	°C	%	%	%	%	%
				Bezugszustand	ar	d	d	ar	d	d	d	d	d	d	d	d	d
Grabenegg/Zinsenhof	1,33-1,77-2,66 (Mischprobe)	Exakternte	2015		23,6	5,1	17,00	12,99	1320	1370	1430	1450	46,3	6	0,22	0,04	0,005
Großweikersd. Dietrich	1,77	Exakternte	2015		19	2,8	17,44	14,13	1260	1550	1550	1550	47,3	6,2	0,14	0,035	0,005
Großweikersd. Dietrich	1,77	Praxisernte	2015		19,5												
Großweikersd. Dietrich	1,77	Pellets	2015		7,8	2,6	17,5		1140	1460	1550	1550	47,8	6,1	0,26	0,043	0,034
Großweikersd. Wiesendorf	1,77	Praxisernte	2015			2,5	17,76		960	1390	1440	1460	47,8	6,1	0,27	0,028	0,02
Großweikersd. Brunnen	1,77	Praxisernte	2015			3,1	17,42		1370	1440	1450	1460	47,2	6,1	0,27	0,031	0,026
Gmünd Böhm	2,38	Praxisernte	2015			2,6	17,44		1070	1440	1450	1460	47,6	6,2	0,26	0,026	0,01
			Jahresmittelwert		**20,7**	**3,1**	**17,43**	**13,56**	**1187**	**1442**	**1478**	**1488**	**47,3**	**6,1**	**0,24**	**0,034**	**0,017**
Grabenegg/Zinsenhof	1,33	Exakternte	2016		21,6	2,6											
Grabenegg/Zinsenhof	1,77	Exakternte	2016		21	2,7	17,52	13,84	1110	1410	1430	1450	48	6	0	0	0
Grabenegg/Zinsenhof	2,66	Exakternte	2016		21,5	2,8											
Grabenegg/Zinsenhof	1,77	Exakternte	2016		24,5								47,5	6	0,35	0,03	0,013
Großweikersd. Dietrich	1,77	Praxisernte	2016		19,4	3,1	17,52	14,12	930	>1500	>1500	>1500	47,4	5,9	0,51	0,04	0,059
Großweikersd. Wiesendorf	1,77	Praxisernte	2016		20,6	2,8											
Großweikersd. Brunnen	1,77	Praxisernte	2016		20,8	2,9											
Grabenegg/Zinsenhof	1,33-1,77-2,66 (Mischprobe)	Exakternte	2016		25												
			Jahresmittelwert		**22,0**	**2,8**	**17,52**	**13,98**	**1020**	**1410**	**>1430**	**>1450**	**47,5**	**6,0**	**0,40**	**0,033**	**0,028**
Grabenegg/Zinsenhof	1,33	Exakternte	2017		20,1	1,9											
Grabenegg/Zinsenhof	1,77	Exakternte	2017		20	2,4	17,71	14,17	1180		>1500	>1500	48,5	5,91	0,199	0,024	0,018
Grabenegg/Zinsenhof	2,66	Exakternte	2017		19,7	2											
Großweikersd. Dietrich	1,77	Praxisernte	2017		20,7	2,9	17,54	13,91	890	1300	>1500	>1500	48,6	5,9	0,241	0,042	0,054
Großweikersd. Wiesendorf	1,77	Praxisernte	2017		20,7	3,2											
Großweikersd. Brunnen	1,77	Praxisernte	2017		20,9	2,9											
			Jahresmittelwert		**20,4**	**2,55**	**17,63**	**14,04**	**1035**	**1300**	**>1500**	**>1500**	**48,55**	**5,905**	**0,22**	**0,033**	**0,036**

Legende: ar = im Anlieferungszustand (as received); d = im darrtrockenen Zustand

Tabelle 37: Daten zur chemisch- brennstofftechnischen Charakterisierung von *S. hermaphrodita*: Aschebildner und Schermetalle im Erntegut der Winterernte

					Aschenbildner								Schwermetalle					
Standort	**Bestandesdichte**	**Beprobungspunkt**	**Erntejahr**		EN ISO 1188	EN ISO 1188	EN ISO 1188	EN ISO 1188	EN ISO 1188	EN ISO 1188	EN ISO 1188	EN ISO 1188	EN ISO 1188	EN ISO 1188	EN ISO 1188	EN ISO 1188	EN ISO 1188	EN ISO 1188
Pflanzen / m³			**Ernte: Januar/Februar**	**Abkz.**	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	P	Cu	Zn	Pb	Cr	Ni	Cd
				Einheit	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
				Bezugszustand	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d
Grabenegg/Zinsenhof	1,33-1,77-2,66 (Mischprobe)	Exakternte	2015		164	1748,9	45	300	1656	12868	47		4	7	1,3	< 1	< 1	0,2
Großweikersd. Dietrich	1,77	Exakternte	2015		184	1053,45	26	140	3896	6532	28		5	10	1,8	< 1	< 1	0,1
Großweikersd. Dietrich	1,77	Praxisernte	2015															
Großweikersd. Dietrich	1,77	Pellets	2015		221	1334,2	32	425	4363	7897	28		3	10	1,6	< 1	< 1	< 0,1
Großweikersd. Wiesendorf	1,77	Praxisernte	2015		220	1161	27	740	3557	5697	35		3	14	2,4	1,1	< 1	< 0,1
Großweikersd. Brunnen	1,77	Praxisernte	2015		192	968	34	210	3724	9115	29		3	10	2,5	< 1	< 1	0,1
Gmünd Böhm	2,38	Praxisernte	2015			627		98	3811	7037								
			Jahresmittelwert		**196**	**1149**	**33**	**319**	**3501**	**8191**	**33**		**4**	**10**	**1,9**	**n.a.**	**n.a.**	**n.a.**
Grabenegg/Zinsenhof	1,33	Exakternte	2016															
Grabenegg/Zinsenhof	1,77	Exakternte	2016		157,7	792,1	64	850,0	1550,0	7063,9	59,1							
Grabenegg/Zinsenhof	2,66	Exakternte	2016															
Grabenegg/Zinsenhof	1,77	Exakternte	2016															
Großweikersd. Dietrich	1,77	Praxisernte	2016		304,5	1812,6	40	530,0	5247,9	4945,2	35,8							
Großweikersd. Wiesendorf	1,77	Praxisernte	2016															
Großweikersd. Brunnen	1,77	Praxisernte	2016															
Grabenegg/Zinsenhof	1,33-1,77-2,66 (Mischprobe)	Exakternte	2016															
			Jahresmittelwert		**231**	**1302**	**52**	**690**	**3399**	**6005**	**47**							
Grabenegg/Zinsenhof	1,33	Exakternte	2017															
Grabenegg/Zinsenhof	1,77	Exakternte	2017		162	814	32	100	1637	8016	41	436						
Grabenegg/Zinsenhof	2,66	Exakternte	2017															
Großweikersd. Dietrich	1,77	Praxisernte	2017		424	1366	22	100	6624	5706	25	641						
Großweikersd. Wiesendorf	1,77	Praxisernte	2017															
Großweikersd. Brunnen	1,77	Praxisernte	2017															
			Jahresmittelwert		**293**	**1090**	**27**	**100**	**4131**	**6861**	**33**	**539**						

Legende: d = im darrtrockenen Zustand

7.3 Publikationen im Zuge des Forschungsprojektes

Tabelle 38: Übersicht Publikationen; * = in Bearbeitung

Art der Publikation	Anzahl
Peer Review Publikationen	3 (1)*
Dissertation	1*
Beiträge in Konferenz- und Tagungsbänden	5
Vorträge	9
Poster-Präsentationen	7
Populärwissenschaftliche Beiträge / Beiträge in Fachzeitschriften	5
Homepagebeiträge	6
Pressemeldungen	2
Social Media	5

Peer Review Publikationen

2017:

- VON GEHREN, P., GANSBERGER, M., FELDMEIER, S., WOPIENKA, E., PICHLER, W., WEIGL, M., BOCHMANN, G., 2017 A practical field trial to assess the potential of Sida hermaphrodita as a versatile, perennial bioenergy crop in Central Europe (in Bearbeitung).
- VON GEHREN, P., GANSBERGER, M. 2017. Investigating the type of dormancy, imbibition and germination of *Sida hermaphrodita* seeds and its practical application in a sowing experiment. In Seed Science and Technology, 45 (2), DOI:10.15258/sst.2017.45.2.14

2016:

- BEDLAN, G., PLENK, A. 2016. Erstnachweis von *Periconia sidae* an *Sida hermaphrodita* in Europa. Journal für Kulturpflanzen. 68 (9). pp. 270–272. DOI: 10.5073/JFK.2016.09.03.
- BEDLAN, G. 2016. *Didymella sidae-hermaphroditae* sp. nov., a new pathogen on *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby. Journal für Kulturpflanzen. 68 (5). pp. 130–133. DOI: 10.5073/JFK.2016.05.03.

Dissertation

2017:

- VON GEHREN, P. 2017. Potential of non-domesticated perennial energy crops of North American origin in Europe, with special consideration of Sida hermaphrodita (L.) Rusby, Universität für Bodenkultur Wien (in Bearbeitung).

Beiträge in Konferenz- und Tagungsbänden

2017:

- PICHLER, W., GÖTZL, R., ROSNER, M., WEIGL, M., FELDMEIER, S., WOPIENKA, L., GANSBERGER, M., VON GEHREN, P., MAYR, J. 2017. Sida als Brennstoff – Anbau, Pelletierfähigkeit und

Verbrennungseigenschaften. Tagungsband – 5. Mitteleuropäische Biomassekonferenz, 18-20. Jänner 2017, ISBN 978-3-9504380-1-7, S.217

2016:

- VON GEHREN, P., GANSBERGER, M., PICHLER, W., WOPIENKA, E., MONTGOMERY, LFR., MAYR, J. 2016. *Sida hermaphrodita* L. – A promising energy crop for producing an intelligent, densified and versatile energy carrier for Central Europe, Papers of the 24th European Biomass Conference, 6-9 Juni 2016, 325-329.
- VON GEHREN, P., GANSBERGER, M., Mayr J., BOCK, H. 2016. Bestandesbegründung, -führung und Ertragspotential von *Sida hermaphrodita* L. in Österreich. 84-86; 30.-31./Mai/2016; Klagenfurt; 71. ALVA-Tagung; ISSN: 1606-612X.

2015:

- VON GEHREN, P., GANSBERGER, M., MAYR, J., BOCK, H.,; PICHLER, W., WOPIENKA, E., LIEBHARD, P. 2015. Ertragspotential und Charakteristik des Erntegutes von *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby; Tagungsband. 02/JUN/2015. Steiermarkhof, Graz. 70. ALVA-Tagung. ISSN: 1606-612X. 136-138.
- GANSBERGER, M., WEINHAPPEL, M., VON GEHREN, P., RATZENBÖCK, A., LIEBHARD, P., MAYR, J. 2015. Seed germination of *Silphium perfoliatum* L. and *Sida hermaphrodita* L., and technological measures for its improvement. In: Zukünftiges Saatgut – Produktion, Vermarktung, Nutzung und Konservierung (Future Seed – production, marketing, use and conservation). Presented at the 65. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2014. ISBN: 978-3-902849-22-9. 21.

Vorträge

2016:

- VON GEHREN, P. 2016. Bestandesbegründung, Bestandesführung und Ertragspotential von *Sida hermaphrodita* L. in Österreich. 71. ALVA Jahrestagung: "Eiweißpflanzen - Strategien und Chancen für Landwirtschaft und Industrie", Klagenfurt, 30.05.2016.
- VON GEHREN, P. 2016. Potential of non-domesticated perennial energy crops in Central Europe: *Sida hermaphrodita* and *Silphium perfoliatum*. Meeting of the Heads of the EU and the EFTA/EEA Certifying Agencies for Seed (ESCAA), Vienna, 18.05.2016.
- VON GEHREN, P. 2016. Dormancy breaking pretreatments to increase germination of *Sida hermaphrodita* L. seeds. Arbeitstagung der Arbeitsgesellschaft Saatgut- und Sortenwesen, Universität Regensburg, 05.04.2016.
- GANSBERGER, M., 2016. PerEnergy-Cooperation Bioenergiepflanze *Sida hermaphrodita* L., Tech Gate Vienna, science2business Award 2016. 15.03.2016.
- MAYR, J., 2016. Biomasse und Bienenweide. Abschlussbericht Projekt Bioenergy-Silphium, Zwischenbericht Projekt SIDecA. Österreichischer Erwerbsimkerbund – Fachtagung (OEIB), Graz: 20.02.2016.
- Pichler, W., 2016. Pelletierung von Laubholz- Kurzinformation zu SIDecA im Zuge des Vortrages. DEPI, Schulung für ENplus Qualitätsmanger, Würzburg,14.09.2016

2015:

- MAYR, J., GANSBERGER, M., VON GEHREN, P., BOCK, H., PICHLER, W., WOPIENKA, E., LIEBHARD, P. 2015. Ertragspotential und Charakteristik des Erntegutes von *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby. Steiermarkhof, Graz. 70. ALVA-Tagung. 02.06.2015.
- MAYR, J., GANSBERGER, M., PICHLER, W., WOPIENKA, E., 2015. *Sida hermaphrodita* rusby - ein Rohstoff mit vielen Gesichtern. Franz Grillstraße 5-7; BioUp Fachtag 2015. 22.04.2015

2014:

- GANSBERGER, M., 2014. Keimfähigkeitsbeeinflussende Faktoren und saatguttechnologische Maßnahmen bei *Silphium perfoliatum* L. & *Sida hermaphrodita* L. 65. Pflanzenzüchtertagung, Irdning/Gumpenstein: 24.-26.11.2014.

Poster-Präsentationen

2017:

- PICHLER, W., GÖTZL, R., WEIGL, M., FELDMEIER, S., WOPIENKA, E., GANSBERGER, M., VON GEHREN, P., MAYR, J. 2017. *Sida hermaphrodita* L.: a promising energy crop for thermal utilization. World Sustainable Energy Days, Wels: 01.-03.03.2017

2016:

- GANSBERGER, M., VON GEHREN, P., PICHLER, W., WOPIENKA, E., MONTGOMERY, LFR., MAYR, J. 2016. *Sida hermaphrodita* L. – A promising energy crop for producing an intelligent, densified and versatile energy carrier for Central Europe. 24th European Biomass Conference, Amsterdam, 06-09.06.2016.
- GANSBERGER, M., MAYR, J. 2016: Projekt „SIDecA“. Vienna, Austria, Meeting of the Heads of the EU and the EFTA/EEA Certifying Agencies for Seed (ESCAA), 18.05.2016.

2015:

- GANSBERGER, M., MAYR, J. 2015. Das Projekt: SIDecA. Biomassekonferenz. Wieselburg. 29.01.2015.

2014:

- GANSBERGER, M., 2014. SIDecA - Sida: Intelligent Densified Energy Carriers for Austria. AGES forscht! Bioenergie(pflanzen) für Österreich, Ruprechtshofen. 11.09.2014.
- LIEBHARD, P., DEIM, F., MAYR, J., 2014. Ertragspotential von *Silphium perfoliatum* L. und *Sida hermaphrodita* L. für die kaskadische Nutzung. AGES forscht! Bioenergie(pflanzen) für Österreich, Ruprechtshofen. 11.09.2014.
- FELDMEIER, S., SCHWABL, M., WOPIENKA, E., 2014. SIDecA: Intelligent Densified Energy Carriers for Austria. Potential zur Nutzung als Brennstoff. AGES forscht! Bioenergie(pflanzen) für Österreich, Ruprechtshofen. 11.09.2014.

Populärwissenschaftliche Beiträge / Beiträge in Fachzeitschriften

2017:

- FELDMEIER, S., GANSBERGER, M., 2017. Sida – Intelligent Densified Energy Carriers for Austria (SIDecA). Biobased Future, Nummer 7, 17.

2016:

- MAYR, J., GANSBERGER, M., VON GEHREN, P., AUER, W., HEIGL, H., 2016. *Sida hermaphrodita* - Schon davon gehört? Bienen aktuell. Nummer 12, 11-13.
- PICHLER, W., WEIGL, M., WOPIENKA, E., GANSBERGER, M., 2016. Ein neuer Hoffnungsträger für den Pellets-Rohstoffmarkt - Pelletierung der Virginiamalve ähnlich wie von Nadelholz. Holzkurier. Nov 14, 2016.

2015:

- FASSLER, U. 2015. Regionalität hat Priorität. Gärtner + Florist. 20. Jahrgang. 10/2015. 32-34.

2014:

- WOPIENKA, E., 2014. Sida – Intelligent Densified Energy Carriers for Austria (SIDecA). Biobased Future, 2, 27.

Homepagebeiträge

2017:

- AGES, 2017. AGES forscht – BioEnergie. AGES Newsletter 04/17 [URL: https://www.ages.at/index.php?id=33355&no_cache=1#pk_campaign=AGES%20Newsletter%2004/17&pk_kwd=oeffnen] (06.04.2017).
- AGES, 2017. Bioenergie. [URL: https://www.ages.at/bioenergie/sida/],
- BIOUP, 2017.NEWS. [URL: http://www.bioup.at/news/news-detail/artikel/projektabschluss-sideca/],

2014:

- AGES, 2014. Sida: Intelligent Densified Energy Carriers for Austria (Akronym: SIDecA). [URL: http://www.ages.at/ages/landwirtschaftliche-sachgebiete/saat-und-pflanzgut/projekte-und-studien/sida-hermaphrodita-l-rusby/] (14.05.2014).
- AGES, 2014. News aus der Forschung - Startschuss für Energiepflanzen-Projekt "SIDecA". Ages Newsletter. [URL: http://www.ages.at/ages/presse/newsletter/kalenderjahr-2014/newsletter-0614-28052014_1/#c53293] (28.05.2014).
- BIOUP, 2014. Projektstart SIDecA. [URL: http://www.bioup.at/news/news-detail/artikel/projektstart-sideca/] (23.05.2014).

Pressemeldungen

2014:

- APA-JOURNAL ZUKUNFT WISSEN, 2014. AGES-Forschung - Startschuss für Energiepflanzen-Projekt "SIDecA". APA-Journal Zukunft Wissen, 06.06.2014.
- APA-SCIENCE, 2014. AGES-Forschung - Startschuss für Energiepflanzen-Projekt "SIDecA". [URL: http://science.apa.at/rubrik/natur_und_technik/AGES-Forschung_-_Startschuss_fuer_Energiepflanzen-Projekt_SIDecA/SCI_20140530_SCI39471352418608992] (30.05.2014).

Social Media

2014:

Twitter:

- AGES NEWS, 2014. AGES forscht #Bioenergie-Pflanze #Sida http://www.ages.at/ages/presse/pressemeldungen/ages-forscht-bioenergiepflanzen-fuer-oesterreich/ … @agesnews Markus Gansberger präsentiert neues Projekt. Twitter. [URL: https://twitter.com/agesnews/status/510064579398090752] (11.09.2014).
- AGES NEWS, 2014. Bioenergy-#Silphium & SIDecA-Projektpartner #Sida am #AGES-Versuchsfeld Grabenegg, NÖ http://klimafonds.gv.at & ffg.at. Twitter. [URL: https://twitter.com/agesnews/status/510098643039551489] (11.09.2014).
- AGES NEWS, 2014. #Forschung - Bio-#Energie-#Pflanze #Sida wird am @agesnews-Versuchsfeld Grabenegg für Forschungsprojekt angebaut. Twitter. [URL: https://twitter.com/agesnews/status/501308596395982848] (18.08.2014).
- AGES NEWS, 2014. #Forschung: Bio-#Energie-#Pflanzen für Österreich #SIDecA http://www.ages.at/ages/landwirtschaftliche-sachgebiete/saat-und-pflanzgut/projekte-und-studien/sida-hermaphrodita-l-rusby/ … #Silphium http://www.ages.at/ages/landwirtschaftliche-sachgebiete/saat-und-pflanzgut/projekte-und-studien/bioenergy-silphium/ … @agesnews. Twitter. [URL: https://twitter.com/agesnews/status/501296391957000193] (18.08.2014).
- ACHATZ, R., 2014. AGES Tweet - Forschung - #Sida als neue nachhaltige Energiepflanze für #Bioethanol #Biogas http://www.ages.at/ages/presse/newsletter/kalenderjahr-2014/newsletter-0614-28052014/#c53141 … @klien_fonds pic.twitter.com/0hYqBPZjpg [URL: https://twitter.com/RoliRolihlahla/status/473363495904624640/photo/1] (02.06.2014).

7.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: *S. hermaphrodita* zum Ende der Blüte (Grabenegg, NÖ) (Bildquelle: AGES GmbH).....6
Abbildung 2: Lage der Versuchsstandorte.....13
Abbildung 3: Flachmatrizenpresse Kahl 33-390 mit Rohstoffzufuhr (Bildquelle: Holzforschung Austria), rechts: schematisches Funktionsprinzip, entspricht Kollermühle (Bildquelle: A. Kahl).....20
Abbildung 4: Ringmatrizenpresse Salamtec ECO Mini 360 mit geöffneter Pressentüre (links) und Koller gelocht (rechts vorne) sowie geriffelt (rechts hinten) (Bildquelle: Holzforschung Austria).....21

Abbildung 5: Verdichter bei der Vormontage (links), Öffnung für Rohstoffeinlauf und Ringspalt (rechts) (Bildquelle: Holzforschung Austria) 22
Abbildung 6: Schematische Darstellung der definierten Produktionsverfahren (Biogaserzeugung) 26
Abbildung 7: Schematische Darstellung der definierten Produktionsverfahren (thermische Verwertung) 27
Abbildung 8: Feldaufgang der vier ausgesäten Varianten an den drei aufeinanderfolgenden Aussaatterminen 33
Abbildung 9: Verzuckerung mit zwei verschiedenen Enzymkonzentrationen 3,5 (oben) und 7 ‰ (unten) bezogen auf die Frischmasse 39
Abbildung 10: Fermentation mit *Zymomonas mobilis* 40
Abbildung 11: *Clostridium acetobutylicum DSMZ 792* mit Anfangs pH-Wert 4,87 41
Abbildung 12: Methanpotenzial von *S. hermaphrodita* ausgepflanzt (P) im Juni oder Oktober 2014 mit verschiedenen Bestandesdichten (Zahl, Pfl. m^{-2}), geerntet (E) im Juni oder Oktober 2015 42
Abbildung 13: Gaserträge der Ernte 2016 nach 35 und 52 d VWZ (blau 35 d, rot 52 d) 43
Abbildung 14: Biomethanerträge der aufgeschlossenen Proben bei 160 °C und 180 °C 44
Abbildung 15: Erntegut von *S. hermaphrodita:* Stängelbasis M1:3 (Bildquelle: Holzforschung Austria) ..47
Abbildung 16: Erntegut von *S. hermaphrodita:* Blütenstand M1:3 (Bildquelle: Holzforschung Austria) 47
Abbildung 17: Bast / Faseranteil *S. hermaphrodita* M1:3 (Bildquelle: Holzforschung Austria) 47
Abbildung 18: Holzanteil *S. hermaphrodita* M1:3 (Bildquelle: Holzforschung Austria) 47
Abbildung 19: Markanteil *S. hermaphrodita* M 1:3 (Bildquelle: Holzforschung Austria) 47
Abbildung 20: Erntegut von *S. hermaphrodita:* Maishäcksler M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria) 48
Abbildung 21: gemahlen mit Hammermühle Sieb 14 mm M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria) 48
Abbildung 22: gemahlen mit Hammermühle Sieb 7 mm M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria) 48
Abbildung 23: gemahlen mit Kollermühle Matrize 6 mm M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria) 48
Abbildung 24: Pellets aus Versuch 473001.1 M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria) 52
Abbildung 25: Pellets aus Versuch 473002 M1:1,5 (Bildquelle: Holzforschung Austria) 52
Abbildung 26: Pellets aus Versuch 473016 M1:1,5 52
Abbildung 27: Pellets aus Versuch 473023 M1:1,5 52
Abbildung 28: *S. hermaphrodita* Pellets aus der mobilen Pelletierung (M 1:1) 53
Abbildung 29: Summe der Konzentrationen an Kalium, Natrium, Zink und Blei. Schwankungsbreite bei unterschiedlichen Biomasse-Kategorien 55
Abbildung 30: Staubemissionen bei den praktischen Verbrennungsversuchen in Abhängigkeit der Summe der Konzentrationen an Kalium, Natrium, Zink und Blei im Brennstoff 55
Abbildung 31: Molares (Silicium)/(Calcium + Magnesium)-Verhältnis. Schwankungsbreite bei unterschiedlichen Biomasse-Kategorien 56
Abbildung 32: Verschlackungsneigung bei den praktischen Verbrennungsversuchen in Abhängigkeit des molaren (Si)/(Ca + Mg)-Verhältnisses 56
Abbildung 33: Auswirkungen einer niedrigeren Auslastung des Energy Harvesters auf die durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeiträge in € ha^{-1} bei der mobilen Pelletierung 62
Abbildung 34: Durchschnittliche jährliche Deckungsbeiträge in € ha^{-1} am Standort Grabenegg bei unterschiedlichen Pelletspreisen 63

7.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mitglieder und ihre Aufgaben des für das Forschungsprojekt SIDecA gegründeten Konsortiums 7
Tabelle 2: Getestete Faktoren und jeweilige Faktorstufen zur Brechung der physikalischen Dormanz von *S. hermaphrodita* 14
Tabelle 3: Getestete Faktoren und jeweilige Faktorstufen zur Brechung der physiologischen Dormanz von *S. hermaphrodita* 15
Tabelle 4: Getestete Aussaattermine und Saatgutvorbehandlungen des Feldversuches 15
Tabelle 5: Probenahme- und Messplan für die Charakterisierung von *S. hermaphrodita* 18
Tabelle 6: Aufschlüsselung der Analyseumfänge für die gewonnenen Proben 18
Tabelle 7: Versuchsplan für die Pelletierung von *S. hermaphrodita.* 19
Tabelle 8: Übersicht der eingesetzten Maschinen im Biomassetechnikum 20
Tabelle 9: Versuchsdesign für die Versuche mit der mobilen Pelletiermaschine der Firma Schaider Group (ehemals SCM) 23
Tabelle 10: Einfluss verschiedener Vorbehandlungen zur Brechung der physikalischen Dormanz von *S. hermaphrodita* Samen auf die Keimfähigkeit und auf die Wasseraufnahme 30
Tabelle 11: Effekt verschiedener Behandlungen zur Brechung der physiologischen Dormanz, bei vorheriger Brechung der physikalischen Dormanz 31
Tabelle 12: Mittlerer Feldaufgang der vier ausgesäten Varianten (zusätzlich ihrer Keimfähigkeit unter Laborbedingungen) und mittlerer Feldaufgang der drei aufeinanderfolgenden Aussaattermine 33
Tabelle 13: Pflanzenhöhe, Blattflächenindex und TM-Ertrag der drei im Feldversuch getesteten Aussaattermine am Ende der ersten Vegetationsperiode 34
Tabelle 14: Ernteergebnisse Biogasnutzung – 1. und 2. Erntetermin der Jahre 2015 und 2016 35
Tabelle 15: Ernteergebnisse thermische Nutzung – Erntetermin der Jahre 2015 und 2016 36
Tabelle 16: Anzahl der Triebe pro Pflanze und Stängeldurchmesser bei den Versuchen zur thermischen Nutzung zum Zeitpunkt der Erntetermin der Jahre 2015 und 2016 36
Tabelle 17: Grundbodenuntersuchungen an den Versuchsstandorten Grabenegg und Großweikersdorf 37
Tabelle 18: N_{min}-Gehalt unterschiedlicher Bodenschichten, zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei zweimaliger Ernte für die Biogasnutzung, im Mittelwert über alle Bestandesdichten in Grabenegg in den Jahren 2015 und 2016 37
Tabelle 19: Biogaserträge und Zusammensetzung bei der kontinuierlichen Vergärung von *S. hermaphrodita* 44
Tabelle 20: Übersicht der brennstofftechnisch relevanten Parameter von erntefrischem *S. hermaphrodita* Rohstoff 45
Tabelle 21: Übersicht über Aschebildner und Schwermetalle 46
Tabelle 22: Ergebnisübersicht über die Pelletierversuche 50
Tabelle 23: Abgaszusammensetzung im stabilen Volllastbetrieb 54
Tabelle 24: Durchschnittliche jährliche Deckungsbeiträge in € ha^{-1} (mit und ohne Düngerkosten) sowie Kosten (während der Erntejahre, ohne Bestandesbegründung) in € m^{-3} Methan am Standort Grabenegg 57

Tabelle 25: Pelletierkosten bei drei unterschiedlichen Verfahrenstechniken 59
Tabelle 26: Kosten der Bestandesbegründung am Beispiel des Standorts Grabenegg 60
Tabelle 27: Leistung und Kosten der Bestandesführung am Beispiel des ersten Ertragsjahres am Standort Grabenegg 60
Tabelle 28: Kosten Ernte, Logistik (Transport, Lagerung) und Pelletierung am Beispiel des ersten Ertragsjahres am Standort Grabenegg 61
Tabelle 29: Durchschnittliche jährliche Deckungsbeiträge in € ha^{-1} unter Berücksichtigung verschiedener Pelletierungs- sowie logistischer Varianten....62
Tabelle 30: Durchschnittliche jährliche Deckungsbeiträge in € ha^{-1} bei Halbierung der Kosten der Bestandesbegründung 63
Tabelle 31: Bewertung der eingesetzten Technologien für die Verarbeitung von *S. hermaphrodita*....65
Tabelle 32: Ökonomische Bewertung - Kosten der Bestandesbegründung, sämtliche Standorte in € ha^{-1} 71
Tabelle 33: Ökonomische Bewertung - Leistung und Kosten (inkl. Düngerkosten) während der Ertragsjahre, Biogaserzeugung, Standort Grabenegg in € ha^{-1}....72
Tabelle 34: Ökonomische Bewertung - Leistung und Kosten während der Ertragsjahre, thermische Verwertung, Standort Grabenegg in € ha^{-1} 72
Tabelle 35: Ökonomische Bewertung - Leistung und Kosten während der Ertragsjahre, thermische Verwertung, Standort Großweikersdorf in € ha^{-1}....73
Tabelle 36: Daten zur chemisch- brennstofftechnischen Charakterisierung von *S. hermaphrodita*: Wassergehalt, Brennwert, Asche und Hauptelemente im Erntegut der Winterernte....74
Tabelle 37: Daten zur chemisch- brennstofftechnischen Charakterisierung von *S. hermaphrodita*: Aschebildner und Schermetalle im Erntegut der Winterernte. 75
Tabelle 38: Übersicht Publikationen; * = in Bearbeitung 76

8 Kontaktdaten

8.1 Projektleiter

DDI Dr. Markus Gansberger
Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH

Kontaktadresse:
Spargelfeldstraße 191, A-1220 Wien
Tel.: +43 50 555 34840
E-Mail: markus.gansberger@ages.at
www.ages.at; www.ages.at/bioenergie

8.2 Projektpartner

Bioenergy 2020+ GmbH
Gewerbepark Haag 3, A-3250 Wieselburg-Land
office@bioenergy2020.eu
www.bioenergy2020.eu

Holzforschung Austria
Franz Grill-Strasse 7, A-1030 Wien
hfa@holzforschung.at
www.holzforschung.at

Universität für Bodenkultur Wien
Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 Wien
michael.eder@boku.ac.at; günther.bochmann@boku.ac.at; peter.liebhard@boku.ac.at
www.boku.ac.at

Gilles Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co KG
Koaserbauer Str. 16, A-4810 Gmunden
office@gilles.at
www.gilles.at

Ing. Aigner Wasser-Wärme-Umwelt-GmbH
Kremstalstraße 18, A-4501 Neuhofen/Krems
office@ing-aigner.at
www.ing-aigner.at

Schaider GmbH (ehemals SCM Produktions- und Vertriebs-GmbH)
Wiesenweg 4, A-3430 Staasdorf
office@schaider-group.com
www.schaider-group.com

Gartenbau Michael Höller
Industriestraße 15, A-3701 Großweikersdorf
office@gaertnerei-am-berg.at
www.gaertnerei-am-berg.at/