Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Reaktionen der Energiepflanzen Sida und Silphie auf erhöhte Temperaturen, reduzierte Niederschläge und den „CO_2-Düngeeffekt“

Zuwendungsempfänger:

Universität Hohenheim - Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie

Förderkennzeichen:

11EKF005 bzw. **22400511**

Laufzeit:

01.01.2012 bis 30.09.2014

Datum der Veröffentlichung:

11.02.2015

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

Abschlussbericht

September 2014

Reaktionen der Energiepflanzen Sida und Silphie auf erhöhte Temperaturen, reduzierte Niederschläge und den CO_2-Düngeeffekt

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Jürgen Franzaring, Ingo Holz, Zorica Kauf und Andreas Fangmeier

Universität Hohenheim
Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie

FNR-Projekt FKZ 22400511

Danksagung

Für die Bereitstellung des in den Versuchen benutzen Samenmaterials bedanken wir uns bei Dr. Marek Bury (Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Westpommersche Technische Universität Stettin) bzw. Mirosław Kozakowski (Ostrowąs), Dr. Kenneth Albrecht (University of Wisconsin-Madison), Jeremy West (National Plant Materials Center, Beltsville, MD), Andreas Scheurig von der Bioenergie-Region Hohenlohe-Odenwald-Tauber (H-O-T) und der Firma Chrestensen in Erfurt.

Herrn Franz-Josef Mauch vom Institut für Pflanzenzüchtung, Saatgutforschung und Populationsgenetik (350a Angewandte Genetik und Pflanzenzüchtung) der Universität Hohenheim danken wir für die Unterstützung bei den NIRS-Analysen und Frau Dr. Uta Dickhöfer und Herrn Herrmann Baumgärtner vom Institut für Tierproduktion in den Tropen und Subtropen der Universität Hohenheim für die Einführung in die Kalorimetrie. Herrn Dr. Walter Damsohn, Frau Gina Gensheimer vom Institut für Landschafts- und Pflanzenökolgie der Universität Hohenheim und den beteiligten wissenschaftlichen und studentischen Hilfskräften danken wir für die praktische Hilfestellung bei den Versuchen.

Den Herren Adelbert Lehmann, Thomas Truckses, Thomas Ruopp und Helmut Bimek (Versuchsstation Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim in Eckartsweier, Ihinger Hof, Hohenheim und Oberer Lindenhof) sei gedankt für die logistische Unterstützung bei der Anlage und Pflege von Versuchsparzellen.

Fotos auf dem Umschlag:

Links: Entwicklung von Sida-Pflanzen im CO_2-Anreicherungsexperiment 78 bis 126 Tage nach der Aussaat (Versuch 2012). In den Reihen rechts stehen die Pflanzen, die unter erhöhten CO_2-Konzentrationen gezogen wurden. Foto rechts: In Hohenheim auf dem Goldenen Acker angelegte Silphie-Parzelle (einjährige Pflanzen) zu Anfang der Blüte (4. Juli 2014).

Inhalt

1. Einleitung 1
1.1 Hintergrund des Projekts 2
1.2 Natürliche Verbreitung und Ökologie von Sida und Silphie 3
1.3 Biomassepotentiale von Sida und Silphie 6

2. Material und Methoden 11
2.1 Herkunft des Samenmaterials 11
2.2 Versuchsdurchführung 14
2.2.1 Herkunftsvergleich 14
2.2.2 CO_2-Versuche 2012 und 2013 16
2.2.3 Freilandversuche 19
2.3 In den Versuchen erhobene Parameter 21
2.4 Statistische Analysen und Darstellung der Ergebnisse 24

3. Ergebnisse und Diskussion 25
3.1 Klimabedingungen während der Versuche 25
3.2 Ergebnisse des Herkunftsvergleichs 27
3.2.1 Etablierungsphase 27
3.2.2 Längerfristige Untersuchungen 32
3.3 Ergebnisse des Freilandversuchs 35
3.4 Ergebnisse der CO_2-Versuche 37
3.4.1 Längenwachstum und Seneszenzverlauf 38
3.4.2 Biomassen und Allokationsmuster 41
3.4.3 Pflanzliche Qualität 54
3.4.4 Ergebnisse der NIRS-Analysen 61
3.5 Untersuchungen zu Blatteigenschaften 64
3.6 Untersuchungen zur Nährstoffrückverlagerung 66

4. Zusammenfassung 68
Summary 73
Literatur 77

1. Einleitung

Als Folge der energie- und agrarpolitischen Entwicklungen wurde der Anbau von Energiepflanzen in Deutschland im letzten Jahrzehnt stark ausgeweitet (Poeschl et al. 2010, Kaub & Selbmann 2013). Mittlerweile werden 2.11 der insgesamt 11.85 Millionen Hektar Nutzfläche (18.1%) mit Energiepflanzen bestellt (FNR 2013). 1.15 Millionen Hektar werden für die Biogasproduktion, 0.786 Mio. ha für die Produktion von Biodiesel, 0.2 Mio. ha für die Herstellung von Bioethanol und lediglich 11.000 ha für Festbrennstoffe genutzt. Im Rahmen der Novellierung des EEG 2012 wurden erstmals Vorgaben zur Nachhaltigkeit der Landnutzungssysteme formuliert, die zur Begrenzung von Energiemais als vorrangiges Gärsubstrat für die Biogasproduktion führen sollen. Trotz der Befürchtungen der Energiepflanzenbranche ist in der Novellierung des EEG 2014 weiterhin vorgesehen, die energetische Nutzung von Biomasse als wichtigen Bestandteil der Energiewende zu fördern, allerdings wird der Zubau überwiegend auf Abfall- und Reststoffe abzielen und auf 100 MW pro Jahr begrenzt.

Als erprobte Alternative zu Mais für die Herstellung von Biogas gilt seit einigen Jahren die starkwüchsige **Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.)**. Mit dem Anbau dieser Pflanzenart wurde bereits in den 1950er Jahren in der ehemaligen Sowjetunion und dem Ostblock begonnen, wobei zunächst eine Nutzung als Silagepflanze im Vordergrund stand (Sokolov & Gritsak 1972). Grundlegende Untersuchungen zu Erträgen verschiedener Herkünfte der Silphie in verschiedenen Regionen der DDR wurden durch Neumerkel (1980) durchgeführt. Im Westen Deutschlands wurde das Potential der Silphie erstmals durch Elsässer (1989) beschrieben. Merkwürdigerweise begann das Interesse an der Silphie in ihrem Herkunftsland, den USA, erst in den 1990er Jahren (Stanford, 1990; Albrecht & Goldstein 1997; Lehmkuhler et al. 2007). Neu ist der Versuchsanbau in China und Chile (Pan et al. 2011; Pichard 2012). Einige statistische Kennzahlen zum Anbau und den Erträgen sind in Kapitel 1.3 genannt. Samen- und Pflanzmaterial wird in Deutschland von einem in Thüringen ansässigen Betrieb vertrieben.

Eine zweite in Deutschland möglicherweise an Bedeutung gewinnende Energiepflanzenart ist die Virginiamalve oder **Sida (*Sida hermaphrodita* L. Rusby)**. Während ihr Potential als Brennstofflieferant in Polen bereits in den 1950er Jahren erkannt wurde (Chudzik et al. 2010) und diese Pflanzenart dort heute laut Iglinski et al. (2011) auf über 750 ha angebaut wird, gibt es in Deutschland bislang lediglich Kleinparzellen im Versuchsanbau, auf denen diese Art etabliert wurde. Erste Untersuchungen zu den Verbrennungs- und Vergasungseigenschaften der Sida wurden von Rumpler & Reichardt (2009), Wróblewska et al. (2009) und Howaniec & Smolinski (2011) vorgelegt. Samen- und Pflanzmaterial wird in Deutschland nur von einigen Kleinbetrieben vermarktet, während ein in Pommern ansässiger Großbetrieb auch größere Chargen liefert. Neben der vorrangigen Nutzung der Sida als Brennstoffpflanze wird ihre Verwendung auch als Gärsubstrat für Biogasanlagen diskutiert (FNR 2012b, c).

In dem zugrundeliegenden Forschungsvorhaben ging es nicht um anbautechnische Fragen oder die ökologisch-ökonomische Bewertung der Nutzung von Bioenergiepflanzen (siehe dazu z.B. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina 2012), sondern um grundlegende Untersuchungen zur klimatischen Anpassung der beiden Pflanzenarten. Es liegen nämlich bislang nur spärliche Informationen zur Klimasensitivität und zum Wachstumsverhalten der beiden Pflanzenarten unter mitteleuropäischen Bedingungen vor und selbst in den Ursprungsgebieten der beiden Arten, dem östlichen Nordamerika, gab es bislang keine systematischen Untersuchungen zum Wachstum und zur stofflichen Qualität der Sida und Silphie unter verschiedenen klimatischen Bedingungen.

1.1 Hintergrund des Projekts

Das Projekt widmete sich der Frage, inwieweit sich die beiden neuartigen Energiepflanzen Sida und Silphie unter mitteleuropäischen Klimabedingungen zum Anbau eignen und wie sie auf die zukünftig erwarteten erhöhten Temperaturen, reduzierten Niederschläge und erhöhten CO_2-Konzentrationen reagieren werden. Während die Modellierung zukünftiger Niederschlagsmuster noch große Probleme bereitet, gilt der Anstieg der mittleren Temperaturen dagegen als weitgehend gesichert. Unbestritten ist aber, dass sich die atmosphärischen CO_2-Konzentrationen in den nächsten Jahrzehnten fortlaufend erhöhen werden und von gegenwärtig 396 ppm (Jahr 2013, NOAA ESRL Daten) auf über 550 ppm zu Ende des 21. Jahrhunderts steigen werden. Der so genannte „CO_2-Düngeeffekt“ wird insgesamt positive Effekte auf das Pflanzenwachstum haben und zu einer verbesserten Wassernutzung führen, kann mitunter aber die pflanzliche Qualität und energetische Wertigkeit von Kultur- und Energiepflanzen beeinträchtigen.

Bei den beiden im Rahmen des Projekts betrachteten Pflanzenarten ist zu beachten, dass sie sich hinsichtlich ihrer Ökologie, ihrer biologischen bzw. energetischen Wertigkeit und Nutzung unterscheiden. Während die Silphie als Biogaspflanze genutzt wird und dabei der gesamte grüne Sproß als Gärsubstrat verwendet wird, wird von der Sida vorrangig die blattlose abgestorbene Stängelmasse als Brennstoff genutzt. Die grünen Sprosse der Sida dürften aber auch in der biologischen Konversion zu Biogas nutzbar sein (Klenke 2012). Andererseits kann das Material der Silphie brikettiert und als Festbrennstoff genutzt werden (Wrobel et al. 2013). Aus der unterschiedlichen Nutzung der nährstoffreichen Frischmasse der Silphie bzw. der lignocellulosen trockenen Stängelmasse der Sida ergeben sich verschiedene Verarbeitungsketten, die in folgender Abbildung kurz umrissen werden.

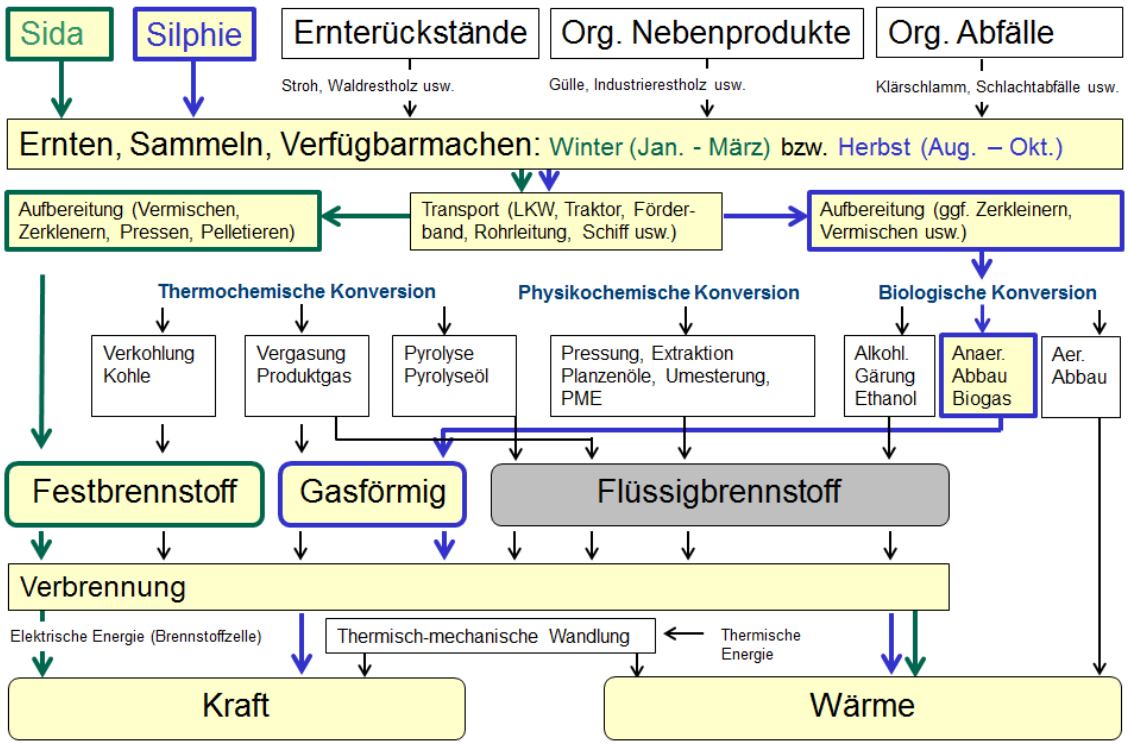

Abbildung 1. Bereitstellungsketten zur energetischen Nutzung von Sida (●) und Silphie (●) basierend auf dem Schema von Kaltschmitt et al. (2009). In der Abbildung sind nur die gängigen Konversionsverfahren dargestellt.

1.2 Natürliche Verbreitung und Ökologie von Sida und Silphie

Um die klimatische Adaptation und Wachstumsbedingungen der beiden Arten vorab einschätzen zu können, wurde zunächst die entsprechende US-amerikanische Literatur zur natürlichen Verbreitung und Ökologie gesichtet. Beide Hochstauden haben ihren Verbreitungsschwerpunkt im südlichen Einzugsgebiet der Großen Seen (s. Abb. 2) in den Staaten Pennsylvania, Ohio und Michigan. Allerdings besitzt die Silphie ein wesentlich größeres Areal als die Sida. Während letztere nach Westen nicht über den Mississippi hinaus verbreitet ist, reichen Vorkommen der Silphie bis an den 100. westlichen Längengrad, welcher als kontinentale Trockengrenze Nordamerikas definiert werden kann und Jahresniederschläge von unter 500 mm pro Jahr aufweist.

Bezüglich der Klimaklassifikation nach Köppen und Geiger zeichnet sich der Verbreitungsschwerpunkt beider Arten durch ein boreal geprägtes Dfa-Klima aus, bei dem der kälteste Monat eine Temperatur von unter −3°C und der wärmste Monat über 10°C erreicht. Während die Niederschläge über das ganze Jahr verteilt sind (zweites Kürzel „f“), liegt die mittlere Temperatur des wärmsten Monats über 22°C und es bleibt über mindestens vier Monate wärmer als 10°C (drittes Kürzel „a“). In den nördlich anschließenden sommerkühlen Dfb-Klimaten liegt der wärmste Monat unter 22°C. Vergleichbare sommerwarme Dfa-Klimate gibt es in Europa zurzeit in Südrussland und der Ukraine, jedoch werden sich diese Klimate laut Klimamodellierungen im nächsten Jahrhundert stark nach Norden und in den Osten ausbreiten (http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/shifts.htm).

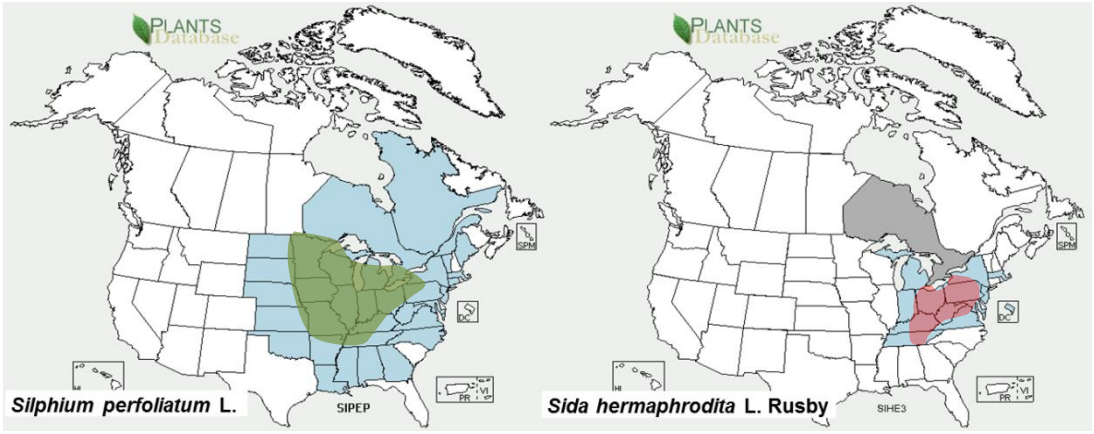

Abbildung 2. Verbreitungsareale der Silphie (links) und Sida (rechts) in ihrem nordamerikanischen Ursprungsgebiet laut US amerikanischem Landwirtschaftsministerium (http://plants.usda.gov). Blau dargestellt sind diejenigen US Staaten bzw. kanadischen Provinzen, in denen Vorkommen der beiden Arten gemeldet sind. Rot schraffiert ist das tatsächliche Areal der Sida, übertragen nach Informationen aus COSEWIC (2010) und grün schraffiert das Areal der Silphie übertragen aus prairiemoon.com. Die nördlichsten natürlichen Vorkommen der Sida reichen nur wenig über die Nordseite der Großen Seen nach Kanada in die Provinz Ontario hinüber.

Eine Übersicht über wichtige pflanzenökologische, physiologische und ertragsrelevante Kenngrößen ist in Tabelle 1 wiedergegeben. Da keine Informationen zur Blattanatomie aus der Literatur vorlagen, wurden im Rahmen des Projekts durch das Institut für Botanik der Universität Hohenheim rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Blättern beider Arten angefertigt (Franzaring et al. 2014). Diese sollten klären, ob die Pflanzenarten Stomata auf beiden Blattseiten haben, welche Form und welche Dichte (stomatärer Index) die Atemporen haben und ob die Blätter Haarstrukturen besitzen. Solche Informationen können ggf. zur Beurteilung der Anpassungen an Trockenheit herangezogen werden.

Die in den USA weit verbreitete Silphie (Familie der Asteraceae) kommt in alluvialen Bereichen der Prärien vor, bevorzugt dort vor allem feuchte Standorte entlang von Flüssen, Dickichte und Ränder von Feuchtwäldern (USDA 2002). Auch die Sida (Familie der Malvaceae) ist eine Hochstaudenart. Im südlichen Kanada ist sie sehr selten (COSEWIC 2010) und es wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, die in Ontario noch verbliebenen Populationen der Art zu schützen (Bickerton 2011). Aber auch auf der US amerikanischen Seite ist die Sida eine stark gefährdete, seltene Art (Pennsylvania Natural Heritage Program 2007) und wird vor allem durch invasive Hochstauden in Flußauen, z.B. den Europäischen Blutweiderich (*Lythrum salicaria* L.) und *Phragmitis australis* verdrängt (Ministry of Natural Resources Ontario, 2011). Auch *Phalaris arundinaceae* und *Humulus japonicus* gelten als invasive Arten, die die Sida vielerorts verdrängt haben (Thomas 1979).

Beide ausdauernden Pflanzenarten können mehrere Jahrzehnte alt werden und bilden ein großes Wurzelwerk, so dass sie an ihrem natürlichen, nicht gestörten Standort als recht konkurrenzstark gelten können. Beide Arten sind als Hemikryptophyten anzusprechen. Eine solche Lebensform ist gut an schneereiche, kalte Winter angepasst, da ihre Überdauerungsknospen nahe am Boden liegen. Während sich die Sida über Wurzelknospen ausbreiten kann, bildet die Silphie einen eher kompakten Wurzelstock und kann sich nur langsam über nahe am Boden liegende Knospen ausbreiten. Während der Spross und die Blätter der Silphie erst spät im Herbst absterben und die Pflanze mit einer kleinen aktiven Blattrosette überwintert, findet der Blattwurf der Sida deutlich früher statt. Es ist davon auszugehen, dass beide Arten vor dem Winter einen Großteil der Nährstoffe in den Wurzelstock zurückverlagern, aber es gibt keine Informationen zur Nährstoffökonomie. Bei der Ernte der noch grünen oberirdischen Biomasse der Silphie zur Biogaserzeugung ist davon auszugehen, dass die Rückverlagerung der Nährstoffe noch nicht komplett abgeschlossen ist, so dass in der nächsten Saison wieder nachgedüngt werden muss. Bei der Sida, deren abgestorbenen Stängel trocken und erst im späten Winter geerntet werden, ist davon auszugehen, dass eine nahezu komplette Rückverlagerung der Nährstoffe stattfindet.

Da beide Bioenergiepflanzenarten als Dauerkulturen gehalten und erst spät bzw. bei der Sida vor der nächsten Vegetationsperiode geerntet werden, dürfte sich bei beiden Anbausystemen eine gute Nährstoffrezyklierung ergeben. Außerdem wird in dem kräftigen Wurzelwerk im Gegensatz zu annuellen Kulturen viel unterirdische Biomasse gespeichert, was zu einer dauerhaften Festlegung von Kohlenstoff trotz der jährlich wiederkehrenden Nutzung der Sprossmasse führen kann. So bestätigten Zeri et al. (2011) in Illinois den positiven Effekt einer anhaltenden C-Sequestrierung (Netto-Ökosystem-C-Bilanz) mehrjähriger Bioenergie-Kulturen mittels der Eddy-Kovarianz-Methode. Während Mais und Soja nach 2.5 Jahren Messdauer CO_2-Quellen waren, konnten Dauerkulturen mit C4-Gräsern und wieder hergestellte Prärien (in denen auch verschiedene Silphienarten wuchsen) trotz der Abfuhr von Biomasse als Senken für Kohlenstoff fungieren. Ein Grund hierfür ist die permanente Bedeckung mit Vegetation und im Gegensatz zu annuellen Kulturen das frühere Austreiben und die ebenfalls längere Vegetationsperiode. Auch Gelfand et al. (2013) bestätigten, dass die langjährige Nutzung (20 Jahre) lignocelluloser Biomasse (wie der Sida) zur Herstellung von Ethanol aus Biomasse von Präriesukzessionen gegenüber landwirtschaftlichen Kulturen und Pappelpflanzungen erhebliche Vorteile hat. Neben einer höheren Energieproduktion haben solche Systeme damit eine erheblich bessere Treibhausgasbilanz, da die C-Sequestrierung im Boden erhalten bleibt. Die Autoren schlagen aus den erwähnten Klimaschutzgründen für den mittleren Westen der USA vor, die Biomasse marginaler Präriestandorte in Zukunft verstärkt zu nutzen. Dabei werden auch Silphie und die Sida explizit genannt (Voigt et al. 2012). Ein US-Pilotprojekt zur Biomassenutzung einheimischer Pflanzenarten wurde unlängst durch das Great Lakes

Bioenergy Research Center mit dem Wisconsin Integrated Cropping Systems and Biofuels Trial initiiert.

Bezüglich der mit der Sida und Silphie assoziierten Bodenorganismen inklusive der Frage, ob die beiden Arten über Mycorrhizen verfügen, konnten keine Informationen gefunden werden. Allerdings fanden Hedĕnec et al. (2014) in Tschechien signifikante Unterschiede in der Meso- und Makrobodenfauna zwischen einheimischen Energiepflanzenkulturen (*Salix viminalis* und *Phalaris arundinacea*) und fünf Jahre alten Silphiefeldern. Die Abundanzen von Bodentieren waren unter Silphie reduziert, was auf die hohen C:N Verhältnisse von 57 der Streu dieser Art zurückzuführen sein könnte.

Erste Untersuchungen zur Nutzung der Silphie zur Honigproduktion wurden durch Horn (2012) vorgelegt. Da die Blüte erst spät zumeist Anfang Juli einsetzt, gilt die Art als Spättrachtpflanze, was prinzipiell als Bereicherung der Imkerei anzusehen ist. Der aus der Silphie produzierte Honig ist aber relativ wasserreich und sollte den Bienenvölkern als Winterfutter belassen werden. Auch die ebenfallls spät blühende Sida wird gut von Bienen angenommen. Systematische bienenkundliche Untersuchungen zu dieser Art liegen bislang aber nicht vor.

Insgesamt sind die Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus von Sida und Silphie auf die Biodiversität in Agrarökosystemen bislang nur unzureichend untersucht. Es ist momentan auch nicht abzuschätzen, ob die beiden Pflanzenarten über ein invasives Potential verfügen. Obwohl keine detaillierten Daten zur gegenwärtigen Verbreitung außerhalb von angelegten Kulturen vorliegen, listet das Portal floraweb.de die Silphie als einen „in Einbürgerung befindlichen Neophyt“ und die Sida als „unbeständigen Neophyt“. Lediglich für die Silphie waren bis in die 1970er Jahre Auswilderungen an belgischen Flüssen belegt, jedoch sind diese Bestände mittlerweile erloschen (http://alienplantsbelgium.be/content/silphium-perfoliatum).

1.3 Biomassepotentiale von Sida und Silphie

Beide Pflanzenarten erreichen an ihrem natürlichen Standort unter guter Nährstoff-, Basen- und Wasserversorgung beachtliche Größen von über 3 m, aber sie erzielen auch auf weniger produktiven Standorten hohe Biomassen. Das hohe Potential zur Biomassebildung war in den 1950er Jahren im ehemaligen Ostblock ausschlaggebend für die Nutzung der aus den USA stammenden Pflanzenarten und die ersten erfolgreichen Kultivierungsversuche. Während die Silphie aufgrund ihrer günstigen chemischen Zusammensetzung sowohl als Viehfutter als auch als Biogaspflanze genutzt werden kann, wird die Lignocellulose-reiche Sida vorwiegend als Brennstoff genutzt. In Polen hat die Selektion von besonders ertragreichen Sida-Genotypen die Wuchshöhen auf über 4 m erhöht (Borkowska & Molas 2012). Es sind aber keine Informationen über die Zugehörigkeit der Linien zu den ursprünglichen Populationen in den USA, den weltweiten Verbreitungswegen und der in Europa erfolgten züchterischen Bearbeitung der Sida vorhanden. Auch bei der Silphie gibt es keine derartigen Informationen, jedoch gab es in Deutschland einige Untersuchungen, in denen die Wuchsleistung verschiedener Herkünfte der Silphie und verschiedene Silphienarten systematisch untersucht wurden (Neumerkel, 1980; TLL 2010). Dabei bezieht sich „Herkunft“ aber immer nur auf den Ort, an dem eine Population in den letzten Jahren zwecks Samenvermehrung kultviert wurde. Albrecht und Goldstein (1997), die in den USA zur Eignung der Silphie als Viehfutter forschen, sprechen daher bei dem Vergleich einheimischer Herkünfte mit russischen Samenquellen von einzelnen „Akzessionen“.

Siebenjährige Versuche der Thüringischen Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) zwischen 2005 und 2011 mit der Herkunft Chrestensen (Erfurt) haben gezeigt, dass die mittleren Biomasseerträge der Silphie am Standort Dornburg 225 dt TM/ha betrugen und im Direktvergleich außer in den Jahren 2007 und 2011 über denen des Mais lagen (TLL 2010; Blüthner et al. 2011). Solche hohen Erträge sind aber wohl nur bei besonders guten Standortbedingungen und einer optimalen Kulturführung zu erwarten.

Abb. 3 zeigt eine Zusammenfassung von Ergebnissen aus verschiedenen Untersuchungen zu mittleren Erträgen der Silphie an verschiedenen Orten in Deutschland. Dabei werden die von Neumerkel (1980) in den 1970er Jahren an 13 verschiedenen Orten in der ehemaligen DDR erhobenen Erträge mit verschiedenen akturellen Untersuchungen verglichen. Es zeigt sich dabei eine erhebliche Streuung der Erträge, die zum Teil auf unterschiedliche Klimabedingungen und Bodenqualitäten zurückgeht. Bei dem Vergleich von Ertragsdaten aus verschiedenen Untersuchungen muss darauf hingewiesen werden, dass nicht nur das unterschiedliche Alter von Pflanzungen, sondern auch unterschiedliche Erntezeitpunkte großen Einfluss auf die Trockenmassenerträge und noch mehr auf den spezifischen und absoluten Methanertrag haben (Mast et al. 2014, Hartmann et al. 2014).

Rund ein Drittel der beobachteten Ertragsvarianz in der Untersuchung von Neumerkel (1980) geht auf eine unterschiedliche Höhenlage der Standorte über dem Meeresspiegel zurück. In Höhenlagen über 400 m ü. NN sinkt das Ertragspotential der Silphie zumeist auf unter 100 dt pro Hektar. Dabei spielen die dort geringeren mittleren Temperaturen, sprich eine kurze Vegetationsdauer, aber auch die mit der Höhe steigenden Niederschläge eine gewisse Rolle. Demgegenüber zeigten aber die durch die TLL (2010) in Lagen unterhalb von 400 m ü. NN durchgeführten Kultivierungsversuche einen positiven Zusammenhang zwischen den im Jahre 2009 erzielten Erträgen und den Niederschlagssummen. Die Untersuchungen von Neumerkel (1980) und der TLL (2010) zeigen auch einen leichten positiven Zusammenhang (R^2 0.22) zwischen den Erträgen der Silphie und der mittleren Bodenzahl. Höchste Erträge wurden bei Neumerkel et al. (1980) und TLL (2010) auf Bördestandorten bzw. Löss-Parabraunerden (Bendeleben bzw. Dornburg in Thüringen)

erreicht. Auch auf einem bayerischen Standort (Straubing) mit guter Basen- und Wasserversorgung wurden Erträge von über 200 dt erzielt (Hartmann et al. 2014). Solche Standorte sind vermutlich den US-amerikanischen Prärieböden am ähnlichsten. Neben einem guten Wasserspeichervermögen zeichnen sie sich durch hohe Kationenaustauschkapazitäten und hohe Gesamtporenvolumina aus. Weitere Ergebnisse zu Biomasse- und Methanerträgen sind in Tabelle 1a enthalten.

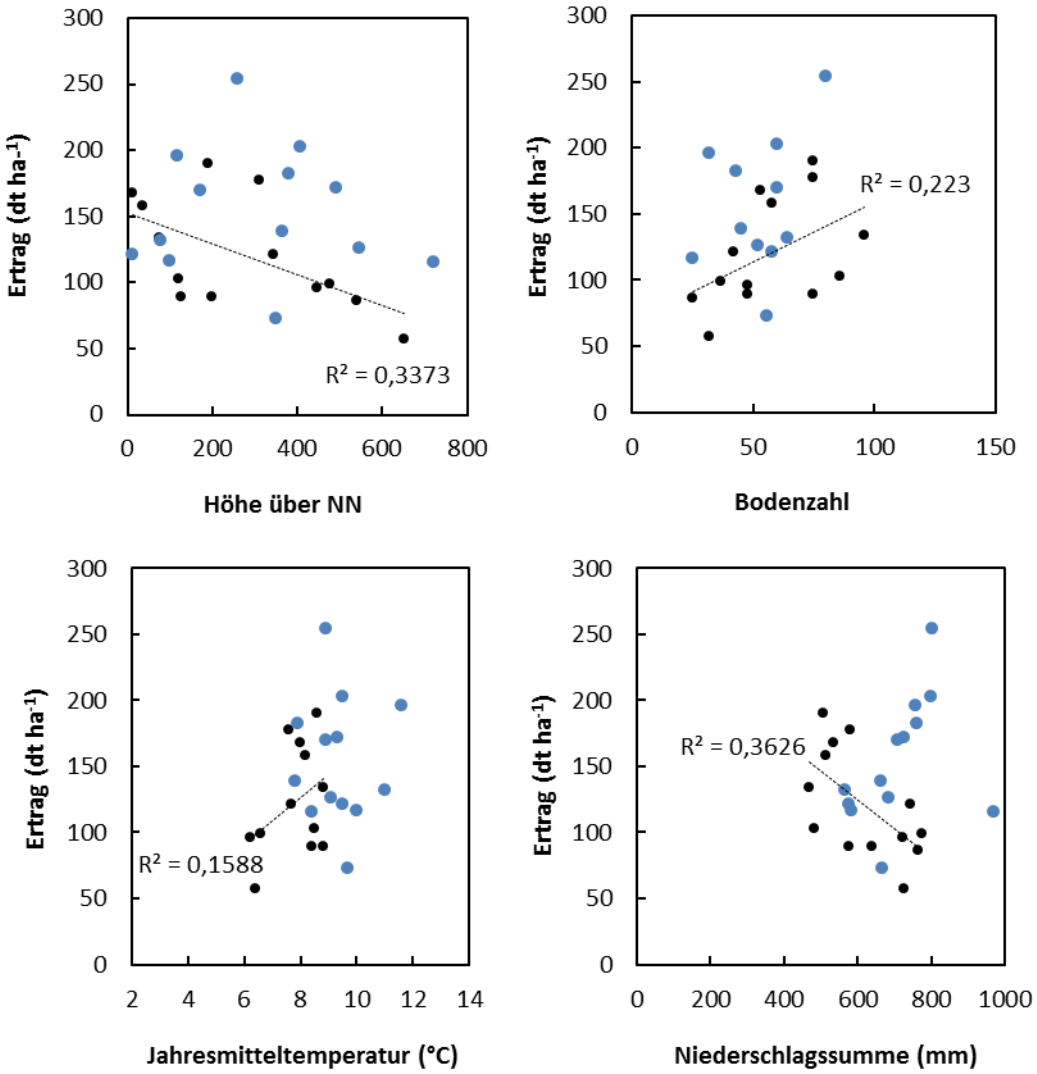

Abbildung 3. Vergleich der mittleren Erträge der Silphie in linearer Beziehung zur Höhe über dem Meeresniveau, der Jahresmitteltemperatur, der Bodenzahl und der Niederschlagssumme. Die Daten (●) basieren auf den mittleren langjährigen Erträgen an 13 Standorten in der ehemaligen DDR (Neumerkel 1980) und auf Untersuchungen der TLL (2010), Butz et al. (2013), DLR (2013) und Mast et al. (2014) an verschiedenen Standorten (●). Trendlinien stellen die linearen Zusammenhänge zwischen Erträgen und den unterschiedlichen Klimaparametern bzw. der Bodenzahl der Untersuchung von Neumerkel (1980) dar.

Neben den aus dem Versuchsanbau stammenden Originaldaten, stehen aus telefonischen Befragungen erste Regionaldaten für den Silphieanbau zur Verfügung (Biertümpfel et al. 2013). Demnach sind Brandenburg und Niedersachsen mit 44.5 bzw. 42,5 ha die Vorreiter des Anbaus. Laut der Zusammenstellung von in der Anbaupraxis im Jahre 2012 in den Bundesländern realisierten Silphie-Erträgen wurden im ersten Erntejahr in Baden-Württemberg die höchsten Trockenmasseerträge von 16.52 t pro ha erzielt, während in Sachsen-Anhalt mit 6.16 t pro ha die geringsten Erträge verzeichnet wurden (s. Abb.

4). Während die Silphie-Erträge in Baden-Württemberg nur um 11% unter denen von Mais lagen, erreichten sie in Niedersachsen lediglich 46% der Maiserträge. Wären diese auf nur wenigen Befragungen beruhenden Daten auf die Fläche übertragbar und für längere Zeiträume reproduzierbar, würde sich der Anbau im wärmeren und vor allem feuchteren Klima Süddeutschlands eher lohnen als in den kühleren Anbauregionen.

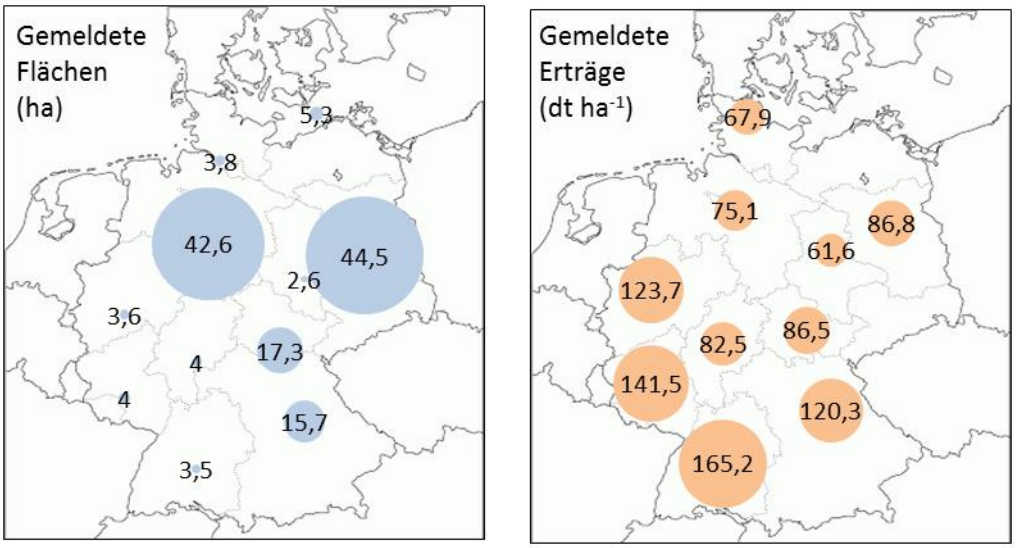

Abbildung 4. Bis zum Jahre 2012 an Biertümpfel et al. (2013) in einzelnen Bundesländern gemeldete Daten zu Anpflanzungen von Silphie (Flächen in ha, links) und im ersten Erntejahr erzielte mittlere Trockenmasseerträge (rechts). Daten für Rheinland-Pfalz basieren auf dem Jahr 2013 und sind DLR (2013) entnommen.

Leider lagen für Erträge der Sida keine vergleichbaren Ergebnisse aus verschiedenen Klimaten und auf verschiedenen Böden vor. Untersuchungen aus Polen zeigen allerdings, dass die Biomasseerträge der Sida dort in etwa vergleichbar mit der Silphie sind. In Tabelle 1b sind einige aus der Fachliteratur entnommene Zahlen zusammengestellt. Je nach Standort schwanken die Erträge ab dem dritten Jahr zwischen 90 und 200 dt TM pro Hektar. Allerdings wurden in einem Versuch (Biertümpfel et al. 2012b) im Jahre 2010 starke Auswinterungsschäden bei Sidakulturen beobachtet, so dass die Erträge in der Folge stark einbrachen und der Versuch aufgegeben wurde. In dem Versuch ging es um die Eignung der Pflanze zur Biogaserzeugung. Es wurde hierbei am 6.8.2009 das noch grüne Material geerntet, wobei lediglich 87.8 dt TM pro Hektar anfielen. Auch in Rheinland-Pfalz waren die Sidaerträge relativ gering. An den drei Standorten in der Eifel, im Hunsrück und in der Vorderpfalz wurden im dritten Standjahr lediglich 31.2, 62 und 88.7 dt geerntet, jedoch erfolgten am ersten Standort (Bitburg) zwei Schnitte und am dritten Standort (Speyer) eine frühe Ernte (Juli). Insgesamt lieferte das zur Biogasherstellung genutzte Material aber recht hohe spezifische Methanerträge (s. Tabelle 1b).

Es kann vermutet werden, dass eine Ernte des noch grünen Materials zur Biogasherstellung im Spätsommer zu Problemen bei der Rückverlagerung von Ressourcen in den Wurzelstock führen kann. Dies kann sich ggf. negativ auf die Kältetoleranz der Sida auswirken, so dass eine Nutzung nur der komplett abgestorbenen pflanzlichen Biomasse zur Brennstoff-gewinnung sinnvoller als die Nutzung der grünen Biomasse sein kann.

Tabelle 1a Zusammenstellung wichtiger Kenngrößen zur Physiologie, Ökologie und Produktionsökologie der Silphie inklusive der jeweiligen Literaturquellen.

	Silphie	
Artname	Durchwachsene Silphie, Cup Plant, Rosin weed,	
Famile	Asteraceae	
Photosynthesetyp	C3	Stanford (1990)
Verbreitung über Rhizome	eher begrenzt	
Blüten	männlich und weiblich in einer Blüte	
Bestäubung	vermutlich insektenbestäubt	
Standort	Staude in Flußauen	
Bodenansprüche	mäßig hoher pH Lösslehme, Sandböden mäßig hoher C-Gehalt	
Chromosomenzahl	2n = 14	Settle (1967)
	n=7	Stanford (1990)
Schädlinge	*Acanthocaudus* n.sp., Hymenoptera	Johnson & Boe (2011)
	Uroleucon cf. ambrosiae, Hemiptera: Aphidae	Johnson & Boe (2011)
	Eucosma giganteana , Lepidoptera: Tortricidae	Voigt et al. (2011), Boe et al. (2012)
	Sclerotina, *Pseudomonas syringae*	Stanford (1990), LTZ (2011)
Keimrate	vgl. Kapitel 2.2	
Vegetative Vermehrung	aus Wurzelstock	
Optimale Pflanzdichte	4 pro m² mit einem Reihenabstand von 50–75cm	TLL (2008); Aurbacher et al. (2012)
Optimale Düngergabe	50 kg N ha^{-1} im Anlagejahr einmalig zum Austrieb, danach je nach Ertragserwartung 140 bis 180 kg N, 55–70 kg/ha P_2O_5, 180–240 kg/ha K_2O, 80–120 kg/ha MgO	TLL (2008); Aurbacher et al. (2012)
Nutzungsdauer	>10 Jahre	Aurbacher et al. (2012)
Erträge	9 bis 11 t ha^{-1} TM, USA	Albrecht & Goldstein (1997)
	10 bis 18 t ha^{-1} TM, Thüringen	Aurbacher et al. (2012)
	15 bis 20 t ha^{-1} TM, Chile	Pichard (2012)
	10 bis 18 t ha^{-1} TM, Sachsen-Anhalt	Rumpler & Reichardt (2009)
	9 bis 19 t ha^{-1} TM, verschiedene Standorte DDR	Neumerkel (1980)
	17.2 t ha^{-1} TM, Baden-Württemberg	Mast et al. (2014)
	10 bis 20 t ha^{-1} TM, Bayern	Hartmann et al. (2014)
	7.25 t ha^{-1} TM, Litauen	Slepetys et al. (2012)
	7.3 - 19.6 t ha^{-1} TM, Baden-Württemberg	Butz et al. (2013)
	11.6-16.9 t ha^{-1} TM Rheinland-Pfalz	DLR (2013)
Methanerträge	320 Nl / kg oTM	Biertümpfel et al. (2012b)
	250-330 Nl / kg oTM	TLL (2010)
	275 Nl / kg oTM	Mast et al. (2014)
	220-300 Nl / kg oTM	Hartmann et al. (2014)
	160-169 Nl / kg oTM (berechnet)	Butz et al. (2013)
	279-302 Nl / kg oTM	DLR (2013)
Rohprotein	17,5 % (nach der Blüte)	Albrecht & Goldstein (1997)
	6% (nach Blüte), 14% (vor der Blüte)	Pichard (2012)
	15% im Mittel	Neumerkel (1980)
Rohfaser	38.5 % NDF, 29% ADF	Albrecht & Goldstein (1997)
Asche	4% (Stängel), 15 % (Blatt)	Neumerkel (1980)

Tabelle 1b Zusammenstellung wichtiger Kenngrößen zur Physiologie, Ökologie und Produktionsökologie der Sida inklusive der jeweiligen Literaturquellen.

	Sida	
Artname	Virginiamalve, Virginia Mallow, Fanpetals	
Famile	Malvaceae	
Photosynthesetyp	C3	
Verbreitung über Rhizome	ja, klonal vegetativ	Spooner et al. 1985; Bickerton (2011)
	Wurzelstecklinge	Kujawski et al. (1997); Pszczolkowa et al. (2012)
Blüten	männlich und weiblich in einer Blüte	Bickerton (2011)
Bestäubung	vermutlich insektenbestäubt	Bickerton (2011)
Standort	Staude in Flußauen	Bickerton (2011)
Bodenansprüche	pH 5.4 bis 7.5	Bickerton (2011)
	Sand- und Lehmböden	
	mäßig hoher C-Gehalt	
	Aber auch auf sandigen Ruderalflächen	Thomas (1979); Spooner et al. (1985)
	toleriert mäßig hohe Salzkonzentrationen	
Chromosomenzahl	n=7	Aguilar et al. (2003)
Schädlinge	*Coreus marginatus* L, *Lygus* spp, aphids	Pszczolkowa et al. (2012)
	Fusarium, Sclerotinia sclerotiorum,	
	Botritis cinerea	
Keimrate	< 5%, vgl. Kapitel 2.2	Pszczolkowa et al. (2012)
Vegetative Vermehrung	über bewurzelte Stecklinge	Pszczolkowa et al. (2012)
Optimale Pflanzdichte	20.000 pro ha (2 pro m^2)	Pszczolkowa et al. (2012)
Optimale Düngergabe	90 kg N, 30–90 kg P_2O_5, und 80–150 kg K_2O.	Pszczolkowa et al. (2012)
Nutzungsdauer	15 bis 20 jahre	Borkowska et al. (2006)
Erträge	9 bis 11 t ha^{-1} TM, Rekultivierungsböden	Borkowska & Wardzinska (2003)
	15 bis 20 t ha^{-1} TM, tonreiche Böden	Borkowska et al. (2006)
	9 bis 20 t ha^{-1} TM, aus Samen oder gepflanzt	Borkowska & Molas (2012)
	11.6 t ha^{-1} TM, Sachsen-Anhalt	Rumpler & Reichardt (2009)
	8.8 t ha^{-1} TM, Thüringen	Biertümpfel et al. (2012a)
	9.58 t ha^{-1} TM, Litauen	Slepetys et al. (2012)
	3.8-8.8 t ha^{-1} TM Rheinland-Pfalz	DLR (2013)
Energiegehalt	16.6 bis 18.4 MJ kg^{-1}	Pszczolkowa et al. (2012)
	18.75 MJ kg^{-1}	Borkowska & Molas (2012)
	Brennwert schlechte Kohle: 25 MJ kg^{-1}	Borkowska & Molas (2012)
	Heizwerte Holz, 0% Feuchte: 15-18 MJ /kg	TFZ Bayern (2009)
Methanerträge	300 Nl / kg oTM	Biertümpfel et al. (2012a)
	287-318 Nl / kg oTM	DLR (2013)
Rohprotein	20 % während Blüte	Borkowska & Molas (2012)
	7 % nach Blüte	
Rohfaser	28.7 % während Blüte	Borkowska & Molas (2012)
	51.5 % nach Blüte	
Rohfett	1.8 % während Blüte	Borkowska & Molas (2012)
	1.4 % bei Ernte	
Asche	11.3 % während Blüte	Borkowska & Molas (2012)
	4.6 % nach Blüte	

2. Material und Methoden

Das Forschungsprojekt basierte auf Experimenten unter kontrollierten klimatischen Bedingungen und der Nutzung von aus Samen gezogenen Individuen, die in Pflanzcontainern kultiviert wurden. Um den möglicherweise unterschiedlichen Reaktionen verschieden alter Pflanzen auf den CO_2-Düngeeffekt und die verschiedenen klimatischen Behandlungen Rechnung zu tragen, wurden in dem insgesamt dreijährigen Projekt Versuche mit Pflanzen in der Juvenil- bzw. Etablierungsphase (**CO_2-Versuch 2012**) und einjährigen Pflanzen (**CO_2-Versuch 2013**) durchgeführt. Sämtliche Pflanzen wurden im Frühjahr 2012 ausgesät, jedoch wurden im ersten Jahr des Projekts nur die für den CO_2-Versuch 2012 bestimmten Jungpflanzen in den für die CO_2-Anreicherung benutzten Klimakammern weiterkultiviert.

Die für den CO_2-Versuch 2013 (zweites Jahr des Projekts) bestimmten Pflanzen verblieben im Jahr 2012 zunächst unter Freilandbedingungen und wurden erst im März 2013 in die CO_2-Expositionskammern überführt. Ein ebenfalls im Jahr 2012 begonnener Versuch (**Herkunftsvergleich**) hatte zum Ziel, verschiedene Herkünfte der Sida und Silphie in Keim- und Wachstumsanalysen zu untersuchen. Ein Teil der Pflanzen aus diesem Versuch wurde im zweiten und dritten Jahr des Projekts in einem Versuchsgarten in Hohenheim weiterkultiviert, um Aussagen zur langfristigen Entwicklung der untersuchten Herkünfte unter Feld- bzw. Freilandbedingungen machen zu können. Gleichzeitig erfolgte mit zwei dieser Herkünfte (Sida Herkunft Nr. 3 von Biomałwa und Silphie Herkunft Nr. 8 von Chrestensen) eine vertiefte Analyse der Blatteigenschaften, der aus Isoptopenverhältnissen abgeleiteten Wassernutzungseffizienz sowie eine für die Praxis relevante Kalibration von *in vivo* durchgeführten nicht-destruktiven SPAD-Messungen auf im Labor ermittelte Chlorophyll- und Stickstoffkonzentrationen.

Des Weiteren wurden im Mai des zweiten Projektjahres 2013 an vier Standorten der Versuchsstation Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim Versuchsparzellen **(Freilandversuch)** mit den beiden genannten Herkünften der Energiepflanzen angelegt, um Unterschiede der Pflanzenentwicklung in verschiedenen Höhenlagen (Klimaten) unter Freilandbedingungen beurteilen zu können. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Dauer und die Orte, an denen die Pflanzen kultiviert wurden.

Tabelle 2. Schematische Übersicht zu Beginn und Dauer der im Rahmen des Projekts durchgeführten Versuche. Buchstabenkombinationen und Farbsignaturen geben Auskunft über die Orte, an denen die entsprechenden Pflanzen kultiviert wurden: KK-Klimakammern, GH-Gewächshaus des Instituts, FL-Freiland, KH-Kalthaus.

Versuch	Mrz. 12	Apr. 12	Mai. 12	Jun. 12	Jul. 12	Aug. 12	Sep. 12	Okt. 12	Nov. 12	Dez. 12	Jan. 13	Feb. 13	Mrz. 13	Apr. 13	Mai. 13	Jun. 13	Jul. 13	Aug. 13	Sep. 13	Okt. 13	Nov. 13	Dez. 13	Jan. 14	Feb. 14	Mrz. 14	Apr. 14	Mai. 14	Jun. 14	Jul. 14	Aug. 14
Herkunftsvergleich	KK	GH				FL																							
CO_2-Versuch 2012	KK																												
CO_2-Versuch 2013	KK		FL						KH				KK						FL										
Freilandversuch															FL (vier Standorte in Baden-Württemberg)														

2.1 Herkunft des Samenmaterials

Saatgut der Pflanzenarten Sida und Silphie (Abb. 5, Tabelle 3) wurde aus verschiedenen staatlichen und kommerziellen Quellen in Deutschland, Frankreich, Polen und den USA besorgt. Obwohl beide Arten aus Nordamerika stammen und es dort eigentlich

Sammlungen aus natürlichen Populationen geben sollte, konnten nur drei Herkünfte aus den USA bezogen werden. Lediglich bei einer Samenquelle der Silphie konnten Informationen zur dokumentierten geographischen Herkunft auf County-Ebene bereitgestellt werden, während bei zwei weiteren nur bekannt war, aus welchem US-Bundesstaat sie ursprünglich stammten. Tabelle 3 enthält Informationen zu den Bezugsquellen und den Tausendkornmassen (TKM) der in den Versuchen genutzten Samen. Die TKM wurden vor Beginn der Versuche mittels manueller Zählung und Wägung ausgezählter Samenpartien bestimmt. Samen der Silphie hatten im Mittel ein 4.5-faches der TKM von Sidasamen und die Herkünfte der Sidasamen waren weniger variabel als die der Silphiensamen. Die höchste TKM der Silphie wurde an der Herkunft Hohenheim Botanischer Garten (Nr. 11) ermittelt, während die TKM der Kreuzung Wisconsin x Arkansas (Nr. 10) nur halb so groß war (vgl. Abb. 5). Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Auflaufraten wird auf mögliche Zusammenhänge zwischen TKM und Keimfähigkeit eingegangen. Es ist allgemein anzunehmen, dass alte stark ausgetrocknete Samen mit geringer TKM über eine schlechte Keimfähigkeit verfügen, jedoch war nur bei den polnischen Sida-Samenchargen und einer Silphien-Charge das Erntejahr bekannt.

Während in den Keimversuchen alle zwölf Herkünfte berücksichtigt wurden, wurden für die CO_2-Versuche nur die Sida-Herkunft Biomałwa (Nr. 3) und die Silphien-Herkunft Chrestensen (Nr. 8) benutzt. Grund hierfür war, dass gegenwärtig nur diese Lieferanten große Samenpartien für die Anlage von Energiepflanzenkulturen bereitstellen können und in unseren Versuchen die gängigsten genetischen Ressourcen untersucht werden sollten. Gleichwohl sollte der Herkunftsvergleich Aussagen darüber erbringen, ob es neben den gängigen Herkünften gleichwertige oder ggf. sogar höher produktive Akzessionen gibt.

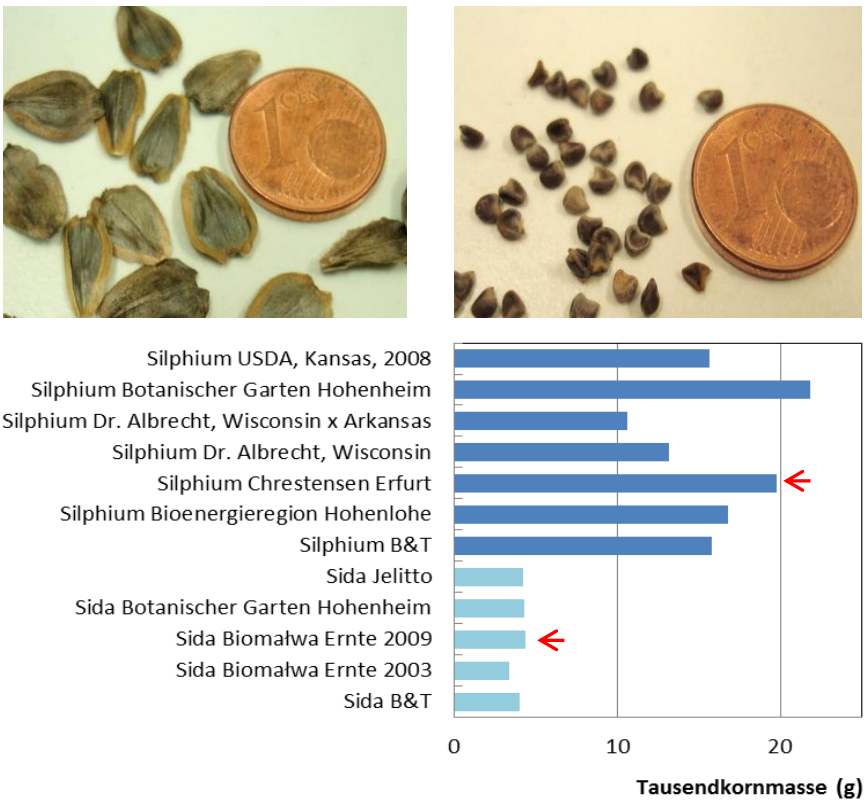

Abbildung 5. Fotos und Größenvergleich von Samen der Pflanzenarten *Silphium perfoliatum* L. (links oben) und *Sida hermaphrodita* L. Rusby (rechts oben) sowie der Vergleich der Tausendkornmassen der zwölf in den Herkunftsvergleichen eingesetzten Akzessionen. Rote Pfeile markieren die in den CO_2-Versuchen eingesetzten Herkünfte.

Tabelle 3. Bezugsquellen, Erntejahre (falls bekannt), Herkünfte und Tausendkornmassen der in den Versuchen benutzen Samen von Sida und Silphie. Die mit (●) gekennzeichneten Herkünfte wurden in den CO_2-Anreicherungsversuchen benutzt.

Nr.		Bezugsquellen (Firmen und Universitäten, Land und Erntejahr falls bekannt)	Ursprüngliche Herkunft	1000 Korn-masse (g)
		Sida hermaphrodita L. Rusby		
1		B&T Seeds, Aigues-Vives (F)	unbekannt	4
2		Biomalwa, Dr. Burek, Mr. Kozakowski (PL), Ernte 2003	unbekannt	3,4
3	●	Biomalwa, Dr. Burek, Mr. Kozakowski (PL), Ernte 2009	unbekannt	4,4
4		Botanischer Garten Hohenheim (D)	unbekannt	4,3
5		Jelitto Schwarmstedt (D)	unbekannt	4,2
		Silphium perfoliatum L.		
6		B&T Seeds, Aigues-Vives (F)	unbekannt	15,8
7		Bioenergieregion Hohenlohe (D)	unbekannt	16,8
8	●	Chrestensen Erfurt (D)	unbekannt	19,8
9		Dr. K. Albrecht, University of Wisconsin (US)	Wisconsin	13,2
10		Dr. K. Albrecht, University of Wisconsin (US)	Wisconsin x Arkansas	10,6
11		Botanischer Garten Hohenheim (D)	unbekannt	21,8
12		Dr. J. West , USDA National Plant Materials Center (US), 2008	Pearsons, Kansas	15,7

Vor Beginn der Versuche wurden Informationen über das Keimverhalten der beiden Pflanzenarten aus der Literatur zusammengestellt. Diese sind nachfolgend kurz zusammengefasst.

Silphie (vielfach als Kalt- bzw. Frostkeimer beschrieben)

- Baskin & Baskin (2001)
  Stratifizierung, 150 Tage kalt und feucht, Keimung bei 18-20°C
- Bioenergie-HOT
  Samenvorbehandlung bei -5 bis +3°C für 2-4 Wochen feucht im Kühlschrank
- USDA-NRCS und Beobachtung von Stolzenburg (2012):
  Stratifizierung für 12 Wochen, massiver Feldaufgang von ausgefallenen Samen im Frühjahr
- Neumerkel (1980), El Bassam (2010)
  Direktsaat, keimt ohne Kühle-Vorbehandlung auch aus ausgefallenen Samen im Herbst
- direkt nach der Ernte (Trölenberg et al. 2012; Stolzenburg 2012)

Sida

- www.nativeplantnetwork.org
  In 76°C heißem Wasser einweichen, 24 h quellen lassen
- Buhler & Hoffman (1999):
  Für *Sida spinosa*: Samen 30 min in 60°C warmen Wasser quellen lassen,
- COSEWIC (2010):
  Keimrate ohne Vorbehandlung 10-15% bei frisch gesammelten Samen
  Höhere Keimraten nach Vorbehandlung mit heißem Wasser (scarification)

2.2 Versuchsdurchführung

Da anfangs unklar war, ob die Silphie zum Durchbrechen der Dormanz eine Kühlebehandlung (Stratifizierung) benötigt, wurden in den Klimakammern verschiedene Temperaturbehandlungen von <5 °C bzw. >5°C eingesetzt, um etwaige Unterschiede einer Kühlebehandlung beurteilen zu können. Auch der Effekt einer Hormonbehandlung zur Erhöhung der Keimrate konnte betrachtet werden, da die Herkunft Chrestensen als einzige der eingesetzten Silphie-Herkünfte entsprechend vorbehandelt war. Allerdings waren firmeneigene Informationen zur Art der Hormonbehandlung nicht zu erhalten. Der Einsatz von Keimfähigkeit erhöhenden Hormonbehandlungen (Gibberilin + KNO_3) wird aber durch Neumerkel (1980) und Conrad & Biertümpfel (2010) beschrieben.

Da laut oben genannter Literatur bei Sida ein Brechen der Samenschale höhere Keimraten ermöglichen soll, wurden im Rahmen der Herkunftsvergleiche Samen der fünf Sidaherkünfte 30 min mit 60°C heißem Wasser vorbehandelt und als zweite Variante (Codierung Herkunfts Nr. +a) neben den unbehandelten Kontrollen (Codierung Herkunfts Nr. +b) ausgesät, um Unterschiede im Keimverhalten zu betrachten.

Am 20. März 2012 wurden 50 der für den **Herkunftsvergleich** benutzten Samen pro Reihe in mit Fruhstorfer® Einheitserde LD80 gefüllten Pflanzschalen (60 x 40 cm) ausgesät. Drei 60 cm lange Reihen wurden pro Schale angelegt, so dass die Keimlinge bis zum Pikieren genügend Platz zur Verfügung hatten und die Zählung aufgelaufener Keimlinge problemlos erfolgen konnte. Die Saattiefe betrug 1 cm. Die insgesamt sechs Anzuchtschalen der Herkunftsvergleiche wurden 49 Tage unter Normaltemperaturen in Klimakammern aufbewahrt und am 8. Mai 2012 ins Gewächshaus überführt. Alle 2 bis 3 Tage wurde bei jeder der insgesamt 17 Varianten (sieben Herkünfte der Silphie und fünf mit Heißwasser vorbehandelte und fünf nicht behandelte Kontrollen der Sida-Herkünfte) die Zahl der aufgelaufenen Keimlinge gezählt.

Um genügend Keimlinge für die **CO_2-Versuche 2012 und 2013** bereitstellen zu können, wurden jeweils vier mit LD80 Einheitserde gefüllte Saatschalen (40 x 60 cm) für die beiden Pflanzenarten (unbehandelte Sida-Herkunft Nr. 3 und Silphie-Herkunft Nr. 8) benutzt. Die Samen wurden am 20.03.2012 breitwürfig ausgesät und mit 1 cm Erde überdeckt. Die eine Hälfte der Schalen wurde bei Normaltemperaturen und die andere bei um 4°C erhöhten Temperaturen angezogen, was Aussagen über die Auflaufgeschwindigkeit und das Keimverhalten ermöglichen sollte.

2.2.1 Herkunftsvergleich

Im Versuch zum Herkunftsvergleich ging es neben der Bestimmung der Keimraten beider Arten auch um Wachstumsanalysen der verschiedenen Linien. Nach Abschluss der Keimversuche am 8. Mai 2012 wurden von den aufgelaufenen Herkünften jeweils zehn Keimlinge (1 pro Topf) in eckige 1.7 L PE-Töpfe überführt. Die Gefäße haben eine Fläche von 169 cm², was bei der Nutzung einer Pflanze pro Topf einer Pflanzdichte von 59 Pflanzen pro m² entspricht (vgl. Tabelle 4). Als Substrat wurde eine Mischung aus Einheitserde LD80 und Sand im Verhältnis 1:2 benutzt. Bezogen auf den Stickstoffgehalt im Substrat, der Mischung und der Gefäßgröße errechnet sich eine N-Versorgung von 50 kg N pro ha. Diese Menge reicht laut Aurbacher et al. (2012) als Startgabe im Anlagejahr einer Silphienkultur aus.

Neben den Topfversuchen zum Wachstumsverhalten in der Juvenilphase wurden im Juli 2012 Pflanzen der verschiedenen Herkünfte in den Versuchsgarten des Instituts für Landschafts- und Pflanzenökologie gepflanzt. Diese sollten für Untersuchungen in den Folgejahren zur Verfügung stehen. Von jeder der Herkünfte wurden vier Pflanzen auf einen Quadratmeter gepflanzt, jedoch standen für die Herkünfte 9 und 10 nur je 2 Pflanzen zur Verfügung. Während der Kultur wurden keine Pflanzenschutzmaßnahmen ergriffen und es erfolgte keine Düngung. Neben der phänologischen Entwicklung wurde der Längenzuwachs regelmäßig erfasst.

In der Saison 2013 wurden erstmalig Wachstum, Phänologie und Sprossertrag untersucht, um art- und sortenspezifische Unterschiede bei älteren, im Freiland gewachsenen Pflanzen über einen längeren Zeitraum beurteilen zu können. Es wurden wie im Jahr zuvor insgesamt 10 Herkünfte (4 Sida und 6 Silphie) betrachtet. Besonderes Augenmerk lag bei der Silphie auf der häufig genutzten deutschen Herkunft Chrestensen (Nr. 8) und bei der Sida auf der polnischen Herkunft Biomałwa (Nr. 3). Pflanzen dieser beiden Herkünfte wurden nicht nur im Herkunftsvergleich, sondern auch in dem Artvergleich der Blatteigenschaften und der herbstlichen Stoffrückverlagerung näher betrachtet. Zudem wurden diese Herkünfte in den Freilandversuchen überprüft. Der Herkunftsvergleich wurde im Jahre 2014 fortgesetzt.

2.2.2 CO_2-Versuche 2012 und 2013

Da die Pflanzen in den CO_2-Versuchen 2012 und 2013 ein unterschiedliches Alter erreichen würden und es im Jahr 2012 entsprechend des Pflanzenalters drei Erntetermine geben sollte, wurden die Pflanzen nach dem Pikieren in unterschiedlich großen Gefäßen kultiviert. Dies war auch aus Platzgründen in den Klimakammern erforderlich, da pro Behandlung und Pflanzenart vier Wiederholungen benutzt werden sollten. Die im Jahre 2012 bis zur 1. Ernte wachsenden Pflanzen wurden in 2 L Töpfen gezogen, die bis zur 2. und 3. Ernte übrig bleibenden Individuen in 4 L Töpfen. Für die im Jahr 2012 angezogen, aber erst im Jahr 2013 in CO_2-Versuchen benutzten Pflanzen wurden 7 L Rosencontainer benutzt. Das aus Einheitserde und Sand hergestellte Substrat hatte eine Dichte von 1.16 kg L^{-1} und im komplett wassergesättigten Zustand (Feldkapazität) einen Wassergehalt von 39 Vol. % bzw. 26 Gew. %. Die unterschiedlichen Gefäße wurden mit jeweils einer abgewogenen Menge Substrat gefüllt, um in jedem Versuch exakt dieselben Bodenmengen bzw. -volumina vorzugeben. Informationen zur Dimension der Gefäße, der Pflanzendichte pro Quadratmeter, der Stickstoffverfügbarkeit und zur Zusammensetzung des verwendeten Substrats sind in nachfolgender Tabelle enthalten.

Tabelle 4. Informationen zur Dimension der in den Versuchen benutzten Gefäße und der sich daraus ableitenden Pflanzdichte und Stickstoffversorgung. In allen Ansätzen wurde eine Pflanze pro Topf und eine Substratmischung aus Sand und Einheitserde LD80[a)] im Verhältnis 2:1 (v:v) genutzt.

Verwendungszweck	Volumen (L) (Höhe, cm)	Substratmasse (kg $Topf^{-1}$)	Topffläche (cm^2)	Dichte (Pfl. m^2)	N pro Topf (g N $Topf^{-1}$)	N pro Fläche (g N m^{-2})
Herkunftsvergleich	1,73 (13)	1,96	169	59	0,0865	5
CO_2 Versuch 2012, 1. Ernte	2 (17.5)	2,25	154	65	0,1	6
CO_2 Versuch 2012, 2. und 3. Ernte	4 (21.8)	4,405	240	42	0,2	8
CO_2-Versuch 2013, 1. und 2. Ernte	7 (25)	7,82	346	29	0,35	10

a) Die Zusammensetzung der Fruhstorfer® Einheitserde: Torf (50%), Vulkanasche, Rindenhumus (15%) und Langzeitdünger mit 150 mg L^{-1} N, 150 mg L^{-1} P_2O_5 und 250 mg L^{-1} K_2O. Der pH-Wert ($CaCl_2$) beträgt 5.9, die organische Substanz (Glühverlust) 35% und der Salzgehalt 1 g L^{-1} KCl. Die LD80 hat eine Dichte von 0.434 kg L^{-1}. In der Mischung aus Sand und LD80 (2:1) betrug die Dichte des eingesetzten Substrats 1.11 kg L^{-1}.

Klimasimulation, CO_2-Dosierung und Wasserversorgung

Wie in Kapitel 1.2 dargelegt, entstammen die beiden Pflanzenarten einem eher kühl gemäßigten, boreal geprägten Klima, wobei die Silphie eine wesentlich breitere Klimaamplitude als die Sida aufweist. In Europa wurden die beiden Pflanzenarten bislang vornehmlich in den kontinentaleren Klimaten Osteuropas in Kultur gebracht, jedoch können sie auch in dem warm gemäßigten mitteleuropäischen Klima gedeihen und dort hohe Erträge erzielen (vgl. Kapitel 1.3).

Als Ausgangssituation unserer in den Jahren 2012 und 2013 durchgeführten Klimakammerversuche wurde das Langzeitklima Stuttgarts für den Zeitraum 1991 bis 2005 nach den Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) betrachtet. Diese als NORM-Behandlung bezeichnete Temperaturvariante wurde in den Klimakammern des Instituts für Landschafts- und Pflanzenökologie genutzt, indem die Vegetationsperiode vom 15. März bis zum 15. August nachgebildet wurde. Im Vergleich zu den heute im Verbreitungsareal der beiden Pflanzenarten herrschenden Temperaturen (repräsentative Station Detroit) zeigt

sich, dass die heutigen Temperaturen in Stuttgart im Sommer etwa 4°C unter und im Winter 4°C über den Temperaturen in den nordöstlichen USA liegen. Das Klima in Stuttgart ist somit weitaus gemäßigter und weist nur eine kleine Jahresamplitude von unter 20°C auf (vgl. Abb. 6 rote Linien).

In der zweiten als NORM+4°C bezeichneten Temperaturvariante wurden die mittleren Temperaturen gegenüber den Normaltemperaturen um 4°C erhöht. Diese Variante sollte die im Zuge des Klimawandels ungünstigsten Falls erwartete starke Temperaturerhöhung repräsentieren. Die Betrachtung der in der NORM+4°C-Variante benutzten höheren Temperaturen zeigt aber, dass die simulierten Sommertemperaturen in etwa den heutigen im natürlichen Verbreitungsareal der beiden Arten herrschenden mittleren Sommertemperaturen entspricht. Andererseits würde eine Temperaturerhöhung um 4°C in Stuttgart aber bedeuten, dass die Temperaturen 8°C höher wären als die heutigen Mittelwerte in Detroit. Dies wurde bei den Untersuchungen aber nicht berücksichtigt, da die Pflanzen im Winter 2012/13 unter Umgebungsbedingungen im Freiland und nicht bei in Klimakammern kontrollierten Bedingungen gehalten wurden. Dennoch muss beachtet werden, dass nicht nur die wärmeren Sommerbedingungen, sondern auch die milderen Winter im Zuge des Klimawandels eine Rolle spielen. Besonders bei den an starke Kälte adaptierten perennen Pflanzenarten wie der Sida und der Silphie ist zu prüfen, ob das Ausbleiben kalter Winter in Zukunft zu Problemen beim herbstlichen Einziehen der Überwinterungsorgane, der Winterruhe und der kältegesteuerten Dormanz von Samen oder auch zu einem erhöhten Schädlingsdruck führen kann.

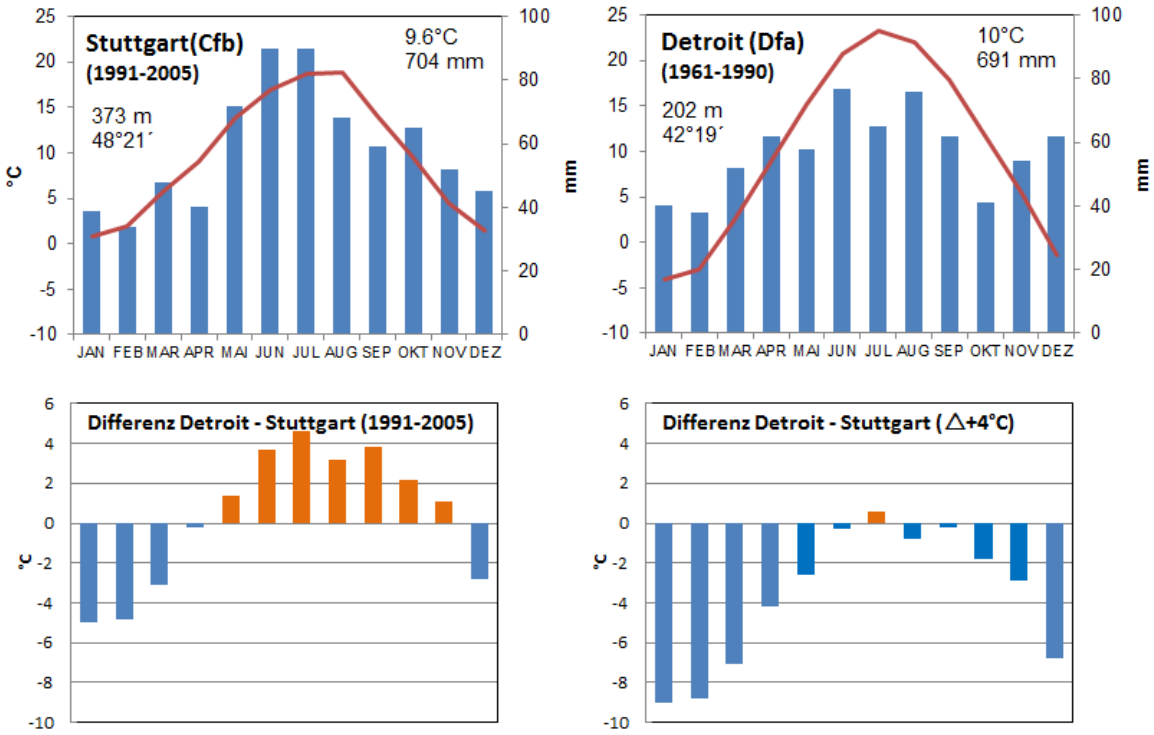

Abbildung 6. Walter-Diagramme von Stuttgart und Detroit (oben, rote Linien: Temperaturverlauf, Balken: Niederschläge) und Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Orten (unten). Bei der Berechnung der Differenzen wurden die Mitteltemperaturen des Zeitraums 1991 bis 2005 (unten links) von Stuttgart und um 4°C erhöhte Temperaturen (unten rechts) zugrunde gelegt.

Neben den unterschiedlichen Temperaturbehandlungen NORM bzw. NORM+4°C wurden in den Klimakammern als zweiter Faktor unterschiedliche CO_2-Behandlungen realisiert. Dabei repräsentierte die Behandlung, in der eine CO_2-Konzentration von 380 ppm eingestellt

wurde, in etwa den heutigen atmosphärischen Bedingungen und die auf 550 ppm hochgeregelte Variante die für das Ende des 21. Jahrhunderts erwartete CO_2-Konzentration. Die Dosierung des Kohlendioxids erfolgte über Computer gesteuerte Magnetventile und die kontinuierliche Erfassung der Konzentrationen mittels Vaisala®-Sonden. Dabei kamen Klimakammern des Typs BioLine und die Software Simpati der Firma Vötsch (Balingen) zum Einsatz. Die insgesamt sechs benutzten Kammern haben eine Grundfläche von 1.4 m^2 und eine Höhe von 1.6 m und sind mit 12 HQI-Lampen pro Kammer ausgestattet, so dass hohe Beleuchtungsintensitäten (PAR) von über 1000 µmol s^{-1} m^{-2} erreicht werden können. Die Schaltung der Lampen simulierte typische Tagesgänge, wobei die Tageslängenunterschiede zwischen dem 15. März und dem 15. August berücksichtigt wurden. Auch bei den Temperaturen wurden nicht nur die saisonalen Unterschiede, sondern auch Tagesgänge nachgebildet. Die Programmierung erfolgte wochenweise und simulierte eine Dauer von insgesamt 22 Wochen.

Als dritter Faktor erfolgte innerhalb der Kammern eine unterschiedliche Wassergabe. Während die eine Hälfte der Pflanzen eine aus den mittleren Niederschlägen berechnete und auf die Topffläche bezogene Wassergabe (NORM) erhielt, sollte in der anderen Variante (REDU) eine um 50% geringere Wassergabe verabreicht werden. Die als normal betrachtete Wassermenge wurde aus den Langzeitdaten des DWD für die Station Stuttgart-Flughafen berechnet. Für den Zeitraum von 15.3. bis 1.8. ergibt sich eine mittlere Niederschlagsmenge von 331 mm, was auf eine Topffläche von 240 cm^2 bezogen einer Wassergabe von 7.94 L pro Topf entspricht. In der normalen Temperaturvariante ließ sich diese Vorgabe realisieren, wohingegen in der um 4°C wärmeren Variante im ersten Jahr mehr gegossen wurde, da die Pflanzen einen deutlichen Entwicklungsvorsprung hatten (s. Kapitel 3.4 Tabelle 9).

Tabelle 5. Kombination der drei im Versuch variierten Faktoren CO_2-Konzentration, Wasserversorgung und Lufttemperatur zu acht Behandlungen (T1-T8). Um die Kombinationen im Text nicht weiter spezifizieren zu müssen, werden zumeist die Behandlungscodes genutzt.

Behandlungscodes	Wasserversorgung	CO_2-Konzentration (ppm)	Temperatur
T1	NORM	380	NORM
T2	NORM	550	NORM
T3	REDU	380	NORM
T4	REDU	550	NORM
T5	NORM	380	NORM+4°C
T6	NORM	550	NORM+4°C
T7	REDU	380	NORM+4°C
T8	REDU	550	NORM+4°C

Eine Zusammenfassung der sich aus den Faktorenkombinationen Temperatur, CO_2-Konzentration und Wasserbehandlung pro Pflanzenart ergebenden acht Behandlungen findet sich in Tab. 5. Die Wassergabe erfolgte je nach Behandlung alle zwei bis drei Tage, wobei jeweils das pro Topf verabreichte Volumen notiert wurde. Sämtliche Töpfe waren mit nummerierten Etiketten versehen, die neben einer Codierung der drei Behandlungen auch Farbcodes enthielten, so dass die Töpfe der beiden Wasserbehandlungen schnell in den Klimakammern aufgefunden werden konnten. Aufgrund ihres schnelleren Wachstums erhielten die bei um 4°C erhöhten Temperaturen angezogenen Pflanzen im ersten Jahr anfangs mehr Wasser als die langsamer wachsenden Pflanzen, jedoch näherten sich die absolut verabreichten Wassermengen gegen Ende des Versuchs immer weiter an. Aus den

verabreichten Wassermengen wurde nach der Endernte und der Bestimmung der Sprossgewichte die Wassernutzungseffizienz (WUE) berechnet, die angibt, wie viel Gramm Trockenmasse pro Liter Wasser gebildet wurden. Zusätzlich erfolgte eine wöchentliche Wägung der anfangs wassergesättigten Pflanzengefäße. Durch die Berücksichtigung der in der Woche verabreichten Wassermenge konnten so für jede Pflanze der Wasserverbrauch und der kumulative Wasserverbrauch (Evapotranspiration) bestimmt werden.

Der mit Jungpflanzen durchgeführte CO_2-Versuch 2012 dauerte vom 15.03. bis 01.08.2012 (138 Tage). Zwischenernten erfolgten am Tag 65 und am Tag 92 nach Versuchsbeginn. Neben der Sprossmasse wurde in diesem Jahr auch die Wurzelmasse bestimmt, um Spross:Wurzel-Verhältnisse berechnen zu können. Insgesamt wurden 192 Pflanzen (2 Arten * 3 Ernten * 8 Behandlungen * 4 Wiederholungen) benutzt.

Der mit einjährigen Pflanzen durchgeführte CO_2-Versuch 2013 dauerte vom 15.03. bis 15.08.2013 (152 Tage). Bei der Hälfte der Pflanzen erfolgte am Tag 96 nach Versuchsbeginn eine Zwischenernte des Sprossmaterials. Bei der Endernte am Tag 153 nach Versuchsbeginn wurden die ungeschnittenen Pflanzen geerntet und das Sprossmaterial der an Tag 96 zurückgeschnittenen Pflanzen ebenfalls geerntet, um die Effekte der acht Behandlungen auf den Wiederaufwuchs überprüfen zu können. Insgesamt wurden 96 Pflanzen (2 Arten * 2 Ernten (mit bzw. ohne Zwischenernte) * 8 Behandlungen * 3 Wiederholungen) in den Klimakammern gezogen. Zusätzlich wurden 24 Pflanzen unter Freilandbedingungen aber unter Regenausschluss kultiviert, um zu überprüfen, ob es Unterschiede im Wachstum zwischen den unter kontrollierten Bedingungen aufgewachsenen und unter Freilandbedingungen gezogenen Pflanzen gab. Sowohl die Freilandkontrollen als auch die in den Klimakammern gezogenen Pflanzen entstammten der im Jahre 2012 vorkultivierten Grundgesamtheit und wurden während des Versuchs nicht gedüngt.

2.2.3 Freilandversuche

Zur Betrachtung der Anbaueignung der beiden neuen Energiepflanzenarten in verschiedenen Klimaregionen Baden-Württembergs wurden Ende Mai/Anfang Juni 2013 an den vier Standorten der Forschungsstation für Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim Kleinparzellen mit den beiden Pflanzenarten angelegt (Tabelle 6). Dabei wurde eine Pflanzdichte von 4 Pflanzen pro Quadratmeter gewählt und es erfolgte keine Düngung. Die Freilandversuche sollten die unter definierten Klimabedingungen in Klimakammern durchgeführten Topfversuche ergänzen und sollen für längerfristige Anschlußuntersuchungen genutzt werden. Informationen zur Lage und zu den Bodeneigenschaften der Standorte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Die Abbildung 7 zeigt einen Überblick auf die an den vier Standorten eingerichteten Parzellen.

Tabelle 6. Bezeichnung, Lage und Bodeneigenschaften der vier Standorte, an denen im Frühjahr 2013 Parzellen mit Sida und Silphie angelegt wurden.

	Standort	Koordinaten Nord	Koordinaten Ost	Höhe ü. NN (m)	Boden-zahl	Anlage-datum	Jahr-tag	Flächengröße (m^2) Silphie	Sida
1	Eckartsweier	48°31'9.57"N	7°52'20.15"E	140	35 - 80	27.05.13	147	12	9
2	Ihinger Hof	48°44'43.68"N	8°54'26.40"E	500	30 - 73	05.06.13	156	12	8
3	Hohenheim	48°42'53.91"N	9°12'42.93"E	406	55 - 60	28.05.13	148	12	8
4	Oberer Lindenhof	48°28'19.57"N	9°18'13.87"E	701	40 - 70	06.06.13	157	12	7,5

Die für die Freilandversuche genutzten Jungpflanzen der Silphie wurden von der Firma Chrestensen (Herkunft 8) bezogen, die Sida-Pflanzen stammten aus eigener Stecklingsvermehrung von Mutterpflanzen der Herkunft Biomałwa (Herkunft 3). Die Fläche des Standortes Eckartsweier war zuvor Acker, die der anderen Standorte befanden sich vor der Pflanzung der Energiepflanzen unter Grünlandnutzung. Sämtliche Flächen wurden vor der Pflanzung umgebrochen und grob gelockert und wurden in der Saison 2013 nicht gedüngt. Nach der Etablierung der Pflanzen wurde zwei Mal in der Vegetationsperiode manuell gejätet, jedoch blieb vor allem am Standort Ihinger Hof ein erheblicher Unkrautdruck vorwiegend durch Kamille (*Matricaria dioica*) und Gänsedistel (*Sonchus arvensis*) bestehen.

Um das an den vier Standorten unterschiedliche Wachstum der Pflanzen während der Saison 2013 erfassen zu können, wurde am 4. Dezember 2013 eine Ernte der Sprossmasse durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt waren die Blätter der Sida bereits komplett abgefallen, während bei der Silphie noch fast alle Rosettenblätter grün waren. Um den Wiederaustrieb bei dieser Art im nächsten Frühjahr durch die Blatternte nicht zu gefährden, wurden an jedem der Standorte nur 12 Individuen der Silphie geerntet. Der Spross jeder Pflanze wurde in eine nummerierte Papiertüte überführt und anschließend bei 80°C für 48 h getrocknet. Danach wurde das Trockengewicht bestimmt und in Beziehung zu den Klimabedingungen der Vegetationsperiode 2013 gesetzt. Die Versuche wurden im Jahre 2014 fortgesetzt.

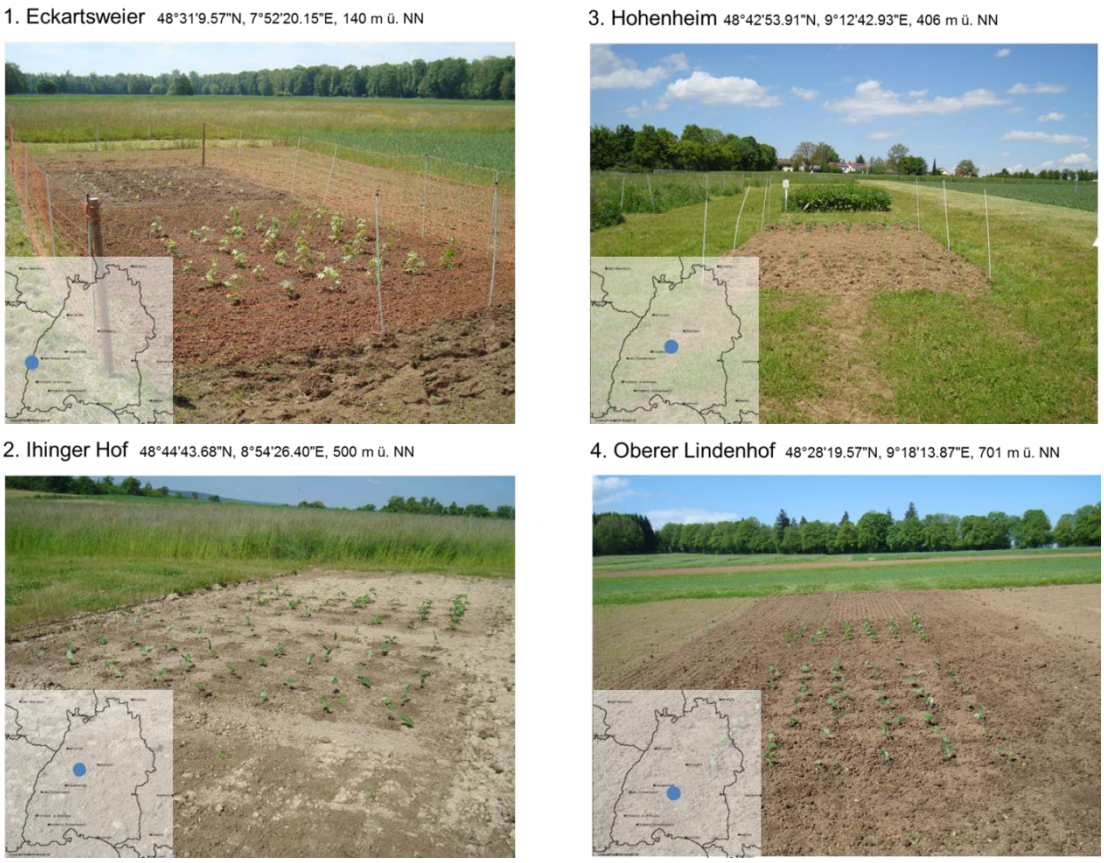

Abbildung 7. Überblick auf die vier Energiepflanzenparzellen mit Kartenausschnitt zur Lage der entsprechenden Standorte.

2.3 In den Versuchen erhobene Parameter

Herkunftsvergleich

Nach der Ermittlung der Keimraten und dem Pikieren von jeweils zehn aufgelaufenen Keimlingen pro Herkunft, erfolgten verschiedene nichtdestruktive Erhebungen. Insgesamt standen zehn Herkünfte bzw. 100 Individuen zu Verfügung, da bei der Sida die Herkunft Nr. 2 (Biomalwa, 2003) und bei der Silphie die Herkunft Nr. 12 (USDA, Kansas) nur unzureichend bzw. gar nicht gekeimt waren. Zum einen erfolgte die fortlaufende Betrachtung der Phänologie (BBCH Stadien nach Meier 1991) und des Längenwachstums, um Unterschiede in der Entwicklungsgeschwindigkeit der unterschiedlichen Herkünfte ansprechen zu können. Um Unterschiede in Blattchlorophyll und der Vitalität der Linien feststellen zu können, wurden alle 3 bis 4 Tage sogenannte SPAD-Messungen mit einem Minolta 501 Handmessgerät durchgeführt. Dabei wurde bei jeder der bis zum Ende des Versuchs verbleibenden Pflanzen (die fünf Wiederholungen Nr. 6 bis 10) ein im selben Entwicklungsstadium befindliches Blatt dauerhaft markiert und dessen Blattgrüne bestimmt.

Bei den insgesamt drei destruktiven Analysen wurden jeweils drei Wiederholungen geerntet; bei der 1. Ernte die Wiederholungen 1 bis 3, bei der 2. Ernte die Wiederholungen 4 bis 6 und bei der letzten Ernte die Wiederholungen 6 bis 9. Nach dem Zählen und Wiegen der frischen Blätter wurde deren Blattfläche mit einem LiCor (Lincoln, Nebraska, US) Blattflächenmessgerät bestimmt. Während bei der Silphie noch kein Stängel entwickelt war, war dieser bei der Sida bereits gut ausgeprägt. Von jeder Pflanze wurden Frisch- und nach einer 48 stündigen Trocknung bei 80°C Trockengewichte der Sprossfraktionen Blatt und Stängel bestimmt. Zusätzlich wurden die Wurzeln aus dem Substrat ausgewaschen und deren Trockengewicht bestimmt, um Aussagen über Spross-Wurzel-Verhältnisse machen zu können. Die nach unterschiedlicher Anzuchtdauer durchgeführten Ernten bzw. Wachstumsanalysen hatten zum Ziel, arten- bzw. herkunftsspezifische Unterschiede in der Entwicklung und der Biomasseakkumulation zu ermitteln. Neben der Charakterisierung der Entwicklung anhand von Tagen nach der Aussaat wurden auch Gradtagzahlen bzw. Temperatursummen über einer Temperaturschwelle von 5°C benutzt. Dies wurde im Gewächshaus durch die fortlaufende Registrierung der Temperaturen mit einem TinyTag (Gemini, UK) Datenlogger ermöglicht.

Im zweiten Teil des Herkunftsvergleichs ging es um die Überprüfung von längerfristigen Wachstumsunterschieden zwischen den Herkünften. Bei dem Herkunftsvergleich wurden in ca. zweiwöchigen Abständen der Längenzuwachs und der Beginn der Blüte ermittelt. Am Ende der Vegetationsperiode 2013 wurde die Sprossmasse der im Herkunftsvergleich betrachteten Pflanzen auf der Ebene einzelner Individuen erfasst. Zudem wurden einzelne Stängel der Pflanzen der Herkünfte 3 und 8 (Sida der Herkunft Biomałwa und Silphie der Herkunft Chrestensen) in ca. zweiwöchigen Abständen zwischen dem Ende des Sommers und dem Winter geerntet, um die Abtrocknung und Rückverlagerung von Mineralstoffen in den Wurzelstock betrachten zu können. Dazu wurden die Stängel in 20 cm lange Stücke zerlegt, frisch und trocken gewogen und anschließend wurde der Aschegehalt bestimmt. Die geerntete Sproßmasse wurde anschließend den Ergebnissen des Herkunftsvergleichs zugeschlagen. Die Versuche wurden im Jahr 2014 fortgesetzt, wobei die Entwicklung der Pflanzenlänge auf Individuenebene betrachtet wurde.

CO_2-Versuche 2012 und 2013

Wie bei den Untersuchungen zum Herkunftsvergleich wurden auch im Rahmen der CO_2-Versuche nichtdestruktive (Längenwachstum, SPAD, Blatttemperaturen) und destruktive

Analysen vorgenommen. Hierbei ging es aber nicht um herkunftsspezifische Unterschiede, sondern um die Reaktion der ausgewählten Linien von Sida und Silphie auf variable Klimabedingungen. Neben erhöhten Temperaturen und CO_2-Konzentrationen wurde als dritter Faktor eine unterschiedliche Wasserversorgung berücksichtigt. Die insgesamt acht Faktorenkombinationen werden in Kap. 2.2.2 eingehend erläutert und in Tabelle 5 in Kurzform zusammengefasst.

Neben der Erhebung Wachstumsbezogener Parameter erfolgte die Bestimmung der pflanzlichen Qualität. Dabei wurden im Jahre 2012 bei beiden Arten Messungen zu den C- und N- Konzentrationen der Sprossmasse vorgenommen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass zu unterschiedlichen Erntezeitpunkten und bei verschieden weit entwickelten Pflanzen unterschiedliche Qualitäten zu erwarten waren. Desweiteren erfolgten an dem getrockneten und gemahlenen Sprossmaterial, das an den jeweiligen Endernten anfiel, weitere Qualitätsanalysen, die Aussagen über die energetische Nutzung des Ernteguts zulassen. Bei beiden Pflanzenarten erfolgten Bestimmungen des Aschegehalts nach einer Vermuffelung bei 550°C. Der Aschegehalt wird als Prozentanteil der Trockenmasse ausgedrückt und der Restanteil repräsentiert den Gehalt an organischer Trockensubstanz (oTS), der zur energetischen Nutzung herangezogen werden kann.

Das getrocknete und gemahlene Material der als Brennmaterial genutzten Sida wurde zur Bestimmung der Energiegehalte mit einem Kalorimeter (IKA®-Werke GmbH & Co. KG Staufen) genutzt, während bei der Biogaspflanze Silphie die Gärqualität nach dem Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) ermittelt wurde, um Behandlungsunterschiede auf den spezifischen Methanertrag (SME) feststellen zu können. Dabei wurde kein Trocken- sondern Frischmaterial in dreifacher Wiederholung genutzt, um praxisrelevante Daten erhalten zu können. Allerdings wurden in 2012 nur die aus den acht Behandlungen gepoolten Proben genutzt, da die vier Einzelpflanzen nicht genügend Biomasse produziert hatten. Im Jahre 2013 wurde neben ungeschnittenen Pflanzen auch die nach einem Zwischenschnitt wiederaufgewachsene Biomasse (Wiederaufwuchs) in den HBT überführt. Die Analysen wurden durch die Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim übernommen. Eine ausführliche Beschreibung der nach VDI Richtlinie 4630 (VDI 2006) zertifizierten Methanertragsanalysen ist in Hübner et al. (2011) dargestellt.

Schließlich erfolgten am trockenen Sprossmaterial beider Pflanzenarten Bestimmungen der Gehalte an Rohprotein, Rohfett und Rohfaser nach der EU Verordnung zur Festlegung der Analysemethoden für die amtliche Untersuchung von Futtermitteln VO (EG) Nr. 152/2009 (EU 2009), um Effekte der unterschiedlichen Behandlungen auf die Pflanzenqualität feststellen zu können. Bei den Proben des Versuchs 2013 wurde zudem eine über die Weender Analyse bzw. Konventionsanalyse hinausgehende „erweiterte Analyse“ durchgeführt, in der die Detergentien-Methode eingesetzt wurde. Mittels dieser Methode ist eine bessere Ansprache der Stickstoff freien Extraktionsstoffe (NfE) bzw. der Kohlenhydratfraktion möglich, die die energetische Wertigkeit von pflanzlichen Materialien beschreibt. Die Neutral-Detergenzien Faser (NDF) beinhaltet Hemicellulosen, Zellulosen und Lignin, während die in Säure-Detergenzien lösliche Faser (ADF) aus Zellulosen und Lignin besteht. Die Ligninfraktion (ADL) schließlich wird nach der kompletten Hydrolisierung von Cellulose bei höheren Schwefelsäurekonzentration erhalten. Leider stand für die Bestimmung sämtlicher Parameter nicht bei allen Proben genügend Material zu Verfügung.

Zusätzliche Untersuchungen: Blatteigenschaften, SPAD, Chlorophyll, C:N und C-Isotopen, Nährstoffrückverlagerung

Im Rahmen einer auf die Blatteigenschaften der beiden Arten abzielenden Untersuchung wurden Blätter von im Freiland aufgewachsenen Pflanzen betrachtet. Für die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (s. Bilder im Anhang A des Ersten Zwischenberichts, Franzaring et al. 2013) wurden 1 cm x 0.5 cm große Stücke mittelalter Blätter der Herkünfte 3 (Sida von Biomałwa) und 8 (Silphie von Chrestensen) in Flüssigstickstoff gegeben und für 25 h gefriergetrocknet (K750X, Quorum). Nach der Bedampfung der Proben mit einer Gold-Palladium-Mischung (SCD, Blazers Union) wurden beide Blattseiten mit einem DSM 940 (Zeiss) Rasterelektronenmikroskop bei 5kV untersucht.

Beziehungen zwischen Isotopenverhältnissen, C:N-Verältnissen und Blatteigenschaften sowie zwischen SPAD-Werten und Chlorophyllgehalten wurden ebenfalls an im Freiland gewachsenen Pflanzen der Herkünfte 3 und 8 untersucht. Es wurden dabei unterschiedlich alte Blätter geerntet, deren Blattfläche und Trockenmasse ermittelt und fein vermahlen. Zur Bestimmung der Isotopenverhältnisse zwischen dem schweren ^{13}C und leichten ^{12}C sowie zur Ermittlung der C- und N-Konzentrationen in den Blattproben wurde die Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (IRMS) eingesetzt. Zum Einsatz kamen dabei ein Elementaranalyser (Euro EA3000, EuroVector, Milano) und ein Isotopenverhältnis-Massenspektrometer (Deltaplus XL, Thermo Finnigan, Bremen), die über eine open split Schnittstelle (ConFlow II, Thermo Finnigan, Bremen) miteinander gekoppelt wurden.

Zur Bestimmung der Zusammenhänge zwischen nicht-destruktiv gemessenen SPAD-Werten und destruktiv ermittelten Pigmentgehalten wurden 12 Blattscheiben (2.83 cm^2) von unterschiedlich grünen Blättern jeder Art mit einer Lederzange ausgestanzt. Nach der Ermittlung des SPAD-Werts jeder Probe mit einem Konica-Minolta SPAD 502 wurden die Blattscheiben in 3 ml Dimethylformamid gegeben und die Pigmente im Kühlen und Dunklen über Nacht extrahiert. Die anschließende photometrische Messung erfolgte bei den in Inskeep & Bloom (1985) angegebenen Wellenlängen und nach den dort beschriebenen Berechnungen. Die Methoden und Ergebnisse zur Untersuchung der Blatteigenschaften sind ausführlich in Franzaring et al. (2014) und verkürzt in Kapitel 3.5. dargestellt.

NIRS-Analysen

Nachfolgend werden die Ziele und Methoden der nahinfrarotspektrometrischen (NIRS) Untersuchungen kurz erläutert. Diese sollten die Analysen zur Wertigkeit des von den beiden Pflanzenarten gewonnenen Ernteguts ergänzen, bzw. als indirekte Methode zur Ableitung von qualitätsbestimmenden Parametern herangezogen werden.

Bei der NIRS wird die Intensität des von einer Probe im Spektralbereich von 780 bis 2500 nm reflektierten bzw. absorbierten Lichts gemessen. Die in diesem Wellenbereich emittierte elektromagnetische Strahlung führt zur Anregung von Molekülschwingungen (C-H, O-H, N-H und C=O), jedoch können dabei den Absorptionsspektren aufgrund von Oberton- und Kombinationsbanden in der komplexen Probenmatrix keine eindeutigen Moleküle zugeordnet werden. Erst die Auswertung der Spektren mittels multivariater statistischer Methoden (chemometrische Verfahren) ermöglicht eine Interpretation der Daten bzw. eine Kalibration von Referenzmessungen bestimmter wertgebender Parameter (z.B. Eiweiß- und Ölgehalte). Dazu wird ein Modell zwischen NIRS Spektren und den Referenzmessungen erstellt und dieses wird nachher benutzt, um aus gemessenen NIRS Spektren die unbekannten Werte vorherzusagen. Bislang liegen keine Veröffentlichungen zur Betrachtung von NIRS-Spektren der Energiepflanzen Sida und der Silphie vor. Lediglich

für Samen der meisten Kulturpflanzen sind praktikable NIRS-Kalibrationen verfügbar (z.B. VDLUFA Qualitätssicherung NIRS GmbH).

Die insgesamt 120 getrockneten und fein vermahlen Proben (3-5 g) der im Jahre 2013 geernteten Sprossmassen wurden in ring cups gefüllt, in einen Autosampler gegeben und mit einem NIRS-Gerät (Unity Scientific Brookfield, Conneticut) gemessen. Jede Probe wurde zweimal abgefüllt und gemessen, wobei in jedem Durchlauf 32 Scans erhoben wurden und die Spektren dann gemittelt wurden. Das Gerät hat einen Spektralbereich von 1200 nm - 2400 nm und erfasst die Absorption in 1 nm Schritten. Die zunächst 240 Spektren wurden in .jdx-Dateien umgewandelt und standen dann zur Auswertung bereit.

2.4 Statistische Analysen und Darstellung der Ergebnisse

Sämtliche statistischen Analysen (Regressionen, Varianzanalysen (ANOVA), multiple Mittelwertsvergleiche) und graphische Auswertungen wurden mit Excel® und dem open-source Statistikprogramm R durchgeführt. Bei letzterem kamen verschiedene Bibliotheken und Pakete zum Einsatz. Behandlungsunterschiede zwischen den acht Varianten wurden mit post-hoc Tests (Tukey HSD Test) überprüft. Die Ergebnisse dieser multiplen Mittelwertsvergleiche wurden mit der R-Bilbliothek ´multicomp´ dargestellt. Im vorliegenden Bericht werden vorwiegend Ergebnisse von mehrfaktoriellen ANOVAs präsentiert.

Bei der Analyse der NIR-Spektren wurde wie folgt vorgegangen. Vor der Auswertung wurden die beiden Spektren jeder Probe gemittelt und es wurden zu jeder Probe die nach der Ernte gemessenen biometrischen (z.B. Anteil der Blattfraktion am Spross) und wertgebenden Parameter (z.B. Protein- und Rohfasergehalt) der Referenzmessungen in die Datei übertragen. Die Auswertung erfolgte mittels einer partiellen kleinste Quadrate Regression (partial least squares Regression PLRS) mittels der R library ´PLS´ und der in Mevik & Wehrens (2007), Montes et al. (2012) und Mevik (2013) beschrieben Ansätze. Während die NIRS-Daten als Matrix mit 120 Zeilen und 1201 Spalten behandelt wurden, wurden die Referenzdaten als Faktoren betrachtet. Der Datensatz wurde anschließend auf die beiden Pflanzenarten aufgeteilt, da die Auswertungen artspezifisch vorgenommen werden müssen. Bei der Sida standen somit 57 und bei der Silphie 63 Datensätze für das Fitting (Vorhersage eines Referenzparameters mittels NIRS-Daten) zur Verfügung.

Zunächst wurde die Zahl der fitting-Komponenten, die zur Erstellung einer PLRS zwischen NIRS-Daten und dem Anteil der Blattmasse am Spross auf 10 festgelegt. Dies sollte ein sogenanntes „overfitting“ verhindern. Die Projektion der multikollinearen NIRS-Daten (aufgrund der overtones, s.o.) auf solche latente Strukturen führt zu einer Datenreduktion und es kann mittels einer Kreuzvalidierung (cross-validation, cv) ermittelt werden, wie viele Komponenten benutzt werden müssen, um eine gute Vorhersage der Referenzparameter zu erreichen. Im Beispiel des Fittings zwischen NIRS und dem Anteil der Blattmasse am Spross wurden bei der Sida nach dem Training mit bereits 2 Komponenten 89 % und bei der Silphie sogar 96% der Varianz erklärt. Bei der Nutzung von 10 Komponenten wurden mit dem Modell über 99% der Varianz erklärt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den einzelnen Arbeitspaketen beschrieben. Neben den Klimakammerexperimenten, die in den Jahren 2012 und 2013 durchgeführt wurden und zum Ziel hatten, Reaktionen der Sida und Silphie auf den sogenannten „CO_2-Düngeeffekt“ zu betrachten, wurden weitere Untersuchungen unter Freilandbedingungen durchgeführt. Dabei handelte es sich zum einen um einen dreijährigen Versuch zu Wachstumsunterschieden verschiedener Herkünfte beider Energiepflanzenarten, der in einem Versuchsgarten des Instituts für Landschafts- und Pflanzenökologie an der Universität Hohenheim durchgeführt wurde. In einem weiteren, im Mai 2013 etablierten Freilandversuch ging es um klimatisch bedingte Wachstumsunterschiede der beiden am häufigsten in Deutschland genutzten Herkünfte. Dazu wurden an vier in unterschiedlicher Höhenlage gelegenen Versuchsgütern der Forschungsstation für Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim Kleinparzellen mit den beiden Pflanzenarten angelegt. Desweiteren erfolgten vertiefte Untersuchungen zu den Blatteigenschaften der beiden Pflanzenarten, in denen Betrachtungen zur Ökophysiologie und Pigment- und Stickstoffkonzentrationen sowie rasterelektronenmikrospkopische Untersuchungen erfolgten. Diese Ergebnisse konnten bereits in einem englischsprachigen Fachjournal veröffentlicht werden (Franzaring et al. 2014) und werden in diesem Bericht nur in verkürzter Form dargestellt. Schließlich wurden Untersuchungen zur Rückverlagerung von Stoffen während des Einziehens im Herbst 2013 durchgeführt, um die Nährstoffökologie der beiden Pflanzenarten besser beschreiben zu können.

3.1 Klimabedingungen während der Versuche

Abbildung 8 fasst die Temperaturbedingungen während der über zwei Vegetationsperioden reichenden Klimakammer- und Freilandversuche zusammen. Dabei werden die im Klimakammerversuch vorgegebenen Temperaturbedingungen (rote Linie für die um 4°C erhöhte Variante) mit den Langzeitbedingungen (graue Linie im Hintergrund) und den 2012 und 2013 in Hohenheim unter Freilandbedingungen (grüne Linie) registrierten Temperaturen verglichen. Klimadaten zu den im Jahre 2014 fortgesetzten Freilandversuchen werden in den Kapiteln 3.2 und 3.3 gesondert präsentiert.

Insgesamt war der Sommer 2012 (grüne Linie) in Hohenheim ca. 2°C wärmer als das Langzeitmittel 1991-2005. Lediglich an acht Tagen war es kälter als im Langzeitmittel (s. Unterschreitungen der grauen Linie). Gleichzeitig war es an zehn Tagen wärmer als in der in den Klimakammern realisierten NORM+4°C-Variante. Der Herbst 2012 war in Hohenheim in etwa vergleichbar mit den Langzeittemperaturen, jedoch gab es Ende Oktober bereits einen starken Kälteeinbruch. Auch die Temperaturen der ersten Dezemberhälfte lagen unterhalb des Langzeitmittels, wohingegen es danach bis Mitte Januar 2013 wärmer war als im Langzeitmittel. Der Spätwinter (Ende Januar bis März 2013) war insgesamt kühler als das Langzeitmittel, jedoch wurden die Pflanzen in einem unbeheizten Gewächshaus (blaue Linie) gehalten, das ca. 3°C wärmer war als die Außenluft (grüne Linie).

Die Vegetationsperiode 2013 war insgesamt deutlich kühler als das Langzeitmittel. Der März und der Mai 2013 waren ca. 2°C kälter als das Langzeitmittel, wohingegen es Mitte April, Mitte Juni und im Juli 2013 noch viel Wärme gab. Dennoch war es in der Saison 2013 nur an sechs Tagen wärmer als in der in den Klimakammern realisierten NORM+4°C-Variante

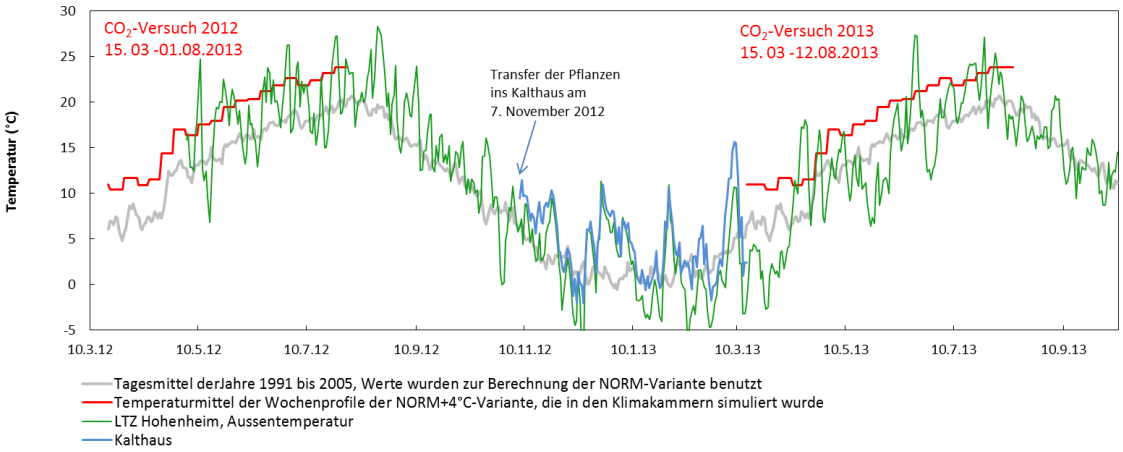

Abbildung 8. Tagesmitteltemperaturen während der Versuche in den Jahren 2012 und 2013. Sämtliche Pflanzen wurden am 20.03.2012 in den Klimakammern bei kontrollierten Bedingungen angezogen. Während die 2012 in den CO_2-Anreicherungsversuchen genutzten Pflanzen in den Klimakammern verblieben, wurden die erst im Jahre 2013 genutzten Pflanzen im Sommer 2012 unter Freilandbedingungen kultiviert, den Winter über in einem Kalthaus gelagert (blaue Linie) und am 15. März 2013 in die Klimakammern überführt. Die rote Linie stellt die in den Klimakammern realisierte NORM+4°C Variante dar; die graue Linie im Hintergrund entspricht dem Langzeittemperaturmittel am Flughafen Stuttgart (berechnet aus DWD Daten).

3.2 Ergebnisse des Herkunftsvergleichs

Die in vorliegender Studie betrachteten Samenherkünfte wurden im Jahr 2012 während der Etablierungsphase zunächst in Gewächshausexperimenten untersucht, um Unterschiede bezüglich Keimung, Blatteigenschaften, Wachstum und Qualität näher beurteilen zu können. Daran anschließende längerfristige Untersuchungen in den Vegetationsperioden 2013 und 2014 mit ins Freiland überführten Pflanzen sollten Aufschluss über die Biomassenpotentiale einzelner Herkünfte geben, die bei der Auswahl geeigneten Materials für die Anlage von Energiepflanzenkulturen berücksichtigt werden können.

3.2.1 Etablierungsphase

Keimungserfolg

Bei den Versuchen zeigte sich, dass beide Arten unregelmäßig und über einen recht langen Zeitraum aufliefen, was mit den geringen Temperaturen in den ersten Versuchswochen zu tun hatte. Die geringen Temperaturen hatten andererseits aber eine ausreichende Vernalisierung zur Folge, so dass zum Schluss bei vielen Herkünften zufrieden stellende Keimraten erreicht wurden. Die Ergebnisse der nach einer Versuchsdauer von 55 Tagen ausgezählten Zahl aufgelaufener Keimlinge sind in Abb. 9 dargestellt.

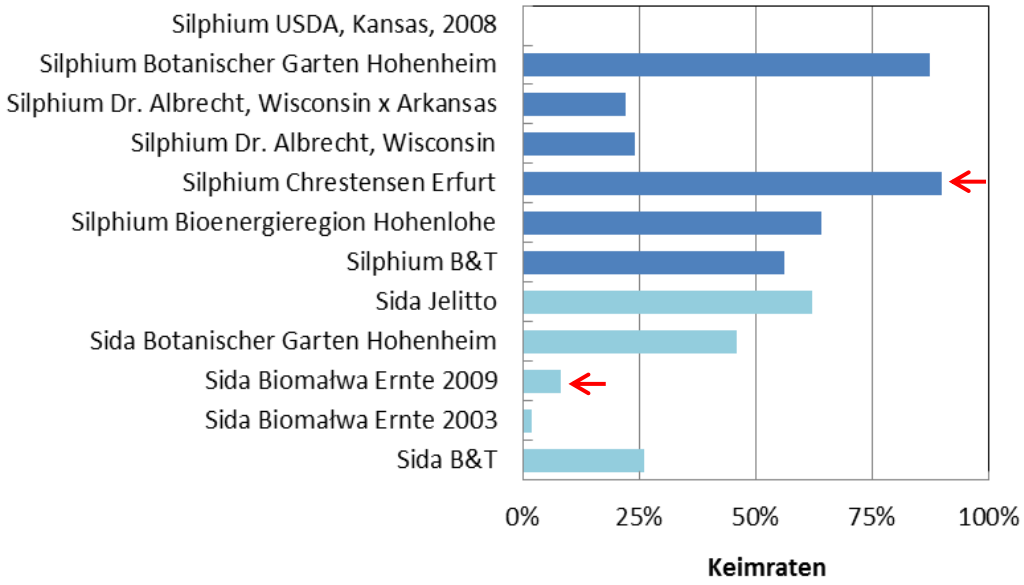

Abbildung 9. Keimraten der in den Herkunftsvergleichen benutzen Samenchargen der Silphie (oben, dunkelblau) und Sida (unten, hellblau). Dargestellt sind die Ergebnisse zu den nicht vorbehandelten Samen. Lediglich die Silphie-Herkunft Chrestensen waren hormonell vorbehandelt. Rote Pfeile markieren die in den CO_2-Versuchen benutzten Herkünfte.

Bei der **Silphie** hatten die hormonell vorbehandelten Samen der Herkunft Chrestensen mit 90% erwartungsgemäß die höchsten Keimraten, dicht gefolgt (88%) von Samen, die aus dem Botanischen Garten der Universität Hohenheim stammten. Gar nicht gekeimt waren die Samen der Herkunft USDA Kansas. Es kann bei der Silphie davon ausgegangen werden, dass eine Hormonbehandlung das Keimvermögen insgesamt leicht erhöhen kann. Bei einer über einen langen Zeitraum auflaufenden Art sind aber nicht so sehr die letztendlichen Keimraten, sondern die positiven Wirkungen der Hormonbehandlung auf die

Keimgeschwindigkeit entscheidend. Bei der Herkunft Chrestensen verlief die Keimung nämlich deutlich schneller als bei den anderen Herkünften und die Samen waren bereits nach einer Dauer von 28 Tagen zu über 50% gekeimt. Diese Ergebnisse sind praxisrelevant, da eine schnell und gleichmäßig auflaufende Saat mitunter deutlich weniger Unkrautdruck erleiden wird als eine langsam und lückig auflaufende. Interessanterweise wurde ein leichter positiver Zusammenhang (R^2=0.62) zwischen den mittleren Tausendkornmassen und den Keimraten festgestellt. Auch diese Ergebnisse haben praktische Bedeutung, da mit der Aussortierung der leichteren, weniger viablen Samen aus dem Saatgut eine deutlich erhöhte Auflaufrate möglich sein sollte.

Bei der **Sida**, die insgesamt geringere Keimraten hatte als die Silphie, wurden ebenfalls herkunftsbedingte Unterschiede im Keimerfolg festgestellt. Höchste Keimraten (62%) erreichte die Herkunft Jelitto, gefolgt von der Herkunft Botanischer Garten Hohenheim (46%). Die niedrigste Keimrate (2%) hatte die aus dem Erntejahr 2003 stammende Herkunft Biomałwa, während die im Jahr 2009 von dieser Herkunft geernteten Samen eine Keimrate von 8% aufwiesen. Trotz der geringen Keimraten dieser in den CO_2 Versuchen genutzten Herkunft, standen aber genügend Keimlinge bereit, da bei der Aussaat vorsichtshalber mehrere Saatschalen genutzt wurden. Die Ergebnisse zur Vorquellung der Samen in 60°C heißem Wasser sind hier nicht gesondert dargestellt und zeigten eine nur leichte Erhöhung der Keimraten von im Mittel 5%. Bei der Sida wurde kein Zusammenhang zwischen den Tausendkornmassen und der Keimfähigkeit von Samen festgestellt.

Wachstum

Von zehn Herkünften, nicht jedoch bei den Herkünften 2 und 12, standen nach den Keimversuchen genügend Keimlinge bereit, die in Töpfe umpikiert und weiterkultiviert wurden. Insgesamt drei Ernten wurden 78, 92 und 106 Tage nach der Aussaat durchgeführt, um das Wachstumsverhalten der Herkünfte eingehender betrachten zu können. Abb. 10 zeigt die Ergebnisse zu den Gesamttrockenmassen (Spross + Wurzel) an den drei Ernteterminen. Während sich die Trockenmassen bei den vier Sida-Herkünften bei der 3. Ernte kaum voneinander unterschieden und im Mittel mit 13.3 g TM deutlich über denen der Silphie (6.8 g TM) lagen, zeigten die Silphienherkünfte große Wuchsunterschiede.

Die in den CO_2-Versuchen genutzte Herkunft 8 hatte unter den Silphienherkünften mit 12.49 g TM die meiste Biomasse gebildet. Interessanterweise waren die zur Wachstumsanalyse herangezogenen Pflanzen wesentlich einheitlicher als die der anderen Herkünfte, was die geringeren Schwankungsbreiten in den Boxplots bestätigen. Die größere Homogenität geht vermutlich zum Teil auf die am Material der Fa. Chrestensen bereits erfolgten züchterischen Arbeiten zurück, wohingegen die anderen Herkünfte genetisch noch sehr variabel zu sein scheinen.

Die aus den USA stammenden Herkünfte 9 und 10 zeichneten sich durch einen signifikant langsameren Wuchs aus, wohingegen die Herkünfte B&T, Botanischer Garten Hohenheim und Bioenergieregion Hohenlohe ebenfalls recht wuchsfreudig und nicht signifikant weniger Trockenmasse als die der Herkunft Chrestensen bildeten. Bei der Herkunft aus Hohenlohe (Nr. 7) ist es möglich, dass sie aus demselben Material wie das der Herkunft 8 hervorgegangen ist. Interessanterweise stand die bis zur 3. Ernte von den sechs Silphien-Herkünften gebildete Trockenmasse in einer Beziehung zur TKM (R^2=0.54) und den Keimraten (R^2=0.73), was ebenfalls eine gewisse praktische Bedeutung haben dürfte. Auch bei der Sida wurde ein leicht positiver Zusammenhang zwischen den Keimraten und den Trockenmassen festgestellt (R^2= 0.59).

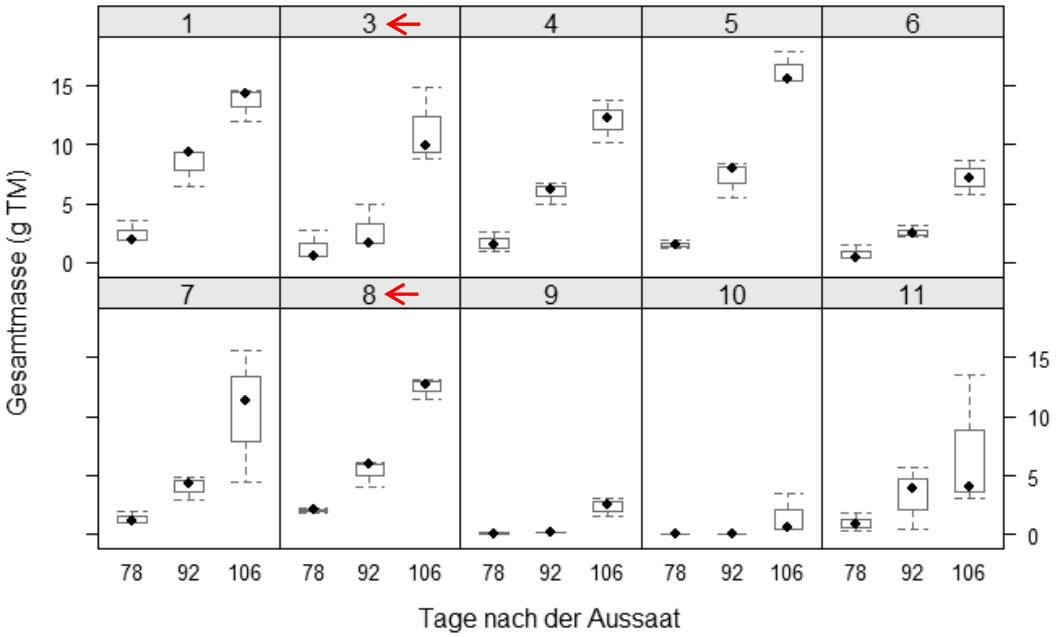

Abbildung 10. Trockenmassen (Spross plus Wurzel) von vier Herkünften der Sida (1 bis 5) und sechs Herkünften der Silphie (6 bis 11) als Boxplots der drei Wiederholungen zu drei Erntezeitpunkten. Rote Pfeile markieren die in den CO_2-Versuchen benutzten Herkünfte.

Tabelle 7 enthält Informationen zu den bei der dritten Ernte erhaltenen Wachstums- und Qualitätsparametern. Zwischen den vier Sida-Herkünften wurden bezüglich der untersuchten Parameter keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Lediglich bei den pro Pflanze gebildeten Blattzahlen gab es leichte Unterschiede. Generell hatten die Sida-Pflanzen im Mittel gegenüber den Silphien nicht nur eine höhere mittlere Biomasse, sondern sie waren auch größer und hatten bereits einen Stängel ausgebildet, wohingegen Silphien im ersten Jahr zumeist noch keinen Stängel bilden.

Auch bezüglich der Blätter wurden deutliche Unterschiede zwischen den beiden Arten festgestellt. Im Untersuchungszeitraum produzierte die Sida mehr als doppelt so viele Blätter wie die Silphie. Die Blätter waren im Mittel aber deutlich kleiner (92 gegenüber 107 cm^2) und hatten eine viel höhere spezifische Blattfläche (373 gegenüber 204 cm^2 pro g Trockenmasse). Die hohen spezifischen Blattflächen bei der Sida deuten auf sehr dünne Blätter hin, wohingegen die Silphie eher dickfleischige Blätter besitzt. Zur Morphologie ist ferner noch anzufügen, dass die Blätter der Sida samtartige Überzüge besitzen, die auf Sternhaare zurückgehen (vgl. Franzaring et al. 2014). Die Blätter der Silphie sind demgegenüber leicht behaart. Beide Eigenschaften dürften transpirationsmindernd wirken und zur Anpassung der Arten an wechselfeuchte Bedingungen beitragen. Morphologische Unterschiede der Herkünfte wurden nicht explizit untersucht, jedoch fiel bei der Herkunft Nr. 10 auf, dass sie einige panaschierte Blätter bildete.

Neben den signifikanten Unterschieden des Initialwachstums zwischen den sechs untersuchten Herkünften mit den höchsten Biomassen bei der Herkunft Chrestensen, hatte diese Herkunft auch die geringsten Aschegehalte. Bei den anderen Qualitätseigenschaften Rohprotein, Rohfett und Rohfaser wurden jedoch keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

Interessanterweise standen die mittleren Ascheghalte der Herkünfte in einer negativen Beziehung zu deren Biomassen (Abb. 11 links). Letzteres deutet auf die wachstumsbedingte Verdünnung von Mineralstoffen bei starkwüchisgen Pflanzen bzw. auf die höhere

Produktion organischer Trockensubstanz (oTS) hin. Die Herkunft Chrestensen hatte zum Zeitpunkt der dritten Ernte eine oTS von 87,14% bzw. einen Ascheghalt von 12,86 %. Auch bei den Sidapflanzen, welche einen geringeren mittleren Aschegehalt als die Silphien aufwiesen, stand der Gehalt an Mineralstoffen in einem negativen Verhältnis zur Sprossmasse.

Tabelle 7. Vergleich der nach einer Versuchsdauer von 106 Tagen nach der Aussaat (Ernte 3 der Etablierungsphase) erhobenen Wachstums- und Qualitätsparameter. Blaue Schrift markiert die in den CO_2-Versuchen benutzten Herkünfte.

	Sida hermaphrodita					*Silphium perfoliatum*						
Herkünfte	1	**3**	4	5	**Mittel**	6	7	**8**	9	10	11	**Mittel**
Höhe cm)	80,0 a	**65,7 a**	81,3 a	92,0 a	**79,8**	28,8 a	24,7 a	**33,7 a**	17,8 a	16,0 a	26,0 a	**24,5**
Blattzahl (n)	16,7 ab	**14,7 ab**	17,0 b	16,3 a	**16,2**	7,7 a	10,3 a	**9,0 a**	5,0 a	5,0 a	5,3 a	**7,1**
Blattfläche (cm^2 $Pflanze^{-1}$)	1378 a	**1445 a**	1404 a	1680 a	**1477**	849 ab	1182 ab	**1265 b**	354 ab	257 a	790 ab	**783**
Mittlere Blattfläche (cm^2 $Blatt^{-1}$)	82,7 a	**98,3 a**	82,6 a	103,3 a	**91,7**	121,6 a	112,3 a	**141,9 a**	70,8 a	51,4 a	142,5 a	**106,7**
Blattgewicht (g TM $Pflanze^{-1}$)	3,8 a	**3,7 a**	3,8 a	4,6 a	**4,0**	4,6 ab	6,7 ab	**8,1 a**	1,5 ab	1,1 b	4,4 ab	**4,4**
Spez. Blattfläche (cm^2 g^{-1})	365,1 a	**394,2 a**	366,5 a	367,4 a	**373,3**	187,4 ab	177,2 ab	**155,6 a**	238,8 bc	275,7 c	189,7 ab	**204,1**
Stängelgewicht (g TM $Pflanze^{-1}$)	4,9 a	**3,9 a**	4,3 a	6,3 a	**4,8**	0,0 a	0,0 a	**0,0 a**	0,0 a	0,0 a	0,0 a	**0,0**
Wurzelgewicht (g TM $Pflanze^{-1}$)	5,0 a	**3,6 a**	3,9 a	5,5 a	**4,5**	2,7 ab	3,7 ab	**4,4 b**	0,8 ab	0,4 a	2,5 ab	**2,4**
Gesamtgewicht (g TM $Pflanze^{-1}$)	13,6 a	**11,1 a**	12,1 a	16,3 a	**13,3**	7,2 ab	10,5 ab	**12,5 a**	2,4 b	1,5 b	6,9 ab	**6,8**
Sproß-Wurzel Verhältnis	1,7 a	**2,1 a**	2,1 a	2,0 a	**2,0**	1,7 b	1,8 b	**1,8 ab**	1,8 ab	5,5 ab	1,9 a	**2,4**
SPAD 105 DAS	20,4 a	**22,5 a**	24,0 a	20,4 a	**21,8**	27,0 a	29,7 a	**25,2 a**	27,4 a	27,3 a	32,8 a	**28,2**
Asche (% TM Spross)	11,0 a	**11,1 a**	11,0 a	11,0 a	**11,0**	15,8 ac	13,9 ab	**12,9 b**	17,4 c	17,7 c	14,6 ab	**15,4**
Protein (% TM Spross)	7,5 a	**8,0 a**	8,1 a	8,0 a	**7,9**	12,9 a	11,5 a	**10,2 a**	13,8 a	12,0 a	14,5 a	**12,5**
Rohfaser (% TM Spross)	22,7 a	**20,1 a**	24,7 a	24,3 a	**22,9**	12,6 a	11,5 a	**11,8 a**			11,7 a	**11,9**
Rohfett (% TM Spross)	2,5 a	**2,4 a**	2,4 a	2,1 a	**2,3**	3,5 a	7,4 a	**4,5 a**			3,6 a	**4,8**
C (% TM Spross)	39,6 a	**39,2 a**	39,9 a	40,2 a	**39,7**	38,5 a	39,2 ab	**39,7 ab**			40,5 b	**39,5**
N (% TM Spross)	1,2 a	**1,3 a**	1,4 a	1,2 a	**1,3**	2,2 ab	2,1 ab	**1,6 b**			2,8 a	**2,2**
CN (Spross)	32,8 a	**30,1 a**	30,2 a	32,7 a	**31,5**	17,5 a	19,0 ab	**24,9 b**			14,6 a	**19,0**

Während auch die Rohfett- und Rohproteingehalte deutlich unter denen der Silphie lagen, hatte die Sida doppelt so hohe Rohfasergehalte wie die Silphie. Die sehr unterschiedliche Zusammensetzung des Materials der beiden Pflanzenarten erklärt, warum sie einer

unterschiedlichen Nutzung als Bioenergieträger unterliegen. Dabei wirkt sich bei der Sida prinzipiell ihr geringer Gehalt an Mineralstoffen (Asche) und Stickstoff (Proteine) aus, da bei der Verbrennung der Biomasse wenig Reststoff verbleibt und vermutlich nur geringe Emissionen (z.B. NOx) bei der Verbrennung freigesetzt werden. Umgekehrt hatte die Silphie etwa nur halb so hohe CN-Verhältnisse wie die Sida, was ihre bessere Verdaulichkeit im Vergleich zur Sida bzw. deren vorrangige Nutzung zur Biogasherstellung erklärt.

Zwischen den erhobenen Parametern zum Wachstum und der Qualität der beiden Pflanzenarten konnten verschiedene Zusammenhänge beobachtet werden. Neben der oben erwähnten Wachstumsverdünnung mit immer geringeren Aschegehalten bei älteren bzw. größeren Pflanzen zeigte sich erwartungsgemäß ein deutlicher Zusammenhang zwischen den N- und den Rohproteinkonzentrationen (Abb. 11 Mitte). Über beide Arten berechnet, ergab sich bei einer N-Konzentration von 1 % eine Rohproteinkonzentration von 6.7 %. Ein weiterer Zusammenhang deutete sich zwischen den am Tag 105 an einem markierten Blatt gemessenen SPAD-Werten und der Stickstoffkonzentration des Sprosses an. Dies war unerwartet, da es sich bei dem gemessenen Blatt um ein älteres, nicht notwendigerweise für den Gesamtspross repräsentatives Blatt handelte. Die Ergebnisse deuten aber darauf hin, dass nichtinvasive Methoden ggf. geeignet sind, die Qualität des Ernteguts bzw. optimale Erntezeitpunkte zu bestimmen. Zu den Beziehjungen zwischen SÜAD und N- bzw. Chlorophyllkonzentrationen siehe auch Abb. 31.

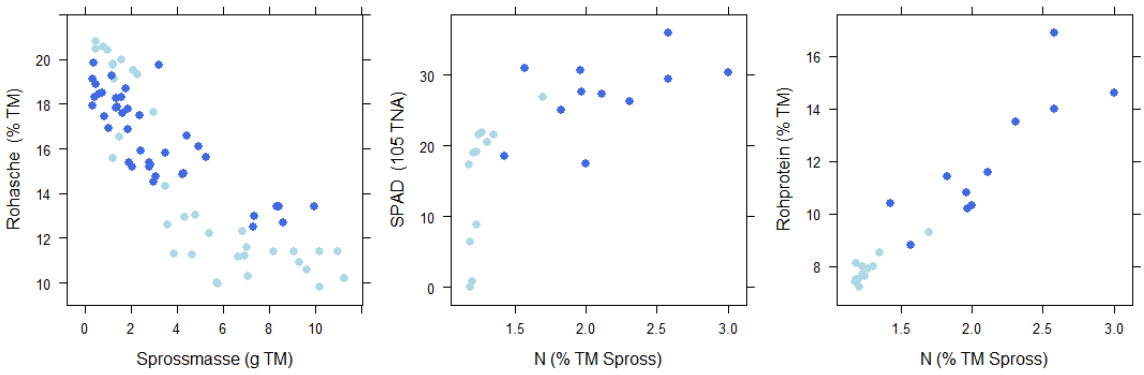

Abbildung 11. Wachstumsbedingte Verdünnung der Aschegehalte (links), Beziehung zwischen SPAD (105 Tage nach Aussaat) und Stickstoffkonzentrationen im Spross (Mitte) und Beziehung der Stickstoffkonzentrationen zu Rohprotein (rechts) in Silphie (●) und Sida (●). Der Vergleich der Sprossmassen mit den Aschegehalten beruht auf Ergebnissen aus den drei Ernten, während die anderen Vergleiche sich lediglich auf die Endernte beziehen.

3.2.2 Längerfristige Untersuchungen

Die im Jahre 2012 nach den Etablierungsversuchen in den Versuchsgarten des Instituts für Landschafts- und Pflanzenökologie überführten Jungpflanzen wurden in den Jahren 2013 (zweites Standjahr) und 2014 (drittes Standjahr) hinsichtlich Wachstum und Phänologie untersucht, um art- und sortenspezifische Unterschiede bei älteren, im Freiland gewachsenen Pflanzen über einen längeren Zeitraum beurteilen zu können. Es wurden dabei insgesamt zehn Herkünfte (vier Sida und sechs Silphie) betrachtet. Besonderes Augenmerk lag bei der Silphie auf der häufig genutzten deutschen Herkunft Chrestensen (Nr. 8) und bei der Sida auf der polnischen Herkunft Biomałwa (Nr. 3). Pflanzen dieser beiden Herkünfte wurden nicht nur im Herkunftsvergleich, sondern auch in dem Artvergleich der Blatteigenschaften (s. Kapitel 3.5) und der Stoffrückverlagerung (s. Kapitel 3.6) im Herbst 2013 näher betrachtet. Von jeder der Herkünfte wurden vier Pflanzen auf einen Quadratmeter gepflanzt, jedoch standen für die Herkünfte 9 und 10 nur je zwei Pflanzen zur Verfügung. Während der Kultur wurden keine Pflanzenschutzmaßnahmen ergriffen und es erfolgte keine Düngung. Neben der phänologischen Entwicklung wurde der Längenzuwachs regelmäßig erfasst.

Abbildung 12 gibt einen Eindruck zur unterschiedlichen Pflanzenentwicklung in den Jahren 2013 und 2014. Dargestellt ist dabei jeweils die Entwicklung der Pflanzen zu Mitte Juni. Abbildung 13 zeigt den Längenzuwachs in der Vegetationsperiode 2013 und Abbildung 14 einen Vergleich des Längenwachstums im kühlen Jahr 2013 und im warmen Jahr 2014 (zumindest bis Juli). Die Sida-Pflanzen erreichten im zweiten Anbaujahr Pflanzenlängen von im Mittel 2.3 m und waren damit ca. 60 cm höher als die Silphien. Im dritten Jahr waren die Silphiepflanzen im Mittel nur 40 cm kürzer als die Sidapflanzen. Die Ergebnisse zu signifikanten Unterschieden der Pflanzenlänge und weiterer Parameter zwischen den Herkünften einer Art sind in Tabelle 8 wiedergegeben.

Abbildung 12. Entwicklung der Pflanzenherkünfte im Institutsgarten in den Vegetationsperioden 2013 (zweites Standjahr) und 2014 (drittes Standjahr): a) 14.06.2013, b) 18.06.2014.

Auch die über die jeweiligen Herkünfte gemittelte Sprossmasse lag bei der Sida höher als bei der Silphie, was jedoch auf das schlechte Wachstum einzelner Silphienherkünfte zurückging. Insgesamt gab es zwischen den vier betrachteten Sida-Herkünften keine signifikanten Unterschiede bezüglich ihres Wachstums, was die Ergebnisse des Versuchs mit Jungpflanzen bestätigt (vgl. Tabelle 7). Auch bei den im späten Winter 2013 geernteten Stängeln des Vorjahres und deren energetische Wertigkeit wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Die Ergebnisse deuten daher darauf hin, dass unterschiedliche Sida-Herkünfte sich hinsichtlich ihres Wachstums und ihrer energetischen Wertigkeit nicht stark voneinander unterscheiden. Die hier eingesetzten vier „europäischen“ Herkünfte

unterschieden sich auch nur unwesentlich bezüglich Phänologie und der phänotypischen Ausprägung (z.B. Blattform und –stellung und Blütengröße), was darauf hindeuten könnte, dass sie von einem gemeinsamen amerikanischen Vorläufer abstammen, bzw. dass auch die amerikanischen Populationen dieser Art insgesamt wenig variabel sind.

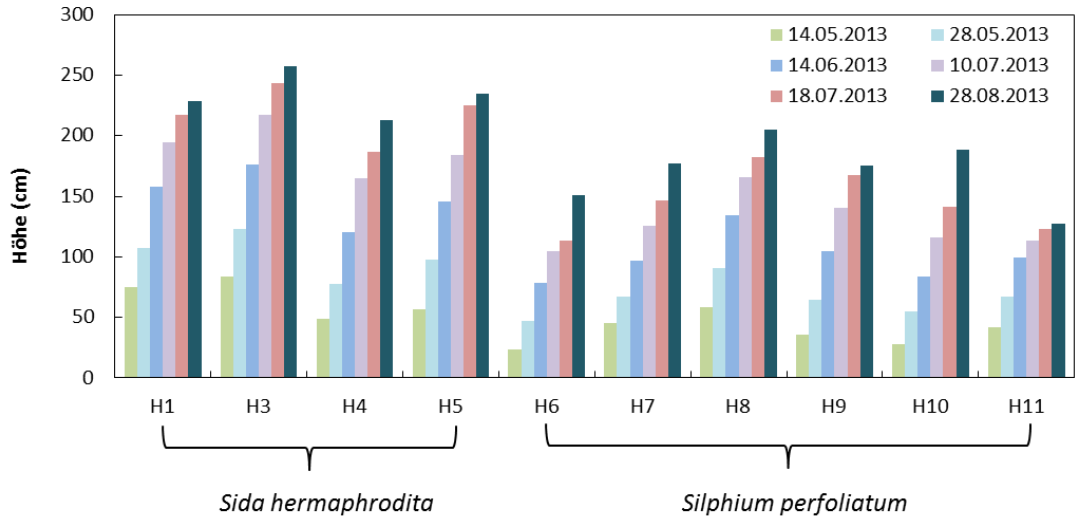

Abbildung 13. Längenzuwachs der unterschiedlichen Herkünfte (H) an sechs nachfolgenden Terminen. **Sida- Herkünfte: H1** B&T Seeds, Aigues-Vives (F), **H3** Biomałwa, Dr. Bury, Mr. Kozakowski (PL), **H4** Botanischer Garten Hohenheim (D), **H5** Jelitto Schwarmstedt (D). **Silphium-Herkünfte: H6** B&T Seeds, Aigues-Vives (F), **H7** Bioenergieregion Hohenlohe (D), **H8** Chrestensen Erfurt (D), **H9** Dr. K. Albrecht, University of Wisconsin (US), **H10** Dr. K. Albrecht, University of Wisconsin (US), **H11** Botanischer Garten Hohenheim (D).

Bei der Silphie waren aber zwischen den Herkünften Unterschiede in der Blattform und im Habitus offensichtlich und die Herkünfte 6 und 11 bildeten signifikant weniger Trockenmasse als die anderen Akzessionen (Tabelle 8). Eine Ursache für die geringere Biomasse der Herkunft 11 (Botanischer Garten Hohenheim) dürfte die beobachtete Blattwelke sein, die laut Stolzenburg (2012) auf den Befall mit Bakterien (*Pseudomonas syringae*) zurück geht. Interessanterweise war bei den Silphie-Herkünften eine negative Beziehung zwischen dem Blühbeginn und der in der Saison gebildeten Sprosstrockenmasse festzustellen (Daten nicht gezeigt). Zur Erreichung des Ziels, eine möglichst große Biomasse zu erhalten, sollten daher möglichst frühe Sorten eingesetzt bzw. selektiert werden. Allerdings kann bei sehr frühen Sorten nicht ausgeschlossen werden, dass sie nach dem Umschalten von der vegetativen auf die reproduktive Phase weniger Biomasse akkumulieren und die in unseren Breiten im Herbst noch lange anhaltende Wärme und gute Strahlungsbedingungen ausnutzen.

Die beiden in der Praxis häufig verwendeten Herkünfte (Sida von Biomałwa und Silphie von Chrestensen) erwiesen sich im längerfristigen Herkunftsvergleich als wüchsigste der überprüften Akzessionen, wobei die Silphie etwas mehr Trockenmasse pro Pflanze bildete als die Sida. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass die Sida zum Erntezeitpunkt bereits einen Großteil ihrer Blattmasse verloren hatte. Auf Hektarerträge hochgerechnet, ergibt sich bei der Sida (Herkunft 3) bei der hier eingesetzten Dichte von vier Pflanzen pro Quadratmeter im Jahr 2013 ein Trockenmasseertrag von 17.8 t pro ha und bei der Silphie (Herkunft 8) ein Trockenmasseertrag von 20.3 t pro ha. Diese Werte liegen im oberen Bereich der in Tabelle 1 angegebenen Werte für die in der landwirtschaftlichen Praxis erzielten Trockenmasse-Erträge. Bei der Silphie lagen die Erträge sogar über den von Biertümpfel et al. (2013) für Baden-Württemberg im 1. Erntejahr aus vier Betrieben berichteten mittleren Trockenmasseertrag von 16.52 t.

Tabelle 8. Vergleich der im zweiten (2013) und dritten Standjahr (2014) erhobenen Wachstumsparameter. Blau unterlegt sind die beiden Sorten, welche im Rahmen des Projekts vorrangig untersucht wurden. Bei der Sida sind auch die im ersten Winter erhobenen Qualitätsparameter angegeben. Die unter den Mittelwerten angegeben Buchstaben sind das Ergebnis eines multiplen Mittelwertsvergleichs, bei dem dieselben Buchstaben auf nicht signifikante Unterschiede zwischen den Herkünften hindeuten.

	Sida hermaphrodita					*Silphium perfoliatum*						
Herkünfte	1	3	4	5	**Mittel**	6	7	8	9	10	11	**Mittel**
Blattlose Sprossmasse im Winter nach der Etablierung (395 Tage nach der Aussaat)												
Stängelgewicht (g TM Pflanze^{-1})	22,7 a	31,4 a	29,9 a	30,1 a	**28,6**							
Rohasche (% TM)	4,09 a	4,5 a	5,37 a	4,48 a	**4,6**							
Engergiegehalt (MJ kg^{-1} TM)	16,0 a	15,8 a	15,8 a	16,2 a	**15,9**							
Pflanzenwachstum im zweiten Jahr (2013)												
Blühbeginn (Tag im Jahr)	199 a	198 a	203 a	201 a	**200**	203 ab	198 ab	193 b	204 ab	202 ab	207 a	**201**
Mittlere Pflanzenlänge (cm)	229 a	258 a	213 a	235 a	**233**	151 ab	178 ab	205 b	175 ab	188 ab	128 a	**171**
Sprossmasse (g TM Pflanze^{-1})	296 a	445 a	282 a	443 a	**366**	177 a	304 ab	506 b	174 ab	208 ab	125 a	**249**
Pflanzenwachstum im dritten Jahr (2014)												
Blühbeginn (Tag im Jahr)	173 a	172 a	181 a	172 a	**174**	192 c	181 a	182 ab	188 ac	192 bc	192 c	**188**
Mittlere Pflanzenlänge (cm)	258 a	266 a	208 a	246 a	**244**	208 b	215 b	255 b	205 b	215 b	141 a	**206**

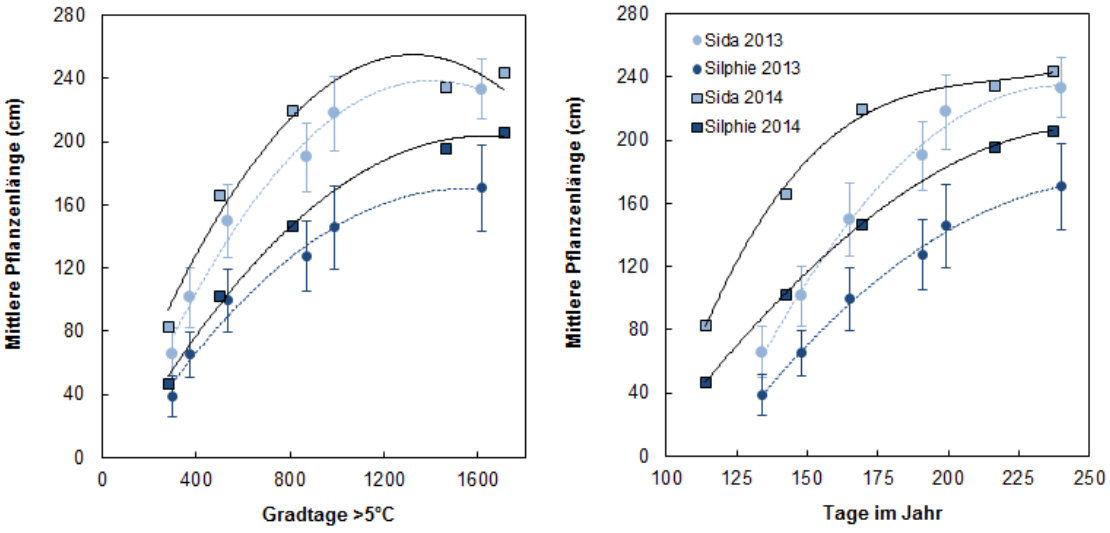

Abbildung 14. Längenzuwachs der Sida- und Silphie-Herkünfte in den Jahren 2013 und 2014 (siehe Signaturen für Art und Jahr in der Legende). In der Abbildung links ist der Längenzuwachs in Beziehung zur Temperatursumme (Gradtage zur Basis von 5°C) gesetzt, während in der Abbildung rechts die Längenbonitierung auf die Tagzahlen (1=1. Januar) bezogen wurde.

3.3 Ergebnisse des Freilandversuchs

Die gepflanzten Individuen gingen an allen Standorten an und konnten sich nachfolgend mehr oder weniger gut entwickeln. Am 27. Juli 2013 erfolgte eine einmalige Bonitierung der Zahl der Blätter der Silphienpflanzen, während bei jeder der Sida-Pflanzen die Höhe und die Stängelzahl erfasst wurde. In der Saison 2014 erfolgten mehrmalige Bonitierungen der Pflanzenhöhe aller Pflanzen und eine Ernte von sechs Pflanzen jedes Bestands zur Ermittlung der Sprossmassen. Abbildung 15 zeigt Fotos der Pflanzenentwicklung im zweiten Standjahr (Anfang September 2014).

Abbildung 15. Pflanzenentwicklung Anfang September 2014. Oben: Silphie am Ihinger Hof (links) und am Oberen Lindenhof (rechts). Unten: Sida und Silphie in Eckartsweier (links) und Silphie in Hohenheim (rechts).

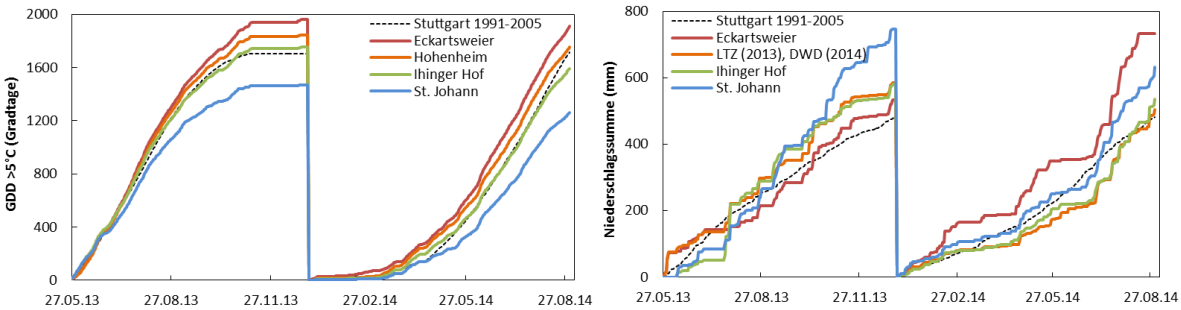

Abbildung 16. Entwicklung der bis zur Ernte der Pflanzen in den Jahren 2013 und 2014 aufgelaufenen Temperatursummen (links, Gradtagzahlen über einer Schwelle von 5°C, growing degree days, GDD) und der kumulativen Niederschläge (rechts) an den vier Freilandstandorten. Die Daten entstammen dem Messnetz des Landwirtschaftlichen Technologiezentrums (LTZ Augustenberg) Baden-Württemberg (http://www.wetter-bw.de/). Die gestrichelte Linie im Hintergrund stellt die Temperatur- und Niederschlagssummen der DWD-Station Stuttgart-Flughafen als Mittel der Jahre 1991-2005 dar.

Abbildung 16 zeigt die Entwicklung der Temperatur- und Niederschlagssummen in den Jahren 2013 und 2014 an den vier Standorten. Erwartungsgemäß gab es in beiden Jahren einen deutlichen Temperaturgradienten von der im Rheintal gelegenen Station Eckartsweier zu dem auf der Schwäbischen Alb gelegenen Oberen Lindenhof. Trotz der anfangs kühlen Witterung im Frühjahr 2013 war der Sommer etwas wärmer und feuchter als das Langzeitmittel 1991-2005. Im Jahr 2014 war es an dem im Rheintal gelegenen Standort deutlich feuchter als an den anderen Standorten, was auf einen dort wesentlich niederschlagsreicheren Frühling zurückging. Im Juli und im zu kühlen August 2014 gab es an allen Standorten wesentlich mehr Niederschlag als im Langzeitmittel. Dennoch konnte die Sommerwitterung auch in diesem Jahr zumindest bis Mitte Juli an allen Standorten als recht trocken bezeichnet werden.

Die Sprosstrockenmassen zeigten in beiden Jahren keine Beziehung zur Höhenlage der vier Standorte. Dies geht vermutlich auf die ungünstigen Standorteigenschaften bzw. auf den sehr kompakten Boden auf der Parzelle Ihinger Hof zurück. Bei Ausschluss dieses Standorts war bei der Sida aber ein deutlicher Höhengradient festzustellen. Während die Sida im Rheintal am wüchsigsten war, war die Silphie in Hohenheim am produktivsten (Abb. 17 links). Rechnet man die auf dem „Goldenen Acker“ in Hohenheim ermittelten Sprossmassen unter Einbeziehung der Dichte von 4 Pflanzen pro Quadratmeter auf Hektarerträge hoch, ergibt sich ein Ertrag von 17.5 t Trockenmasse. Dieser Wert charakterisiert hohe Erträge, wie man sie nur selten in der Praxis erhält.

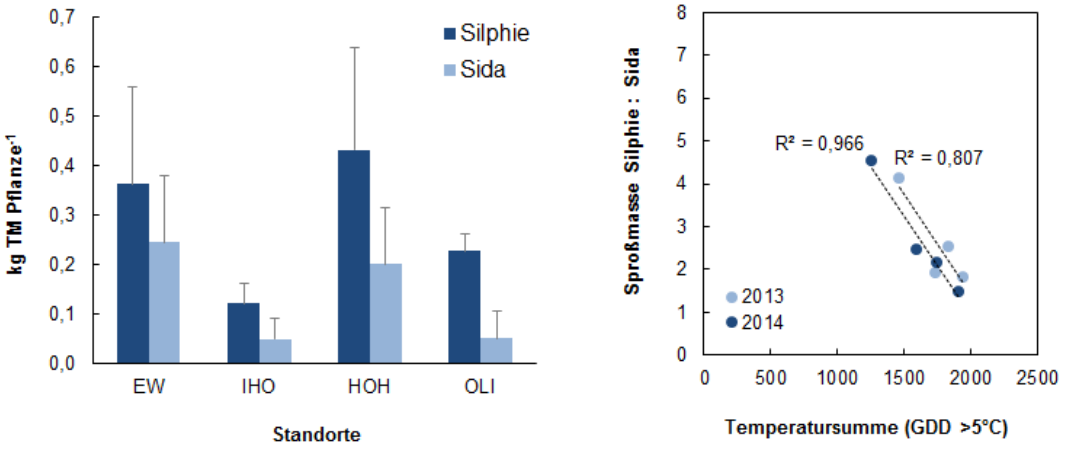

Abbildung 17. Die 2014 an den vier Standorten (Eckartsweier, Ihinger Hof, Hohenheim und Oberer Lindenhof) produzierte mittlere Sprossmasse (links) und Sprossmasse der Silphie relativ zu der der Sida in Beziehung zur Temperatursumme an den vier Standorten (rechts).

Im Vergleich zwischen dem in niedrigster und höchster Höhe gelegenen Standorten (Eckartsweier und Oberer Lindenhof) war das Wachstum der Sida auf der Alb gegenüber dem Rheintal um 80% und bei der Silphie lediglich um 40% verringert. Im Mittel produzierte die Silphie am wärmsten Standort Eckartsweier 1.5 mal mehr Sprossmasse als die Sida, während dieser Vorsprung am höchstgelegenen bzw. kühlsten Standort auf der Alb auf das 4.5-fache anstieg (Abb. 17 rechts). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Leistung der wärmebedürftigeren Sida in höheren bzw. kühleren Lagen gegenüber der Silphie stark ins Hintertreffen gerät.

3.4 Ergebnisse der CO_2-Versuche

Die Klimakammerversuche, insbesondere die CO_2-Dosierung und die Temperaturerhöhung, verliefen in beiden Jahren zur vollsten Zufriedenheit. Während im Versuch 2012 mit aus Samen gezogenen Pflanzen gearbeitet wurde, wurden im zweiten Versuchsjahr einjährige Pflanzen verwendet, um mögliche Reaktionsunterschiede in der Juvenilphase gegenüber etablierten Pflanzen betrachten zu können. Die im Sommer 2012 in Töpfen vorgezogenen und am dem 7. November 2012 in einem Kalthaus überwinterten Pflanzen wurden am 15. März 2013 in die Klimakammern des Instituts für Landschafts- und Pflanzenökologie überführt, wo sie bis Mitte August 2013 verblieben. Die Klimabedingungen, denen die Pflanzen während der Versuche ausgesetzt waren, sind in Abb. 8 dargestellt. In den Klimakammern wurden zwei Temperatur- und CO_2-Behandlungen realisiert, wobei in jeder Kammer die Hälfte der Pflanzen weniger Wasser erhielt. Die Kriterien für die Auswahl der insgesamt acht Behandlungen sind in Kapitel 2.2.2 ausführlich beschrieben.

Im Gegensatz zum 2012 durchgeführten Experiment, in dem bei den höheren Temperaturen (NORM+4°C) die Pflanzenentwicklung schneller verlief und anfangs mehr Wasser verabreicht wurde, wurden die Wassergaben im Versuch mit einjährigen Pflanzen nicht den unterschiedlichen Temperaturvarianten angepasst. Damit wurden die in der NORM+4-Variante auflaufenden Pflanzen im Jahre 2013 von Anfang an gezwungen, mit weniger Wasser auszukommen als die Pflanzen der NORM-Variante, welche später aufliefen. Zusätzlich wurde in jeder Temperaturvariante eine trockene Behandlung realisiert, bei der die Pflanzen ca. 50% weniger Wasser erhalten sollten als die der an den Langzeitniederschlägen orientierten Variante. Tabelle 9 fasst die in den Versuchen von 2012 und 2013 realisierten Wassergaben und die Abweichungen von den mittleren Niederschlagsmengen zusammen.

Tabelle 9. In den mit Jungpflanzen (2012) und einjährigen Pflanzen (2013) durchgeführten Versuchen verabreichte Wassermengen. Die in der Behandlung T1 (normale Temperaturen und normale Wasserversorgung) zugrunde gelegte Wasserversorgung orientierte sich an den an der DWD-Station Stuttgart-Flughafen zwischen 1991-2005 gemessenen mittleren Niederschlagsmengen. Bezogen auf die Dauer des Versuchs im Jahre 2012 (vom 15.3.-1.8. 331 mm) und der eingesetzten 4 L Töpfe (A=240 cm^2) ergab sich eine Sollmenge von 7.64 L pro Topf. Bezogen auf die Dauer des Versuchs im Jahre 2013 (vom 15.3.-15.8. 359 mm) und der eingesetzten 7 L Töpfe (A=346 cm^2) ergab sich eine Sollmenge von 12.4 L pro Topf. In der Spalte „% Soll" sind die verabreichten Mengen ins Verhältnis zu diesen Langzeitwerten gesetzt. Während sich die Behandlungen T1 bis T8 auf Klimakammerversuche beziehen, bezeichnen T9 und T10 Freilandvarianten, die lediglich im Jahre 2013 genutzt wurden. Die Saison 2013 (15.03.- bis 15.08) war mit mittleren Temperaturen von 13.8°C ein halbes Grad kühler als das Langzeitmittel (14.3°C).

Behandlung (Code)	Wasser-versorgung	CO_2-Konzen-tration (ppm)	Temperatur	Wassergaben in den Versuchen 2012 L $Topf^{-1}$	% Soll	2013 L $Topf^{-1}$	% Soll
T1	NORM	380	NORM	8.1	+2.0	12.5	+0.8
T2	NORM	550	NORM	8.1	+2.0	12.5	+0.8
T3	REDU	380	NORM	4.2	-47.1	6.8	-45.6
T4	REDU	550	NORM	4.2	-47.1	6.8	-45.6
T5	NORM	380	NORM+4°C	12.0	+51.1	12.5	+0.8
T6	NORM	550	NORM+4°C	12.0	+51.1	12.5	+0.8
T7	REDU	380	NORM+4°C	6.1	-23.2	6.8	-45.6
T8	REDU	550	NORM+4°C	6.1	-23.2	6.8	-45.6
Freiland (Kontrolle)							
T9	NORM	390	NORM-0.5°C			15.8	+27.4
T10	REDU	390	NORM-0.5°C			7.1	-42.7

Um die Wachstumsreaktionen der unter kontrollierten Bedingungen in Klimakammern angezogenen Pflanzen (Behandlungen T1 bis T8) mit im Freiland gewachsenen Pflanzen vergleichen zu können, wurden im Jahre 2013 zusätzliche Topfpflanzen unter Freiluftbedingungen kultiviert (Behandlungen T9 und T10). Die Pflanzen waren Restpflanzen der im Vorjahr vorkultivierten Pflanzen und waren bis zu Beginn des Versuchs am 15.03.2013 unter denselben Bedingungen wie die in den Klimakammerversuchen genutzten Individuen aufgewachsen. Die Pflanzen wurden unter ein transparentes Dach gestellt und manuell bewässert. Da beide Pflanzenarten unter Freilandbedingungen aber wüchsiger als in den Klimakammern waren, erhielten die Pflanzen der NORM-Wasserbehandlung 27.4% mehr Wasser als die Langzeitniederschläge. In der trockenen REDU-Variante wurden insgesamt 42.7% weniger Wasser verabreicht.

Tabellarische Zusammenfassungen der Ergebnisse der in 2012 und 2013 durchgeführten Versuche finden sich in den Tabellen 10 bis 14. Dabei werden für die unterschiedlichen Parameter Mittelwerte der acht Behandlungen präsentiert und die Ergebnisse einer Signifikanzprüfung in kompakter Weise wiedergegeben. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse nach Jahren getrennt vorgestellt und diskutiert.

3.4.1 Längenwachstum und Seneszenzverlauf

Abbildung 18 gibt einen ersten Eindruck über das unterschiedliche Wachstum der beiden Arten in den verschiedenen Behandlungen und Versuchsjahren. Die unter Trockenstress aufgetretenen Wachstumseinbußen waren in beiden Jahren sowohl bei der Silphie als auch bei der Sida gut zu erkennen. Neben einer geringeren Pflanzenlänge und einem verringerten Blütenansatz wurde in den trockenen Behandlungen eine verstärkte Seneszenz beobachtet.

Die Silphie verblieb im ersten Versuchsjahr im Rosettenstadium, wies noch keine Tendenz zum Schossen auf und bildete daher noch keine Blüten. Aufgrund des im ersten Jahr noch nicht zu beobachtenden Längenwachstums, werden Längenentwicklung und die über die Zeit an einem markierten Blatt gemessene Blattgrüne nur des zweiten Versuchsjahres präsentiert. Während bei der Silphie die Blattgrüne bzw. der Chlorophyllgehalt über den betrachteten Zeitraum kontinuierlich abnahm, stiegen bei der Sida die Pigmentgehalte in den ersten vier Wochen zunächst an und sanken danach kontinuierlich. Dies war auch im ersten Versuchsjahr bei den Jungpflanzen zu beobachten. Die dunkelgrünen Blätter der Silphie hatten erwartungsgemäß deutlich höhere SPAD-Werte als die hellgrünen Blätter der Sida. Nähere Betrachtungen zur Beziehung zwischen SPAD-Messungen und Chlorophyll-gehalten sowie Blatteigenschaften der beiden Pflanzenarten werden in Kapitel 3.5 vorgenommen.

Multiple Vergleiche zum Auffinden von signifikanten Unterschieden zwischen den Behandlungen wurden mit der R-Bibliothek „multicomp“ durchgeführt und basierten bei dem Experiment 2013 auf dem Vergleich aller zehn Behandlungen. Die Einbeziehung der unter Freiluftbedingungen kultivierten Pflanzen sollte zunächst Aufschluss darüber geben, ob es in den Versuchen starke Kammereffekte gegeben hatte, die sich auf der Ebene von Wachstum und Blattpigment niederschlugen. Bei den SPAD-Werten wurden die Daten von Tag 81 und bei dem Längenvergleich die Daten der Endernte betrachtet. Bei der Sida unterschieden sich nur die SPAD-Werte der Behandlungen 4 und 5 signifikant voneinander. Die Außenpflanzen unterschieden sich hinsichtlich der Pigmentierung aber nicht von den in den Kammern gezogenen Pflanzen. Auch hinsichtlich der Pflanzenlänge waren die unter

Freilandbedingungen aufgewachsenen Individuen nicht signifikant verschieden von den in den Kammern gezogenen.

Bei der Silphie gab es in dem multiplen Vergleich zwischen den Behandlungen bezüglich der SPAD-Werte ebenfalls keinen Hinweis darauf, dass außen und in den Kammern gezogenen Pflanzen sich voneinander unterschieden. Lediglich die gut bewässerten, im Außenbereich gewachsenen Pflanzen waren signifikant länger als in allen anderen Behandlungen (vgl. Pflanzen in der 2. Reihe von rechts in Abb. 18 bzw. Abb. 19 oben).

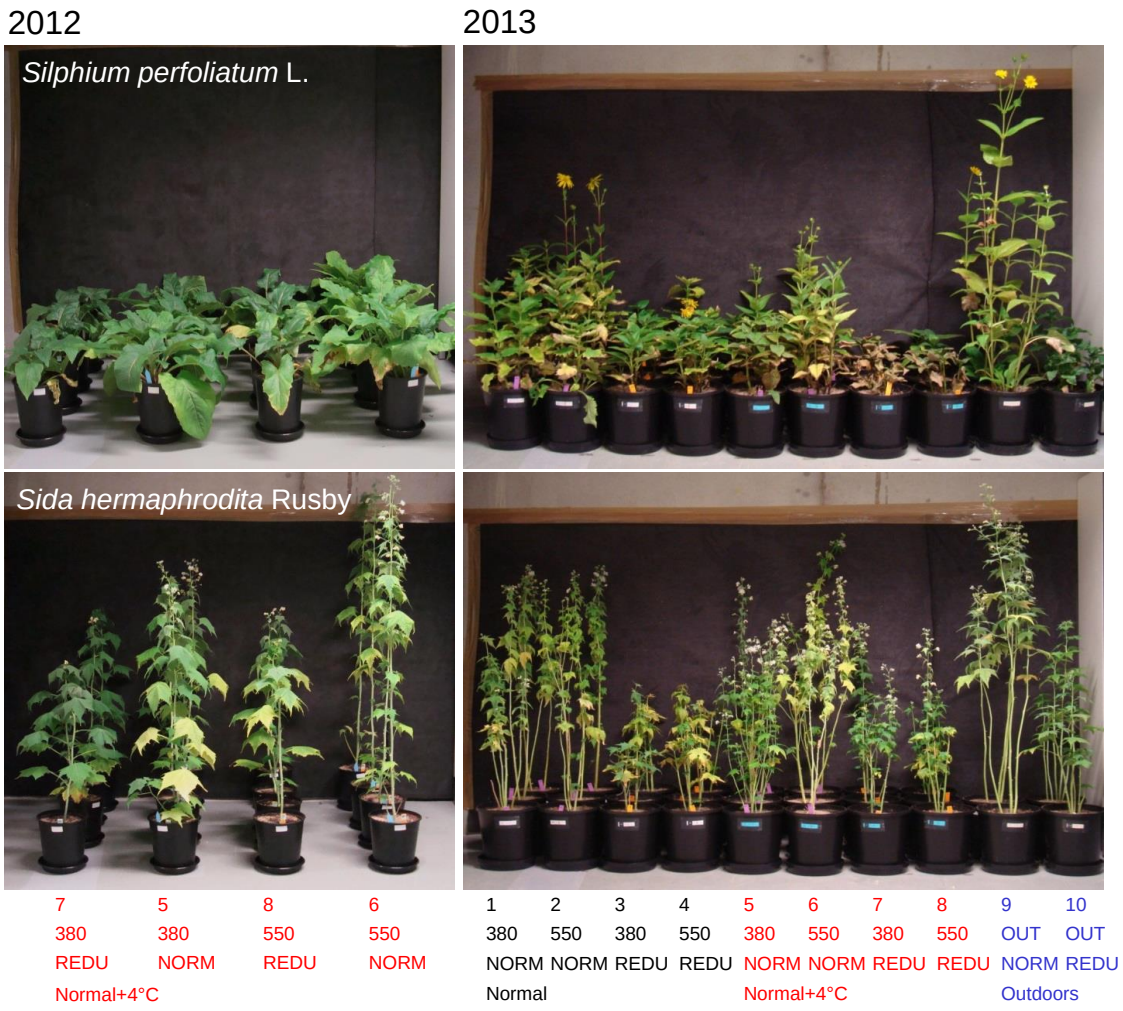

Abbildung 18. Aussehen der Pflanzen zu Ende der Versuche 2012 (links) und 2013 (rechts). Fotos aus dem Versuch 2012 zeigen nur die vier unter erhöhten Temperaturen gezogenen Pflanzen (Behandlungen T5 bis T8). Im zweiten Versuchsjahr wurden zusätzliche Pflanzen unter Freilandbedingunegn gezogen (Behandlungen 9 und 10, blaue Schrift).

Nach den multiplen Mittelwertsvergleichen wurden für jede Art dreifaktorielle ANOVAs gerechnet, wobei die Außenkontrollen (Behandlungen 9 und 10) nicht berücksichtigt wurden. Bei der Sida ergab sich bei den SPAD-Werten lediglich ein hochsignifikanter Temperatur- und ein leichter (p=0.07) Bewässerungseffekt. Unter erhöhten Temperaturen wurden höhere und unter Trockenstress geringere mittlere SPAD-Werte gemessen. Die Länge der Pflanzen war aber nur in den trockenen Behandlungen signifikant verringert und wurde weder durch erhöhte Temperaturen noch durch erhöhte CO_2-Konzentrationen beeinflusst. Bei der Silphie wurden die SPAD-Werte nur durch die Temperatur signifikant beeinflusst. Auch hier hatten die Pflanzen, welche unter erhöhten Temperaturen gezogen

wurden, höhere Pigmentkonzentrationen. Demgegenüber zeigte die ANOVA, dass die mittleren Pflanzenlängen neben den erhöhten Temperaturen auch durch den Trockenstress reduziert wurden. Im Gegensatz zur Sida wurden aber unter erhöhtem CO_2 signifikant längere Pflanzen gebildet (Tabelle 13).

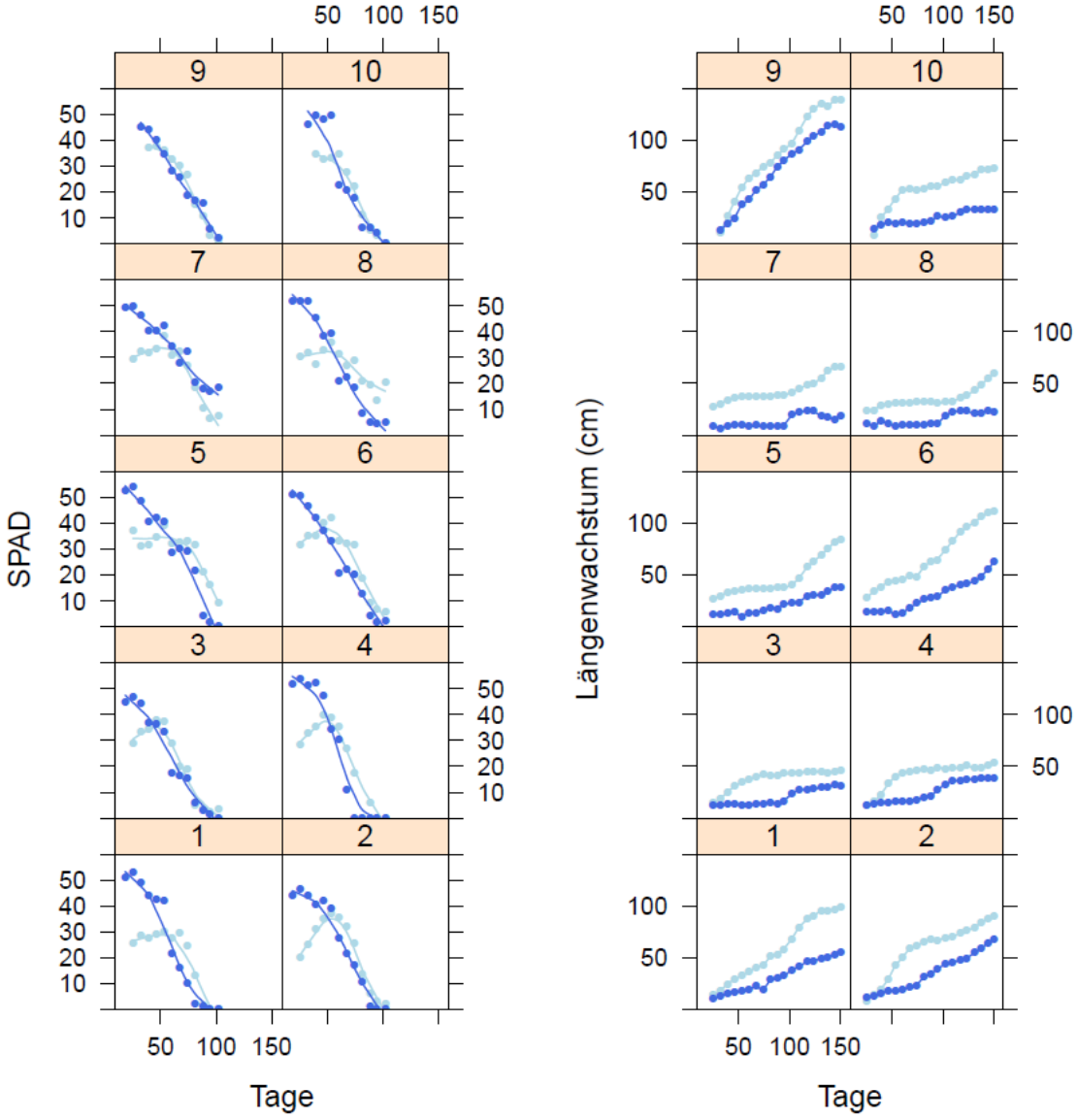

Abbildung 19. Entwicklung der mittleren Blattgrüne (SPAD-Werte links) und der Pflanzenlänge (rechts) bei *Sida hermaphrodita* (○) und *Silphium perfoliatum* (●) im Jahre 2013 aufgegliedert nach den acht Kammerbehandlungen und den beiden Freiluftkontrollen (Behandlungen 9 und 10).

Weitere Betrachtungen zum unterschiedlichen Ausmaß der Seneszenz wurden durch das regelmäßige Absammeln und Wiegen trockener Blätter möglich. Am Versuchsende wurde dieses zuvor seneszent gewordene Blattmaterial bei der Berechnung der Sprossmassen einbezogen (vgl. Kapitel 3.4.2), so dass Aussagen darüber getroffen werden konnten, wie viel der geernteten Gesamtsprossmasse der seneszenten Fraktion bzw. den zuvor abgeworfenen Blättern zuzuordnen war.

3.4.2 Biomassen und Allokationsmuster

Abbildung 20 gibt einen ersten Überblick über die zu insgesamt sechs Ernteterminen in den Jahren 2012 und 2013 geernteten Sprosstrockenmassen. Bei diesen ist die zuvor abgefallene seneszente Biomasse nicht enthalten, so dass die Materialmenge derjenigen entspricht die in der Praxis für bioenergetische Zwecke nutzbar wäre.

Während in 2012 drei Ernten erfolgten, gab es im zweiten Jahr nur eine Zwischen- und eine Endernte. Die Pflanzen, die einer Zwischenernte unterzogen wurden, verblieben allerdings bis zur Endernte in den Klimakammern und der Wiederaufwuchs (W) wurde abschließend erneut geerntet, um die Masse mit der von nicht geschnittenen Pflanzen vergleichen zu können. In der Auswertung des Versuchs 2013 wird dementsprechend die Biomasseproduktion einfach und zweifach geschnittener Pflanzen behandelt. Während im ersten Versuchsjahr (Etablierungsphase) die Sida ein stärkeres Wachstum als die noch im Rosettenstadium verharrende Silphie aufwies, war die Silphie im zweiten Jahr produktiver als die Sida. Dieser Vorteil verschwand allerdings unter ungünstigen Wachstumsbedingungen. Nachfolgend werden die Ergebnisse der beiden Versuchsjahre gesondert präsentiert.

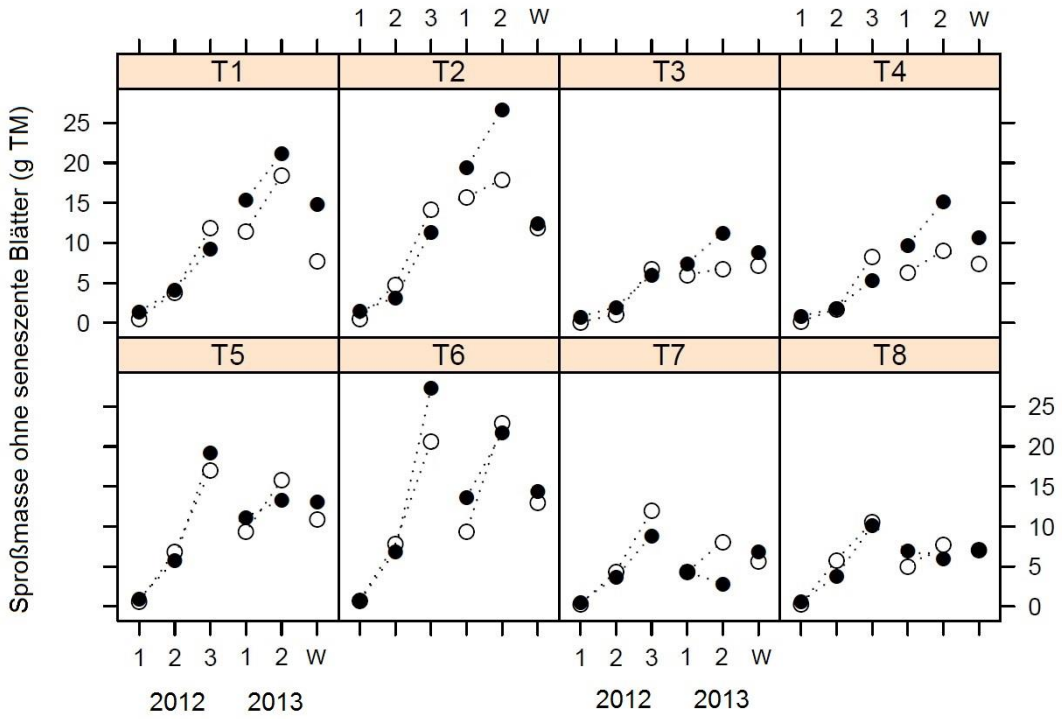

Abbildung 20. In den Jahren 2012 in drei Ernten und in 2013 zu zwei Terminen geerntete nutzbare Sproßmasse von *Sida hermaphrodita* (○) und *Silphium perfoliatum* (●) aufgegliedert nach den acht Behandlungen. „W“ steht für Wiederaufwuchs der nach der Zwischenernte geernteten Pflanzen. Die zweite Ernte (Endernte) erfolgte am selben Tag wie bei den ungeschnittenen Pflanzen.

Tabelle 10. Ergebnisse des Klimakammerversuchs 2012 für aus Samen gezogenen Jungpflanzen von *Sida hermaphrodita* differenziert nach nicht-destruktiven Erhebungen, der bei der Endernte durchgeführten destruktiven Messungen und der Qualitätsanalysen. Die Spalten T1 bis T8 fassen die Mittelwerte der einzelnen Parameter zusammen, während im letzten Teil der Tabelle eine varianzanalytische Auswertung der signifikanten Behandlungseffekte erfolgt. Dabei bedeuten *, ** und *** signifikante Unterschiede bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $P<0.05$, $P<0.01$ und $P<0.001$.

		Sida hermaphrodita										
Behandlung		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8			
Temperatur		Normale Temperaturen				Um 4°C erhöhte Temperaturen						
Wasser		NORM	NORM	REDU	REDU	NORM	NORM	REDU	REDU			
CO_2 (ppm)		380	550	380	550	380	550	380	550	Temp.	CO_2	Wasser
Ergebnisse der nichtdestruktiven Messungen												
	Tage nach Aussaat											
Blattgrüne (SPAD)	77	16,8		20,7		37,9	40,0	40,1	38,5	***		
	86	33,1	31,6	36,0	33,0	37,3	35,7	39,4	40,1	**		
	92	35,0	35,4	36,1	36,2	38,6	40,5	43,6	42,2	***		
	98	37,0	37,5	37,9	37,5	33,7	31,6	37,9	36,4	*		*
	105	38,4	37,1	40,2	41,0	29,2	26,5	35,9	30,3	***		*
	112	36,0	35,9	38,0	39,5	19,1	2,3	35,1	20,5	***	**	***
	119	32,6	33,0	18,6	39,0	5,7	0,0	24,7	6,5	***		
	126	12,9	15,6	16,7	35,3	0,0	0,0	0,0	0,0	***		
Höhe (cm)	98	23,5	28,5	19,5	19,5	61,3	75,8	57,8	57,0	***	*	***
	105	32,3	38,0	28,8	27,5	70,8	94,0	65,5	66,3	***	*	***
	112	42,3	49,3	33,8	33,0	82,3	108,3	69,0	69,5	***	*	***
	119	49,0	57,8	38,1	37,0	90,5	125,3	70,3	73,5	***	**	***
	126	57,0	70,0	41,3	41,0	101,0	138,8	72,3	77,3	***	**	***
	135	66,3	86,0	45,3	45,3	104,8	142,8	72,3	77,3	***	***	***
Ergebnisse der Endernte												
Blattzahl (grün)		32,0	30,3	21,3	22,0	50,3	51,0	26,3	24,8	**		***
Blattfläche grün (cm^2)		1616	1434	977	1127	1586	1032	1443	853		**	**
Blattgewicht grün (g TM)		6,3	6,5	4,0	5,2	6,2	5,5	6,1	3,7			**
Spezifische Blattfläche ($cm^2\ g^{-1}$)		256,8	219,2	247,1	217,9	250,9	190,0	235,9	233,4		***	
Mittlere Blattfäche (cm^2 $Blatt^{-1}$)		51,2	47,6	47,9	51,7	34,6	20,1	56,7	34,7	***	**	**
Blatttrockenmasse (%)		25,8	29,4	24,4	25,9	30,2	35,8	28,1	30,1	***	***	***
Blattgewicht seneszent (g TM)		1,4	2,5	0,6	0,5	3,7	5,0	0,5	2,3	***	**	***
Anteil senesz. Blätter (% Blattmasse)		11,1	15,2	7,6	5,5	17,5	19,5	4,2	18,0	**	*	***
Anteil der Blattmasse (% Spross)		58,6	54,6	61,0	64,3	47,1	40,4	52,9	46,4	***	*	***
Stängelgewicht (g TM)		5,6	7,7	2,9	3,2	10,8	15,1	5,9	6,8	***	*	***
Blütengewicht (g TM)		0,01	0,01	0,00	0,00	0,38	0,53	0,04	0,08	***		***
Wurzelgewicht (g TM)		13,6	16,2	6,5	8,4	16,7	22,2	8,8	10,2	***	***	***
Sprossgewicht (g TM)		13,4	16,8	7,4	8,8	21,2	26,2	12,6	12,9	***	*	***
Gesamtgewicht (g TM)		27,0	33,0	13,9	17,3	37,9	48,4	21,4	23,1	***	***	***
Spross:Wurzel Verhältnis		1,0	1,1	1,1	1,1	1,3	1,2	1,4	1,3	***		
Nutzbare Sprossmasse (Grüne Blätter + Stängel,		11,9	14,2	6,8	8,3	17,1	20,6	12,0	10,6	***		***
Ergebnisse der Analysen zur Sprossqualität												
Rohaschegehalt im Spross (% TM)		8,4	6,1	9,1	9,3	6,2	4,7	7,6	5,6	***	***	***
Rohproteingehalt im Spross (% TM)		9,4	7,5	12,7	11,2	7,4	5,2	10,7	7,5	***	***	***
Rohfasergehalt im Spross (% TM)		17,7	18,6	16,4	14,9	20,8	24,6	17,4	20,7	***	0.087	**
Rohfettgehalt im Spross (% TM)		3,2	2,4	3,4	3,1	2,7	1,5	3,7	2,5	**	***	***
N-freier Extraktionsrest (% TM)		61,3	65,5	58,4	61,6	62,9	64,1	60,6	63,8		**	*
C-Gehalt im Spross (% TM)		41,0	40,8	40,8	40,4	42,1	42,0	42,0	42,1	***		
N-Gehalt im Spross (% TM)		1,6	1,3	2,1	1,9	1,2	0,9	1,7	1,2	***	***	***
C:N im Spross		26,0	32,4	19,5	22,0	34,8	49,6	24,6	35,2	***	***	***
Energiegehalt Spross (MJ kg^{-1} TM)		15,3	15,0	15,2	14,6	16,1	15,3	15,2	16,2	*		
Energieertrag (kJ $Spross^{-1}$)		1,32	1,07	2,15	1,74	0,94	0,78	1,27	1,59	***		***
Methanausbeute (Nl kg^{-1} oTS)						311	320					
Gesamtmethanertrag (L $Spross^{-1}$)						6,1	7,9					

Tabelle 11. Ergebnisse des Klimakammerversuchs 2012 für aus Samen gezogenen Jungpflanzen von *Silphium perfoliatum* differenziert nach nicht-destruktiven Erhebungen, der bei der Endernte durchgeführten destruktiven Messungen und der Qualitätsanalysen. Die Spalten T1 bis T8 fassen die Mittelwerte der einzelnen Parameter zusammen, während im letzten Teil der Tabelle eine varianzanalytische Auswertung der signifikanten Behandlungseffekte erfolgt. Dabei bedeuten *, ** und *** signifikante Unterschiede bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $P<0.05$, $P<0.01$ und $P<0.001$.

		Silphium perfoliatum										
	Behandlungen	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8			
	Temperatur	Normale Temperaturen				Um 4°C erhöhte Temperaturen						
	Wasser	NORM	NORM	REDU	REDU	NORM	NORM	REDU	REDU			
	CO_2 (ppm)	380	550	380	550	380	550	380	550	Temp.	CO_2	Wasser
Ergebnisse der nichtdestruktiven Messungen												
	Tage nach Aussaat											
Blattgrüne (SPAD)	77					38,5	37,9	43,5	43,7	*		
	86	30,6	38,2	46,1	37,4	41,5	38,5	43,8	42,4	*		**
	92	33,0	37,6	44,9	38,6	44,2	39,7	43,9	44,4	**		**
	98	35,5	33,9	43,7	37,4	46,4	42,6	46,0	44,1	***	*	*
	105	35,1	37,6	42,4	34,3	42,3	41,4	46,2	37,8	*		
	112	34,1	38,4	41,7	33,9	37,7	30,5	43,6	30,7			
	119	38,2	42,4	42,9	36,8	23,7	23,7	35,6	24,9	**		
	126	37,6	41,6	42,5	35,6	22,4	20,6	15,2	21,2	***		
Höhe (cm)	98	18,5	21,8	16,0	16,0	24,8	33,0	21,8	26,8	***	**	***
	105	21,3	22,3	16,3	16,5	28,5	34,5	24,8	30,0	***	**	***
	112	21,8	22,3	18,3	17,8	28,3	37,3	25,3	30,3	***	**	***
	119	21,8	21,8	16,5	16,5	28,3	36,8	26,3	32,5	***	**	**
	126	21,8	21,8	16,5	16,5	28,3	36,8	26,3	32,5	***	**	**
	135	21,8	21,8	16,5	16,5	28,3	36,8	26,3	32,5	***	**	**
Ergebnisse der Endernte												
Blattzahl (grün)		12,0	16,5	10,5	7,0	25,0	25,5	16,0	18,5	***		***
Blattfläche grün (cm^2)		1315	1736	918	887	2623	3285	1327	1469	***	***	***
Blattgewicht grün (g TM)		9,3	11,4	6,0	5,4	19,3	27,3	8,9	10,2	***	***	***
Spezifische Blattfläche ($cm^2\ g^{-1}$)		141,9	156,0	153,0	168,7	137,4	119,9	149,8	144,6	*		*
Mittlere Blattfäche (cm^2 $Blatt^{-1}$)		118,6	113,0	103,1	128,7	113,7	132,0	86,4	85,7			
Blatttrockenmasse (%)		18,6	18,8	18,0	17,3	21,3	20,7	19,0	18,1	*		**
Blattgewicht seneszent (g TM)		1,3	1,2	0,7	0,8	2,5	2,6	1,6	1,7	**		*
Anteil senesz. Blätter (% Blattmasse)		12,1	9,7	11,1	13,3	11,3	8,5	15,6	14,4			
Anteil der Blattmasse (% Spross)		100	100	100	100	100	100	100	100			
Stängelgewicht (g TM)		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
Blütengewicht (g TM)		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
Wurzelgewicht (g TM)		12,7	17,7	7,5	6,0	20,0	32,0	10,1	12,3	***	**	***
Sprossgewicht (g TM)		10,6	12,6	6,8	6,2	21,7	30,0	10,5	11,9	***	***	***
Gesamtgewicht (g TM)		23,3	30,2	14,3	12,2	41,7	62,0	20,6	24,2	***	***	***
Spross:Wurzel Verhältnis		0,9	0,7	0,9	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	*		
Nutzbare Sprossmasse (Grüne Blätter, g TM)		9,3	11,4	6,0	5,4	19,3	27,3	8,9	10,2	***	***	***
Ergebnisse der Qualitätsanalysen												
Rohaschegehalt im Spross (% TM)		13,3	11,9	14,9	13,3	10,7	9,5	13,6	12,4	*	0.09	**
Rohproteingehalt im Spross (% TM)		16,1	11,9	15,9	18,0	9,5	6,6	15,1	14,0	***	0.06	***
Rohfasergehalt im Spross (% TM)		10,7	9,1	8,7	7,3	9,9	10,5	10,4	10,3	**		*
Rohfettgehalt im Spross (% TM)		4,3	4,1			3,2	2,8	4,8	3,3	0.051	*	*
N-freier Extraktionsrest (% TM)		55,53	63,03			66,65	70,7	56,2	60,53	*	*	***
C-Gehalt im Spross (% TM)		41,1	40,8	38,65	40,63	39,3	39,48	38,6	40,17	*		
N-Gehalt im Spross (% TM)		3,157	1,957	2,875	3,2	1,545	1,05	2,12	2,473	***		***
C:N im Spross		13,26	21,64	13,46	13,47	26,61	38,48	18,21	16,26	***		***
Energiegehalt Spross (MJ kg^{-1} TM)						14,8	15,2					
Organische Trockensubstanz (% TM)		88,3	91,4	84,9	89,3	84,6	86,9	86,7	86,6			
Methanausbeute (Nl kg^{-1} oTS)		312	299	307	321	317	299	338	297			
Gesamtmethanertrag (L Spross^{-1})		2,9	3,4	1,8	1,8	5,8	7,8	3,1	3,1			

Tabelle 12. Ergebnisse der Zwischenernte des Versuchs 2013, welcher mit einjährigen Pflanzen durchgeführt wurde. Dargestellt sind die am Tag 96 nach Versuchsbeginn erhaltenen Resultate zu Blatteigenschaften, der Biomasseallokation und der im Sprossmaterial durchgeführten Analysen zur Qualität. Die Signifikanzprüfung beruht auf der mehrfaktoriellen ANOVA der drei im Versuch variierten Faktoren (ohne deren Interaktionen).

Behandlungen	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8			
Temperatur	Normale Temperaturen				Um 4°C erhöhte Temperaturen						
Wasser	NORM	NORM	REDU	REDU	NORM	NORM	REDU	REDU			
CO_2 (ppm)	380	550	380	550	380	550	380	550	Temp.	CO_2	Wasser
Sida hermaphrodita											
Blattzahl (grün)	28,0	42,0	23,3	26,7	44,7	32,0	20,3	18,3			***
Blattfläche grün (cm^2)	820,0	968,0	487,7	581,7	652,3	438,3	329,0	377,0	***		***
Blattgewicht grün (g TM)	3,7	4,5	2,6	3,0	3,6	2,7	2,0	2,1	*		**
Spezifische Blattfläche ($cm^2\ g^{-1}$)	223,1	214,7	189,3	196,8	182,7	161,4	164,1	179,8	***		
Mittlere Blattfäche ($cm^2\ Blatt^{-1}$)	29,1	23,2	21,8	22,4	15,4	13,9	16,7	20,9	**		
Anteil der Blattmasse (% Spross)	33,8	29,0	42,0	47,3	37,8	28,8	47,5	41,8			
Stängelgewicht (g TM)	7,0	10,8	3,1	3,2	5,6	6,5	2,2	2,8	*	0.06	***
Sprossgewicht (g TM)	13,2	17,6	7,4	7,7	13,0	13,1	6,1	7,0	0.08		***
Nutzbare Sprossmasse (Grüne Blätter + Stängel)	11,5	15,7	6,0	6,3	9,4	9,4	4,3	5,0	**		***
Anteil seneszenter Biomasse (%)	14,9	10,3	18,8	18,3	27,7	28,1	29,2	28,0	***		
Ergebnisse der Analysen zur Sprossqualität (nutzbarer Spross)											
Rohaschegehalt im Spross (% TM)	8,7	6,5	8,6	9,0	9,0	7,5	10,2	9,0			
Rohproteingehalt im Spross (% TM)	8,6	6,8	11,1	9,8	8,4	6,7	10,5	8,6		*	**
Rohfasergehalt im Spross (% TM)	21,1	23,1	18,3	19,0	21,0	20,3	18,3	19,9			0.08
Rohfettgehalt im Spross (% TM)	1,9	1,7		2,2	2,5	2,2			*		0.07
NDF (%)	31,6	35,0	26,5		31,8	31,4		27,4			
ADF (%)	22,8	24,7			21,9	21,4					
ADL (%)	2,6	2,9			2,8	2,6					
Silphium perfoliatum											
Blattzahl (grün)	29,7	34,0	37,0	36,7	44,3	46,3	32,7	34,7			
Blattfläche grün (cm^2)	1384,0	1677,7	803,3	994,7	1177,3	1417,3	436,3	654,0	**	**	***
Blattgewicht grün (g TM)	10,4	12,1	6,5	7,8	9,5	10,2	3,7	5,9	*	*	***
Spezifische Blattfläche ($cm^2\ g^{-1}$)	136,7	138,7	124,7	128,2	123,0	139,7	118,2	109,9	*		**
Mittlere Blattfäche ($cm^2\ Blatt^{-1}$)	48,8	49,7	21,8	27,1	26,5	30,8	13,4	21,5	***	0.07	***
Anteil der Blattmasse (% Spross)	66,3	62,3	86,4	80,5	85,6	75,3	87,1	85,0		0.07	
Stängelgewicht (g TM)	2,5	3,3	0,7	1,1	1,1	2,4	0,1	0,2	**	*	***
Sprossgewicht (g TM)	20,6	27,1	11,9	14,6	15,6	20,4	9,1	10,7	***	**	***
Nutzbare Sprossmasse (Grüne Blätter + Stängel)	15,4	19,4	7,5	9,8	11,2	13,7	4,3	7,0	***	**	***
Anteil seneszenter Biomasse (%)	25,7	28,4	34,5	33,0	29,0	32,9	50,9	34,8	0.07		*
Ergebnisse der Analysen zur Sprossqualität (nutzbarer Spross)											
Rohaschegehalt im Spross (% TM)	12,7	11,4	15,0	11,7	15,4	10,8	21,3	18,9	***	***	***
Rohproteingehalt im Spross (% TM)	7,4	6,4	9,4	7,9	8,4	7,5	11,4	9,0	0.06	*	**
Rohfasergehalt im Spross (% TM)	11,0	12,2	9,3	9,9	10,4	11,9	7,5	8,0	**	*	***
Rohfettgehalt im Spross (% TM)	2,8	2,9	3,3	3,4	3,3	4,3		4,7	*		
NDF (%)	16,4	18,7	15,5	16,4	16,6	18,2		13,9			*
ADF (%)	17,0	18,5	14,1	14,5	16,2	18,1		12,0			***
ADL (%)	1,5	1,3	1,8	1,3	1,3	2,2		1,6	0.06		

Tabelle 13. Ergebnisse der Endernte des Versuchs 2013 von nicht zwischendurch geschnittenen Pflanzen (vgl. Tab. 12 zur Zwischenernte). Im Versuch wurde mit einjährigen Pflanzen gearbeitet. Dargestellt sind die am Tag 150 nach Versuchsbeginn erhaltenen Resultate zu Blatteigenschaften, der Biomasseallokation und der Qualität des Sprossmaterials. Die Signifikanzprüfung beruht auf der mehrfaktoriellen ANOVA der drei im Versuch variierten Faktoren (ohne deren Interaktionen).

Behandlungen	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8			
Temperatur	Normale Temperaturen				Um 4°C erhöhte Temperaturen						
Wasser	NORM	NORM	REDU	REDU	NORM	NORM	REDU	REDU			
CO_2 (ppm)	380	550	380	550	380	550	380	550	Temp.	CO_2	Wasser
Sida hermaphrodita											
Blattgrüne (SPAD) an Tag 81	13,0	13,7	4,8	0,0	31,5	18,7	18,6	21,0	**		0.07
Höhe (cm) am Tag 150	99,3	90,0	46,3	53,0	84,0	110,7	66,3	59,7			***
Blattzahl (grün)	60,3	58,0	31,0	33,7	56,3	65,0	44,7	45,0			**
Blattfläche grün (cm^2)	771,7	606,0	534,3	489,3	615,3	756,0	395,7	406,3			***
Blattgewicht grün (g TM)	5,0	4,0	2,7	3,6	3,8	6,1	2,8	3,0		0.07	***
Spezifische Blattfläche ($cm^2\ g^{-1}$)	155,9	150,7	190,0	137,8	164,8	123,3	143,1	140,0		*	
Mittlere Blattfläche ($cm^2\ Blatt^{-1}$)	12,9	10,9	18,2	15,0	11,3	11,8	9,3	9,0	**		
Blattgewicht seneszent (g TM)	5,2	5,4	2,4	3,5	6,0	7,7	3,9	3,1	**		***
Anteil der Blattmasse (% Spross)	27,1	24,4	40,4	39,6	23,9	27,1	34,6	37,9			***
Stängelgewicht (g TM)	12,9	13,5	4,1	5,5	11,1	14,8	5,0	4,7			***
Blütengewicht (g TM)	0,6	0,5	0,0	0,0	1,0	2,0	0,3	0,2	**		***
Sprossgewicht (g TM)	23,6	23,3	9,2	12,6	21,8	30,6	12,0	10,9			***
Nutzbare Sprossmasse (Grüne Blätter + Stängel)	18,4	17,9	6,8	9,0	15,8	23,0	8,1	7,8			***
Anteil seneszenter Biomasse (%)	21,9	25,9	26,0	27,7	27,5	25,2	32,6	27,8			
Ergebnisse der Analysen zur Sprossqualität (nutzbarer Spross)											
Trockenmasseanteil (% FM)	39,4	37,1	33,9	34,4	39,9	42,4	36,7	35,8	*		**
Rohaschegehalt im Spross (% TM)	7,2	6,6	11,1	9,3	7,3	7,6	7,7	8,3			**
Rohproteingehalt im Spross (% TM)	5,5	4,7	7,6	7,0	6,3	5,1	8,8	7,4		*	***
Rohfasergehalt im Spross (% TM)	22,3	23,2		22,4	21,0	22,4					
Rohfettgehalt im Spross (% TM)	1,7	1,3			2,1	1,7					
NDF (%)	34,8	38,5			36,3	37,7					
ADF (%)		26,9				26,1					
ADL (%)		4,9				4,7					
Energiegehalt Spross ($MJ\ kg^{-1}$ TM)	15,1	14,9	14,2	14,5	15,0	14,7	14,8	14,9			*
Silphium perfoliatum											
Blattgrüne (SPAD) an Tag 81	2,3	10,8	5,8	0,0	21,8	12,6	20,2	8,5	*		
Höhe (cm) am Tag 150	54,7	67,7	31,0	38,7	38,3	62,7	18,7	22,3	**	**	***
Blattzahl (grün)	37,7	50,7	29,3	38,7	27,3	41,0	9,3	20,7	***	***	***
Blattfläche grün (cm^2)	1246,7	1431,7	748,7	1119,0	762,7	1204,7	95,4	437,7	***	**	***
Blattgewicht grün (g TM)	10,3	12,8	5,9	8,4	6,5	9,0	0,8	3,3	***	**	***
Spezifische Blattfläche ($cm^2\ g^{-1}$)	122,0	112,0	127,5	133,4	117,6	133,4	140,4	138,6			
Mittlere Blattfläche ($cm^2\ Blatt^{-1}$)	33,6	29,2	25,6	29,5	27,4	29,2	5,6	20,7	*		*
Blattgewicht seneszent (g TM)	17,4	15,0	12,5	13,3	14,6	14,5	11,7	12,8			*
Anteil der Blattmasse (% Spross)	48,7	48,4	52,1	54,8	48,5	41,3	18,3	48,5	0.06		
Stängelgewicht (g TM)	10,8	13,3	5,4	6,4	6,6	12,0	2,0	2,7	***	**	***
Blütengewicht (g TM)	0,1	0,6	0,0	0,4	0,2	0,7	0,0	0,0			
Sprossgewicht (g TM)	38,5	41,6	23,7	28,5	28,0	36,3	14,6	18,8	***	***	***
Nutzbare Sprossmasse (Grüne Blätter + Stängel)	21,2	26,7	11,3	15,2	13,3	21,7	2,9	6,0	***	***	***
Anteil seneszenter Biomasse (%)	45,1	35,5	52,6	46,7	53,0	40,2	80,6	66,4	***	*	***
Ergebnisse der Analysen zur Sprossqualität (nutzbarer Spross)											
Trockenmasseanteil (% FM)	27,2	26,7	25,3	24,4	32,3	29,5	24,8	26,2	0.06		**
Rohaschegehalt im Spross (% TM)	10,37	9,867	11,7	13,1	10,73	8,167	12,4	12,1			**
Rohproteingehalt im Spross (% TM)	5,5	4,933	7,033	7,1	6,167	5,167	9,233	9,333	*		***
Rohfasergehalt im Spross (% TM)	15,9	17,33	14,57	17	15,1	19,17		13,6		*	0.06
Rohfettgehalt im Spross (% TM)	2,167	2	2,5	2,367	2,15	2,433					
NDF (%)	25,4	26,03	25,3	24,37	23,65	28,7					
ADF (%)	23,17	24,7		26,6	25	26,4			*	*	0.06
ADL (%)	2,533	3,367		4,3	3,6	3,55				*	0.08
Organische Trockensubstanz (% TM)	90,97	86,48	87,43	86,16	89,09	90,59	87,81	85,62			
Methanausbeute ($m^3\ kg^{-1}$ oTS)	0,295	0,303	0,28	0,278	0,283	0,269	0,252	0,257			

Tabelle 14. Ergebnisse des am Tag 150 erfolgten zweiten Schnitts von am Tag 96 geschnittenen Pflanzen. Im Versuch wurde mit einjährigen Pflanzen gearbeitet. Dargestellt sind die Resultate zu Blatteigenschaften der Biomasseallokation und der Qualität des zweiten Schnitts. Die Signifikanzprüfung beruht auf der mehrfaktoriellen ANOVA der drei im Versuch variierten Faktoren (ohne deren Interaktionen).

Behandlungen	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8			
Temperatur	Normale Temperaturen				Um 4°C erhöhte Temperaturen						
Wasser	NORM	NORM	REDU	REDU	NORM	NORM	REDU	REDU			
CO_2 (ppm)	380	550	380	550	380	550	380	550	Temp.	CO_2	Wasser
Sida hermaphrodita											
Spross ohne seneszente Blätter (g TM)	7,767	11,91	7,18	7,44	10,96	13,04	5,68	7,06		*	***
Spross mit seneszenten Blätter (g TM)	9,817	14,95	9,843	9,98	16,66	18,75	8,777	10,7	*	0.065	***
Anteil seneszenter Biomasse (%)	21,88	20,2	27,37	25,35	34,09	29,94	35,57	33,7	**		
Spezifische Blattfläche ($cm^2 g^{-1}$)	209,8	199,8	211,4	181,6	183,5	152,9	184,5	186,7	**	*	
Mittlere Blattfäche (cm^2 $Blatt^{-1}$)	16,65	22,07	22,31	21,43	18,69	29,63	17,66	20,59		0.087	
Anteil der Blattmasse (% Spross)	54,43	45,69	49,25	51,31	43,65	47,42	56,49	49,72			
Ergebnisse der Analysen zur Sprossqualität (nutzbarer Spross)											
Rohproteingehalt im Spross (% TM)	10,17	7,067	9,7	9	6,4	6,233	9,567	8,8			*
Rohaschegehalt im Spross (% TM)	12,93	10,13	9,533	8,6	8,133	7,733	9,1	7,833	*	0.09	
Rohfasergehalt im Spross (% TM)	19	22,25	17,9	18,1	19	16,47					
Rohfettgehalt im Spross (% TM)		1,6				2					
NDF (%)	25,7				31,6	26,23					
ADF (%)		32,4									
ADL (%)		5,1									
Silphium perfoliatum											
Spross ohne seneszente Blätter (g TM)	14,81	12,46	8,86	10,73	13,17	14,45	6,873	7,153			***
Spross mit seneszenten Blätter (g TM)	20,68	20,43	15,11	16,11	19,57	21,68	13,35	12,92			***
Anteil seneszenter Biomasse (%)	29,68	38,94	37,89	33,44	33,18	32,96	47,5	44,22			
Spezifische Blattfläche ($cm^2 g^{-1}$)	151	160,5	154,6	155	152	170,5	124	124,7			*
Mittlere Blattfäche (cm^2 $Blatt^{-1}$)	30,32	31,54	19,85	22,77	29,82	23,76	20,9	24,42			*
Anteil der Blattmasse (% Spross)	69,34	77,79	62,8	71,25	64,16	73,02	73,98			0.07	
Ergebnisse der Analysen zur Sprossqualität (nutzbarer Spross)											
Rohproteingehalt im Spross (% TM)	7,033	7,033	8,367	7,133	7,167	8,2	10,2	7,867	0.06		0.05
Rohaschegehalt im Spross (% TM)	13,8	16	12,7	12,47	13,9	13,57	16,9	14,63			
Rohfasergehalt im Spross (% TM)	14,4	11,95	14,87	17,7	16,45	13	10,9	10,4	*		
Rohfettgehalt im Spross (% TM)	2,05	2,3		2,4	2,3	2,5					
NDF (%)	21,9	20,95	26,4		30,4	22,5					
ADF (%)	22,6										
ADL (%)	2,2										
Methanausbeute (m^3 kg^{-1} oTS)	0,28	0,291	0,294	0,302	0,289	0,278	0,271	0,273			

Ergebnisse des Versuchs 2012 (aus Samen gezogene Jungpflanzen)

Während zur 1. Ernte noch keine deutlichen Unterschiede zwischen den Behandlungen vorhanden waren, zeigte sich bei der dritten Ernte bei beiden Arten erwartungsgemäß ein starker CO_2-Düngeeffekt. Am stärksten war das Sprosswachstum in der wärmeren, gut mit Wasser versorgten Behandlung durch CO_2 gefördert. Dabei zeigte die Sida einen Zuwachs der Sprossmasse um 23.6 % und die Silphie sogar um 38 %. Mit 14.9 g TM hatte aber die Sida im Mittel über die acht Behandlungen mehr Sproßmasse als die Silphie (13.8 g TM) gebildet. Die Silphie produzierte aber im Mittel über alle Behandlungen mehr Wurzelmasse als die Sida und hatte ein etwas höheres Sproß:Wurzel-Verhältnis.

Der Vergleich der in den acht Behandlungen von den beiden Arten zur energetischen Nutzung erbrachten Sprossmassen ist in Abb. 21 dargestellt. Dieses sind die Sprossmassen abzüglich der seneszenten Blattmasse, die unter Freilandbedingungen nicht mehr dem Spross anhaften würde, im Versuch aber bei den Sprossmassen mitbestimmt wurde. Während die Sida der Silphie unter normalen Temperaturen (T1 bis T4) unabhängig von der Wasserzufuhr und den CO_2-Konzentrationen in der Juvenilphase überlegen war, produzierte die Silphie bei höheren Temperaturen und einer normalen Wasserzufuhr bei beiden CO_2-Konzentrationen (T5 und T6) mehr nutzbare Sprossmasse als die Sida. In den unter erhöhten Temperaturen eingestellten trockeneren Behandlungen (T7 und T8) war aber die Sida wiederum der Silphie überlegen. Das gegenüber der Sida verstärkte Wachstum der Silphie bei warmen aber nicht trockenen Bedingungen deckt sich mit der im Ursprungsgebiet der Arten beobachteten vergleichsweise südlicheren und westlicheren Verbreitung der Silphie (vgl. Abb. 2).

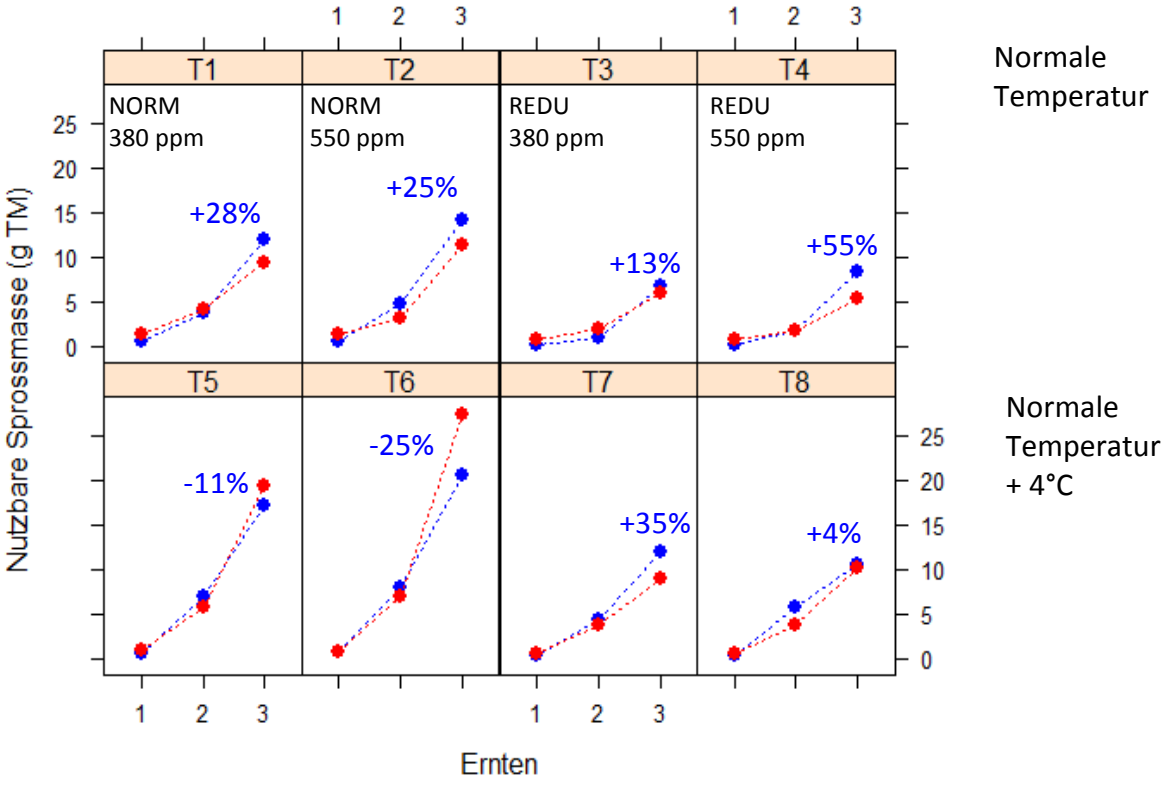

Abbildung 21. Vergleich der im Jahre 2012 unter verschiedenen Umweltbedingungen in drei Ernten durch Sida (●) und Silphie (●) produzierten nutzbaren Sprossmassen (grüne Blätter plus Stängel) aufgegliedert nach den acht im Versuch eingesetzten Behandlungen (vgl. Tab. 10 und 11). Die Zahlen geben die prozentualen Unterschiede der nutzbaren Sprossmasse der Sida im Vergleich zur Silphie zum Zeitpunkt der Endernte an.

Allokationsmuster

Einen Überblick über die Allokationsmuster, sprich der Aufteilung der Gesamttrockenmasse in ober- und unterirdische Biomasse bzw. in seneszente und grüne Blatt- sowie in Blüten- und Stängelmasse, gibt Abb. 22. Während die Silphie im ersten Anzuchtjahr nur Blattmasse als oberirdische Pflanzenteile bildete, hatten die Sidapflanzen in allen acht Behandlungen bereits Stängel produziert. In den um 4°C erhöhten Behandlungen hatte die Sida bereits einige reproduktive Organe gebildet, die bis zu 1% der Gesamtmasse ausmachten. Ergebnisse zu signifikanten Behandlungsunterschieden bei den einzelnen Fraktionen sind in den Tabellen 10 und 11 wiedergegeben. Während die Massen der einzelnen Fraktionen sowohl bei der Silphie als auch der Sida signifikant durch die Faktoren Temperaturerhöhung, CO_2-Düngung und Wassergabe beeinflusst waren, zeigte das Spross:Wurzel-Verhältnis lediglich eine Veränderung durch die Temperaturerhöhung. Bei beiden Arten wurde unter erhöhten Temperaturen eine verstärkte Produktion von Sprossmasse im Verhältnis zur Wurzelmasse festgestellt. Bei der Sida, die im Gegensatz zur Silphie bereits über das Stadium der Blattbildung hinaus war, zeigten sich aber Effekte der drei Faktoren auf den Anteil der Blattmasse an der Gesamtmasse. Sie war sowohl bei erhöhten Temperaturen als auch bei erhöhten CO_2-Konzentrationen verringert, was auf die Wachstumsförderung dieser beiden Faktoren zurückgehen dürfte. Die Pflanzen waren dementsprechend weiter entwickelt und konnten bereits in die reproduktive Phase (Blütenbildung) umschalten. Gleichzeitig deutete sich bei der Sida ein höherer Anteil seneszenter Blattmasse in diesen Behandlungen an, wohingegen dieser Anteil bei der Silphie keine signifikanten Behandlungsunterschiede aufwies.

Abbildung 22. Vergleich der bei der Endernte in den acht Behandlungen (s. Tab. 5) bestimmten Allokationsmuster der Sida und Silphie. Oben: Biomasse (g TM) in den Fraktionen seneszente Blätter, Blüten, grüne Blätter, Stängel und Wurzel (negative Zahlen für unterirdische Fraktion). Unten: prozentuale Aufteilung der Fraktionen auf die Gesamtmasse.

Ergebnisse des Versuchs 2013 (einjährige Pflanzen)

Trotz der im Mittel höheren Pflanzen, bildeten die unter Freiluftbedingungen kultivierten Pflanzen keine größeren Biomassen als die in den Klimakammern unter guter Wasserversorgung gezogenen Individuen. Abbildung 23 zeigt die mittleren Sprossgewichte in den zehn unterschiedlichen Behandlungen inklusive der Ergebnisse der dreifaktoriellen ANOVA. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Endernte derjenigen Pflanzen, bei denen keine Zwischenernte erfolgte und enthalten auch die Trockengewichte der während des Versuchs abgestorbenen Blätter. Im Mittel über alle Behandlungen produzierte die Silphie 50% mehr Trockenmasse als die Sida. Dieser Vorsprung war aber unter Freilandbedingungen (Behandlungen 9 und 10) wesentlich geringer und betrug nur ca. 20%.

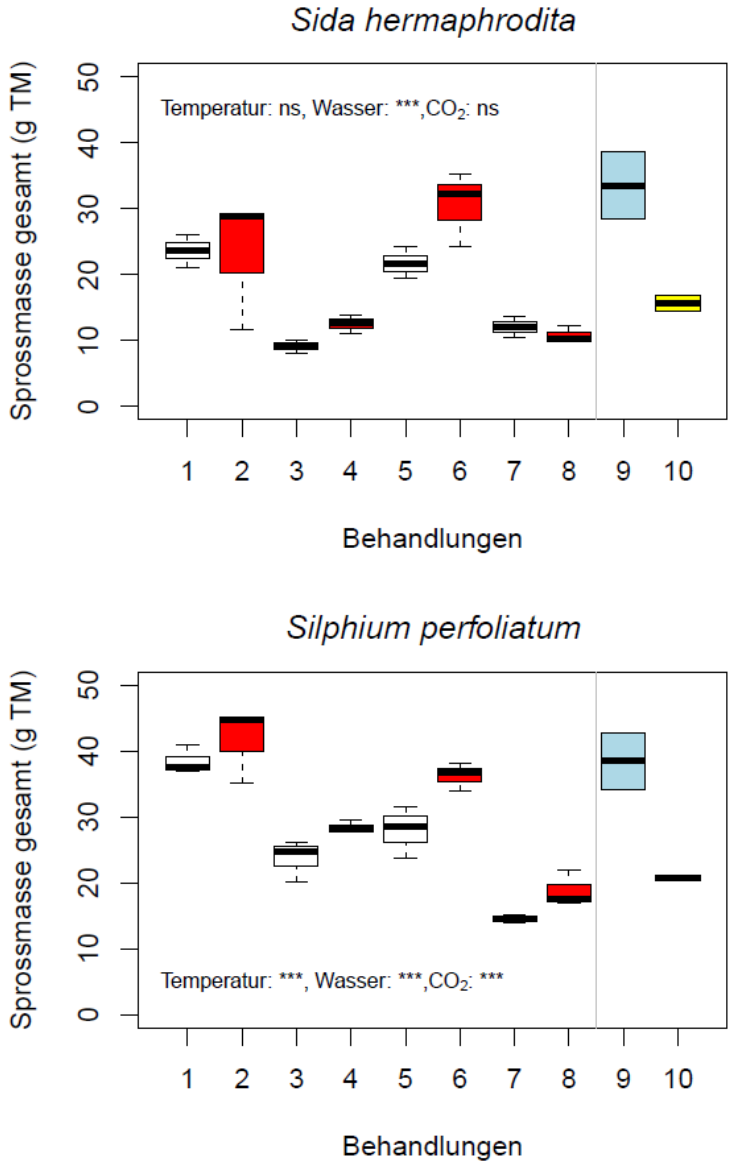

Abbildung 23. Bei der Endernte 2013 nach 150 Tagen Versuchsdauer in den zehn Behandlungen geerntete Sprosstrockenmasse (inklusive der zuvor geernteten seneszenten Blattmasse) der Sida und der Silphie. Rot unterlegt sind die Behandlungen, in denen die CO_2-Konzentration auf 550 ppm erhöht war. Blau und gelb markiert sind die Freiluftbehandlungen, die normale bzw. reduzierte Wassergaben erhielten. Die Ergebnisse der ANOVA (***P<0.001, „ns“ nicht signifikant) beruhen auf dem Vergleich der in den Klimakammern realisierten Behandlungen 1 bis 8.

Während das Wachstum bei der Sida signifikant nur durch unterschiedliche Wassergaben beeinflusst wurde, bewirkten bei der Silphie alle drei Faktoren signifikante Wachstumsunterschiede. Verringerte Wassergaben und erhöhte Temperaturen reduzierten das Wachstum, während die in Kombination mit diesen Faktoren verabreichten höheren CO_2-Konzentrationen zur Erhöhung der Produktivität bzw. zu einer Kompensation des durch erhöhte Temperaturen und verringerte Wassergaben erzeugten Trockenstresses führten.

Betrachtet man die zur Endernte vorhandene Trockenmasse abzüglich der zuvor seneszent gewordenen und entfernten Blattmasse, erhält man die tatsächlich für bioenergetische Zwecke nutzbare Trockenmasse. Da die Silphie im Versuch deutlich mehr Blattmasse verlor als die Sida, verringerte sich der oben erwähnte Vorsprung bei der nutzbaren Biomasse auf lediglich 13%. Die ANOVA zu den signifikanten Behandlungseffekten ergab dieselben Ergebnisse wie für die Gesamtsprossmasse, jedoch wurde für den Anteil der im Versuch abgestorbenen Blattmasse ein anderes Bild erhalten. Die Sida zeigte nämlich keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich des Anteils seneszenter Blattmasse zwischen den Behandlungen, während bei der Silphie neben den drei signifikanten Faktoren auch eine Interaktion zwischen Temperatur und Wassergabe beobachtet wurde. Interessanterweise reduzierte die erhöhte CO_2-Konzentration den Anteil an seneszenter Blattmasse unter erhöhten Temperaturen, was den oben beschriebenen Kompensationseffekt unterstreicht. Angaben zu den mittleren Anteilen seneszenter Blattmasse sowie aller anderen bei der Endernte gemessenen Parameter finden sich in der Tabelle 13.

Anteil der Blattmasse am Spross

Ein weiterer wichtiger Parameter, der Unterschiede im Wachstum und in der pflanzlichen Entwicklung beschreibt, ist der relative Anteil der noch nicht seneszenten (grünen) Blattmasse an der Sprosstrockenmasse. Er sinkt im Verlauf der Entwicklung, da immer mehr Biomasse im Stängel akkumuliert wird und seneszente Blätter nach und nach abfallen. Der Anteil der Blattmasse am Spross hat großen Einfluss auf die Sprossqualität (s. Kapitel 3.4.3 und 3.4.4). So führen hohe Blattanteile am Spross mitunter zu höheren Asche- und Proteingehalten.

Der relative Blattanteil lag zur Zwischenernte am Tag 96 seit Versuchsbeginn bei der Sida im Mittel über alle Behandlungen bei 40% und bei der Silphie bei 75%. Bis zur Endernte am Tag 150 sanken diese Werte auf 32% bzw. 47% (s. Abb. 24). Beim zwischen Tag 96 und 150 wiederaufgewachsenen Sprossmaterial (Daten der zweiten Ernte der zwischendurch am Tag 96 geschnittenen Pflanzen nicht gezeigt) betrug der Blattanteil bei der Sida 50% und bei der Silphie 70%.

Der Vergleich der in den KIimakammern gezogenen Pflanzen mit den im Freiland kultivierten zeigte bei keiner der Arten einen gravierenden Unterschied bezüglich der Allokationsmuster. Bei beiden Arten führte aber eine schlechtere Wasserversorgung bis zur Zwischenernte und bei der Sida bis zur Endernte zu einem signifikant höheren relativen Blattmasseanteil. Ursache hierfür ist vermutlich, dass die Pflanzen bei Trockenstress nicht in das Stadium des Längenwachstums gelangen und nur wenig Stängelmasse bilden. Bei der Silphie war bis zur Zwischenernte ein signifikanter Effekt der Wassergabe zu beobachten. So bildeten die bei 4°C wärmeren Bedingungen gezogenen Pflanzen im Mittel ebenfalls weniger Stängelmasse. Zusätzlich war bei dieser Art bis zur Zwischenernte ein leichter, aber nicht signifikanter CO_2-Effekt zu beobachten. So hatten die unter erhöhten CO_2-Konzentrationen gezogenen Pflanzen höhere Stängelmassenanteile. Dieser Effekt war aber zur Endernte wieder verschwunden.

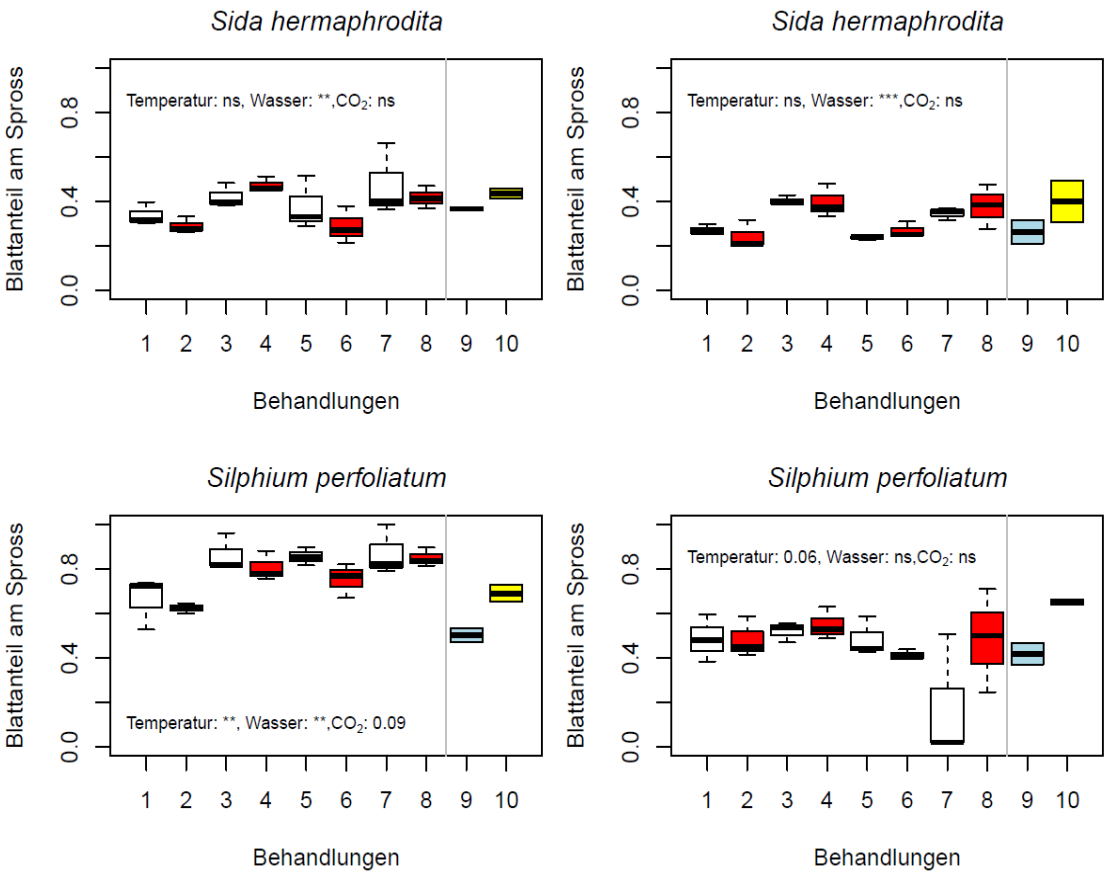

Abbildung 24. Bei der Zwischenernte (links) nach 96 Tagen und der Endernte (rechts) nach 150 Tagen in den zehn Behandlungen betrachtete relative Blattmasseanteile (Anteil grüner Blätter an der Sprosstrockenmasse, 1=100%). Rot unterlegt sind die Behandlungen, in denen die CO_2-Konzentration auf 550 ppm erhöht war. Blau und gelb markiert sind die Freiluftbehandlungen, die normale bzw. reduzierte Wassergaben erhielten. Die Ergebnisse der ANOVA (***P<0.001, „ns“ nicht signifikant) beruhen auf dem Vergleich der in den Klimakammern realisierten Behandlungen 1 bis 8.

Vergleich der Trockenmassen einfach und zweifach geschnittener Pflanzen

Bei der Hälfte der Pflanzen wurde am Tag 96 nach Versuchsbeginn eine Zwischenernte durchgeführt. Die Pflanzen schlugen schnell wieder aus und der Wiederaufwuchs nach diesem Schnitt wurde am Tag 150 geerntet. Über den Vergleich der kumulativen Biomassen aus dem 1. und 2. Schnitt mit denjenigen der Pflanzen, bei denen keine Zwischenernte erfolgte, kann ermittelt werden, ob sich eine Zwischenernte positiv auf die Produktivität von Energiepflanzen auswirken kann. Die Pflanzen, bei denen eine Zwischenernte erfolgte, wurden nach dem Schnitt nicht gedüngt, so dass ihnen dieselbe Menge an Nährstoffen zur Verfügung stand wie den nicht geschnittenen Pflanzen.

Abbildung 25 zeigt den Vergleich der aus dem 1. und 2. Schnitt erhaltenen kumulativen Sprosstrockenmasse mit der Biomasse nicht geschnittener Pflanzen. Unter Freilandbedingungen (Behandlungen 9 und 10) erzeugte die Silphie unabhängig von der Wasserversorgung in den zweifach geernteten Varianten im Mittel 18.7% mehr Biomasse als die nicht geschnittenen Pflanzen. Ein Grund hierfür liegt in dem mit dem Schnitt erfolgten Abbruch der reproduktiven Phase und des starken Neuaustriebs. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei der Silphie mit dem Einsetzen der Blüte nicht mehr viel Biomasse produziert wird. Auch bei anderen Energiepflanzenarten kann es daher sinnvoll sein, die Biomasseproduktion in der vegetativen Phase über Zwischenschnitte anzukurbeln bzw. spät blühende Sorten anzubauen (vgl. *Miscanthus*-Ergebnisse von Gauder et al. 2012).

Dagegen zeigte die Sida ein anderes Verhalten. Die zweifach geerntenen Pflanzen der Behandlungen 9 und 10 hatten im Mittel eine 17.4% geringere Sprosstrockenmasse als die nur einfach geernteten Pflanzen. Bei der Sida geht offensichtlich das Einsetzen der Blüte nicht mit einer starken Verringerung des Wachstums einher. Im Gegenteil werden zu Blühbeginn weitere, ebenfalls Blüten tragende Seitentriebe gebildet und die Pflanze schießt weiterhin in die Höhe. Bei der Silphie hingegen, werden keine Seitentriebe und nur wenige große Blüten gebildet, die als Senken für die Assimilate fungieren. Die zahlreichen kleinen Blüten der buschig wachsenden Sida führen zur starken Verteilung der Assimilate in immer neu gebildete Seitentriebe. Während die Silphie also eher der Strategie eines determinierten Wachstums folgt, zeigt die Sida ein nicht determiniertes Wachstum. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass die Sida bei günstigen klimatischen Bedingungen im Herbst nicht länger aktiv bleibt als die Silphie, da sie zu einem starken Blattwurf neigt und damit früher als die Silphie ihre Assimilationsfläche stark reduziert (vgl. auch Kapitel 3.6. zur Nährstoffrückverlagerung).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen unter Freilandbedingungen, wiesen die unter kontrollierten Bedingungen in den Klimakammern gezogenen Pflanzen andere Reaktionsmuster auf. Bei der Silphie zeigten nur die zweifach geschnittenen Pflanzen der Behandlungen 5, 7 und 8 höhere Biomassen als die einfach geernteten Pflanzen. Da es sich bei diesen um unter erhöhten Temperaturen gezogene Pflanzen handelte, kann davon ausgegangen werden, dass sie in ihrer Entwicklung bereits so weit vorangeschritten waren und ein Schnitt der Pflanzen zur Entriegelung der Blühinduktion führte, so dass ein erneuter Wachstumsschub einsetzen konnte. Bei der Sida zeigten die zweifach geschnittenen Pflanzen in allen Behandlungen außer den Behandlungen 1 und 6 höhere kumulative Biomassen als die einfach geschnittenen.

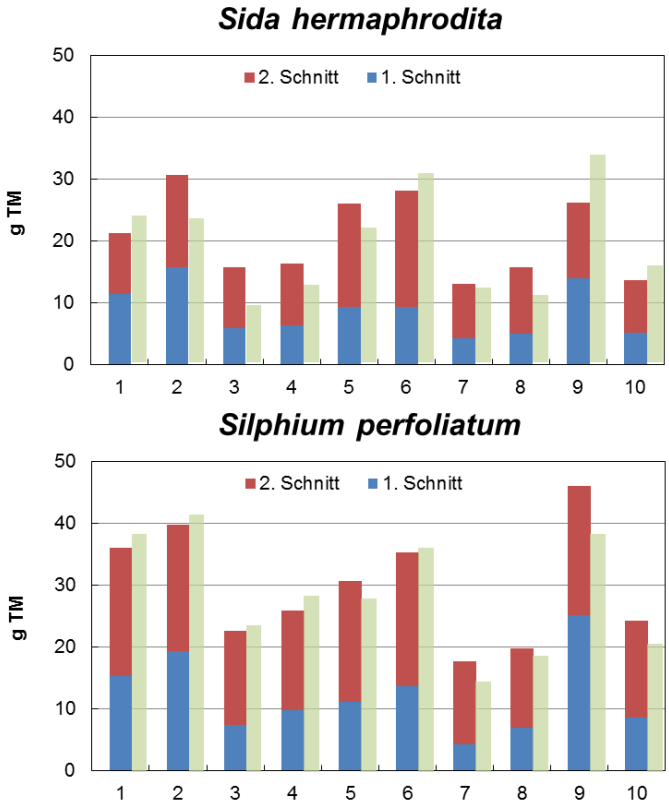

Abbildung 25. Vergleich der kumulativen Biomassen aus dem 1. (blau) und 2. Schnitt (rot) der zweifach geernteten Pflanzen mit den Biomassen von Pflanzen (hellgrün), welche nur einmal zu Ende des Versuchs geerntet wurden.

Für beide Arten galt aber, dass unter ungünstigsten Bedingungen (höhere Temperaturen und geringere Wassergabe) ein Zwischenschnitt die Produktivität gegenüber der nicht geschnittenen Variante erhöhen konnte. Zudem deutete sich ein leichter positiver Effekt der erhöhten CO_2-Konzentrationen an, was wiederum auf eine Verbesserung der Wassernutzungseffizienz zurückgehen dürfte.

3.4.3 Pflanzliche Qualität

Um Aussagen über die energetische Nutzung der beiden Pflanzenarten machen zu können, wurde die Sprossmasse in beiden Jahren verschiedenen Analysen zur pflanzlichen Qualität unterzogen. Dabei wurde diejenige Sprossmasse benutzt, die bei der Ernte von Energieplantagen normalerweise anfällt. Die seneszenten Blätter, die während der Versuche von den Pflanzen abgefallen waren, wurden daher nicht mitanalysiert. Die für eine energetische Verwertung nutzbare Sprossmasse umfasste bei der Silphie wegen des Verbleibs der Pflanzen im Rosettenstadium im ersten Jahr lediglich die grüne Blattmasse und bei der Sida die grüne Blattmasse plus die Stängelmasse. Im zweiten Jahr, in dem mit einjährigen Pflanzen gearbeitet wurde, waren in der nutzbaren Sprossmasse aber wegen der vorangeschrittenen Entwicklung bei beiden Pflanzenarten auch Stängel und Blüten enthalten. Die Ergebnisse beider Jahre zur pflanzlichen Qualität befinden sich im unteren Teil der Tabellen 10 bis 14 und werden im Text nachfolgend ausführlich beschrieben und diskutiert.

Ergebnisse 2012 (Jungpflanzen)

Als bedeutender Qualitätsparameter für Bioenergiepflanzen, sowohl für eine Nutzung als Biogaspflanze als auch für Brennstoffpflanzen, gilt zunächst der **Trockenmasseanteil**. Bei der Endernte am 2. August 2012 (135 Tage nach der Aussaat) hatte die Sida Blatttrockenmassen zwischen 24 und 26%, wohingegen die der Silphie niedriger lagen und zwischen 17 und 21% schwankten.

Bei der Silphie gelten Trockensubstanzgehalte zwischen 25 und 30% als optimal, da die Silage dann nur wenig Sickerwässer bildet (TLL 2008). Die geringen Trockenmassen der erst vier Monate alten Versuchspflanzen gehen vor allem darauf zurück, dass noch keine Stängelmasse gebildet worden war. In der Regel erfolgt im Jahr der Anlage einer Silphienkultur keine Abfuhr von Biomasse. Für eine Biogasnutzung der Sida wurde durch Biertümpfel et al. (2012a, b, c) ein Wert von 35% als optimale Trockenmasse angegeben. Dieser Grenzwert wurde in vorliegender Untersuchung nur in den Blättern der bei erhöhten Temperaturen angezogenen, weiter entwickelten Pflanzen erreicht.

Während die Blatttrockenmasse bei der Sida durch die drei eingesetzten Faktoren signifikant beeinflusst wurde, zeigte sich bei der Silphie nur ein leichter Effekt der Temperaturbehandlung und ein deutlicher Effekt der Wassergabe. Anders als vermutet, hatten aber die weniger bewässerten Pflanzen niedrigere Trockenmassegehalte, was ggf. als Anpassung an Wassermangel zu sehen ist. Auch bildeten die unter trockeneren Bedingungen gewachsenen Blätter der Silphie eine im Mittel kleinere Fläche und wiesen dennoch eine höhere spezifische Blattfläche (mehr Fläche pro Trockenmasseneinheit) auf. Bei der Sida, bei der mittlere Blattfläche und Trockenmasseanteil durch alle drei Faktoren beeinflusst waren, zeigte die spezifische Blattfläche aber nur einen signifikanten CO_2-Effekt und zwar derart, dass die Blätter eine geringere Fläche pro Trockenmasseeinheit bildeten. Dies kann auf die vermehrte Akkumulation von Photoassimilaten unter erhöhten CO_2-Konzentrationen zurückgehen und hat vermutlich Auswirkungen auf die pflanzliche Qualität, da vermutlich mehr Kohlenstoff (höheres C:N-Verhältnis) in die Blätter eingelagert wird.

Als nächster für Bioenergiepflanzen bedeutender Qualitätsparameter wurden die **Aschegehalte** betrachtet. Sie stehen in einem Zusammenhang mit der energetischen Wertigkeit des Pflanzenmaterials und geben Auskunft über die Menge nicht verwertbaren Materials. Die Menge der Trockenmasse abzüglich des Aschegehalts ergibt den Gehalt an **organischer Trockensubstanz** (oTS), auf den die spezifische Methanausbeute bezogen wird.

Bei beiden Pflanzenarten wurden signifikante Effekte der drei Behandlungen auf die Mineralstoffdichte (Aschegehalte) festgestellt, wobei der CO_2-Effekt bei der Silphie nur schwach (p=0.09) signifikant war. Bei beiden Pflanzenarten verringerte sich der Aschegehalt mit zunehmenden Temperaturen und CO_2-Konzentrationen, während sie bei geringeren Wassergaben anstiegen. Dieses Reaktionsmuster geht vorwiegend auf wachstumsbedingte Verdünnungs- bzw. Konzentrationseffekte zurück und auch die **Rohproteinkonzentrationen** zeigen ein solches Verhalten. Eine andere Reaktion weisen aber die **Rohfasergehalte** auf. Bei beiden Arten waren diese unter erhöhten Temperaturen signifikant höher und niedriger bei geringerer Wassergabe. Eine CO_2-Erhöhung hatte lediglich bei der Sida eine schwach signifikante (p=0.087) Erhöhung der Rohfasergehalte zur Folge, während die **Rohfettgehalte** ein gegenläufiges Reaktionsmuster aufwiesen (vgl. Tab. 10 und 11).

Ein graphischer Vergleich zur stofflichen Qualität der beiden Pflanzenarten findet sich in Abb. 26. In dieser werden die unter normalen Temperaturen, heutigen CO_2-Konzentrationen und normalen Wassergaben angezogenen Pflanzen den bei erhöhten Temperaturen kultivierten gegenübergestellt. Neben der prozentualen Zusammensetzung der Sprosstrockenmasse werden auch die absoluten Mengen der fünf betrachteten Fraktionen präsentiert. Größte Unterschiede zwischen den Arten sind die doppelt so hohen Rohfasergehalte bei der Sida und die deutlich höheren Aschegehalte bei der Silphie.

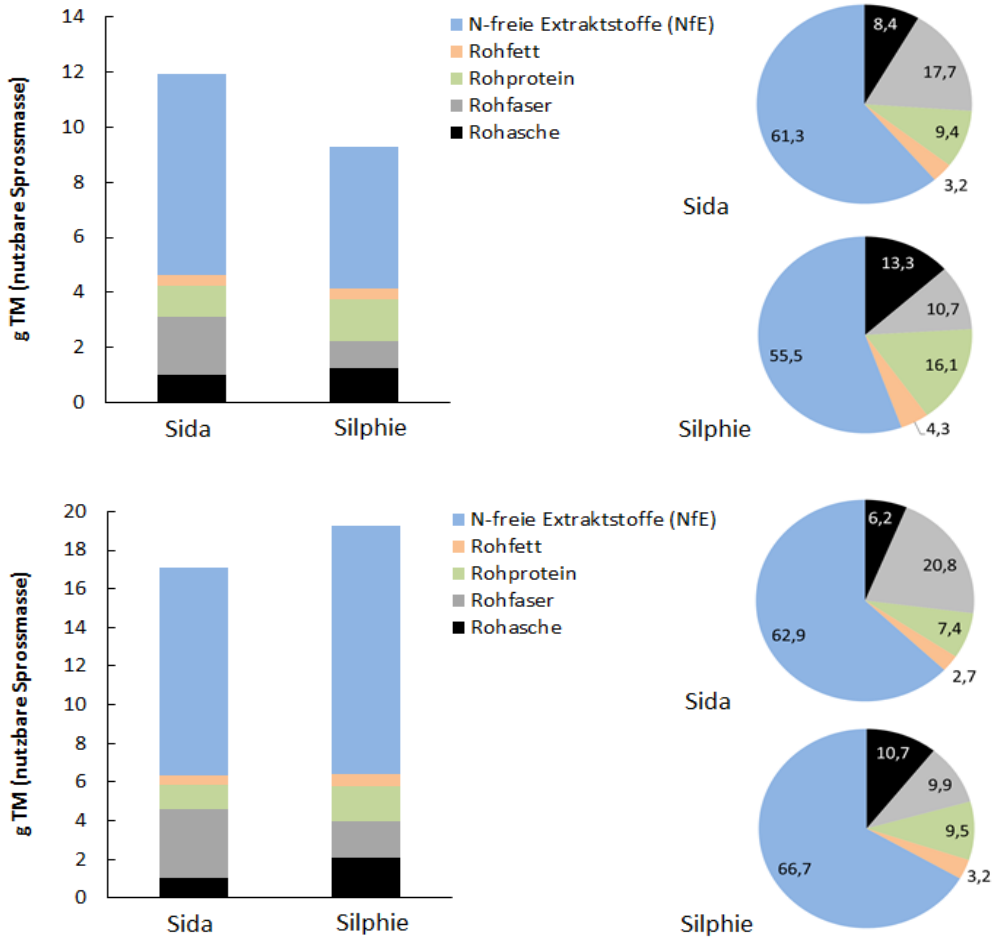

Abbildung 26. Vergleich der bei der Endernte 2012 bestimmten Qualitätsparameter (Weender Analyse) der Sida und Silphie. Oben: Behandlung T1 (normale Temperaturen, 380 ppm CO_2 und normale Wassergaben). Unten: Ergebnisse der Behandlung T5 (wie T1, aber um 4°C erhöhte Temperaturen). Balken links zeigen die Absolutgehalte der fünf Fraktionen in der nutzbaren Sprossmasse, Tortendiagramme rechts deren prozentualen Anteile in der Trockenmasse. Ergebnisse der Qualitätsanalysen in den anderen sechs Behandlungen sind in Tabelle 10 und 11 wiedergegeben.

Schließlich wurde auch die **energetische Wertigkeit** der beiden Pflanzenarten untersucht (Abb. 27). Da für die Gäranalysen 200 g Frischmaterial benötigt wurde, wurden bei der Silphie Mischproben aus vier Wiederholungen pro Behandlung angefertigt, die aus exakt der Hälfte des Sprossmaterials jeder Pflanze bestanden. Von diesem Material wurden in Dreifachbestimmung (technische Wiederholungen) Biogasertragstests durchgeführt. Aufgrund des Fehlens von biologischen Wiederholungen mit Einzelpflanzen der Silphie konnte aber keine Varianzanalyse durchgeführt werden.

Bei der Messung der Energiegehalte bei der Sida war aber genügend Trockenmaterial von einzelnen Pflanzen vorhanden, so dass eine statistische Überprüfung der Behandlungseffekte erfolgen konnte (vgl. Tab. 10 und 11). Diese zeigte, dass unter erhöhten Temperaturen gezogene und damit weiter entwickelte Pflanzen signifikant höhere Energiegehalte hatten. Die bei den unter erhöhten CO_2-Konzentrationen beobachteten geringeren Energiegehalte unterschieden sich aber nicht signifikant von denen der in den anderen Behandlungen gemessenen und auch die unterschiedliche Wassergabe hatte keine Veränderung der Energiegehalte zur Folge.

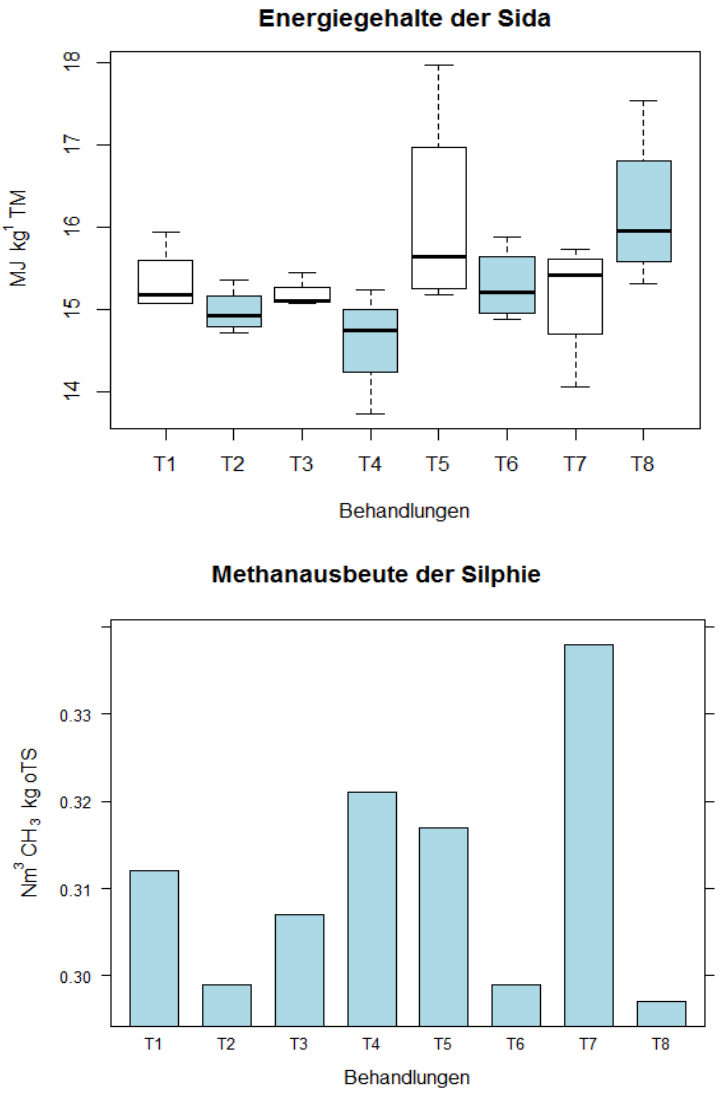

Abbildung 27. Energetische Wertigkeit des bei der dritten Ernte 2012 vorhandenen nutzbaren Sprossmaterials (bei der Sida: Stängel plus grüne Blätter, bei der Silphie: grüne Blätter). Oben: Energiegehalte der Sida. Blaue Balken stellen die Behandlungen mit erhöhten CO_2-Konzentrationen dar. Unten: Methanausbeuten der Silphie als Mittelwerte über drei technische Wiederholungen. Behandlungscodes und die damit bezeichneten Faktorenkombinationen sind in Tab. 11. angegeben.

Bei der Vergärung des Silphiematerials war die spezifische Methanausbeute in der Behandlung T7, sprich in den Pflanzen, die bei höheren Temperaturen und einer verringerten Wassergabe aber normalen CO_2-Konzentrationen wuchsen, am höchsten. Außerdem deutete sich an, dass Jungpflanzen, die unter erhöhten CO_2-Konzentrationen wuchsen, eine schlechtere Methanausbeute aufwiesen. Bezogen auf die Sprossmasse (Ausbeute*Trockenmasse), folgten die Energieerträge der Sida und die Methanerträge der Silphie aber dem gleichen Muster wie die nutzbare Sprossmasse.

Bei den Jungpflanzen zeigten sich Zusammenhänge zwischen der stofflichen Qualität und der energetischen Wertigkeit des Materials in den verschiedenen Behandlungen. Bei beiden Arten standen die Materialeigenschaften mit der Wachstumsförderung in Verbindung. Die Wachstumsförderung beispielsweise durch erhöhte Temperaturen führte zu einer schnelleren Entwicklung der Pflanzen und zu einer weiter vorangeschrittenen Reife des Materials. So war der Rohfasergehalt der Sida positiv mit der Energieausbeute (R^2 0.43) assoziiert, aber auch das Vorhandensein eines größeren Anteils seneszenter Blätter an der Blattmasse zeigte eine positive Beziehung (R^2 0.4) zur Energieausbeute. Umgekehrt war der Anteil der Blattmasse an der nutzbaren Sproßmasse negativ mit der energetischen Wertigkeit der Sida korreliert (R^2 0.69), was die vorrangige Nutzung der Rohfaser reichen Stängelmasse zur Energiegewinnung bestätigt.

Die Methanerträge der Silphie lagen in vorliegender Untersuchung zum Erntezeitpunkt Anfang August mit einem Mittel von 311 Nl pro kg oTS auf einem recht hohen Niveau (vgl. mit Werten in Tabelle 1). Bei der Sida ergaben sich zur Zeit der Ernte Anfang August Energiegehalte im Mittel von 15.35 MJ pro kg, welche vergleichsweise im unteren Bereich der Literaturangaben liegen. Allerdings hatte das völlig abgestorbene Sidamaterial, welches im Winter von den für den Klimaversuch 2013 zu verwendenden Versuchspflanzen geerntet wurde, einen deutlich höheren mittleren Energiegehalt von 17.4 MJ pro kg TM (vgl. Histogramm Abb. 20 im Ersten Zwischenbericht).

Ergebnisse 2013 (einjährige Pflanzen)

Die im zweiten Versuchsjahr mit einjährigen Pflanzen in den Klimakammerversuchen gewonnenen Ergebnisse sind repräsentativ für die landbauliche Praxis, da Energiekulturen zumeist erst im zweiten Standjahr geerntet werden. Wie zuvor bei den Jungpflanzen beobachtet, stand auch bei diesen Pflanzen die energetische Wertigkeit des Materials in einem Zusammenhang mit den Wachstumsbedingungen. Während die höheren Temperaturen in der Etablierungsphase zu einer verstärkten Biomasseproduktion führten, zeigten sich bei den einjährigen Pflanzen erwartungsgemäß deutlichere und negative Wirkungen des Trockenstresses auf das Wachstum und die pflanzliche Qualität.

Zwischenernte 2013

Bis zur Zwischenernte am Tag 96 nach Versuchsbeginn konnten bei der Silphie viele signifikante Effekte der Behandlungen auf Wachstum und pflanzliche Qualität festgestellt werden (Tabelle 13). Bei der Sida hingegen waren bis zur Zwischenernte lediglich zwei signifikante Wirkungen der erhöhten CO_2-Konzentration zu beobachten: eine Erhöhung der Stängelmasse und eine Reduktion des Rohproteingehalts im Spross. Die gleichen Wirkungen wurden bei der Silphie beobachtet, jedoch zeigten hier auch die Blätter signifikante Veränderungen bei erhöhten CO_2-Konzentrationen. So förderte CO_2 die gesamte Blattfläche, Fläche pro Blatt und die Blattmasse, während der Anteil der Blattmasse am Spross verringert wurde. Gleichzeitig hatten die unter höheren CO_2-Konzentrationenen gezogenen Pflanzen der Silphie in ihrem Spross geringere Aschekonzentrationen und höhere Rohfasergehalte. Der geringere Anteil der Blätter an der Sprossmasse und Veränderungen

in der Sprossqualität dürften eher mit der schnelleren Entwicklung der Pflanzen und der Allokation von mehr Biomasse in den Stängel zu tun haben als mit einer verstärkten Seneszenz von Blättern. Der relative Anteil der seneszenten Biomasse am Spross wurde bis zur Zwischenernte nur durch unterschiedliche Temperaturen und Wassergaben signifikant verändert.

Der Vergleich der beiden Arten bestätigte die im ersten Jahr bei Jungpflanzen festgestellten generellen Unterschiede in der pflanzlichen Qualität des Sprossmaterials. Während die Silphie höhere N-, Fett- und Aschekonzentrationen (Mineralstoffdichte) als die Sida aufweist, hat letztere deutlich höhere Rohfasergehalte als die Silphie. Die Unterschiede sind zum Teil auf die unterschiedliche Allokation von Biomasse im Spross zurückzuführen. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil der Blattmasse am Gesamtspross (vgl. Abb. 24, Kapitel 3.4.2) eine gute Näherung für Unterschiede der Materialqualität darstellt.

Entsprechend ihres hohen Verholzungsgrades enthielt die Sida deutlich mehr Lignin und Hemizellulosen als die Silphie. Ein hoher Gehalt am hochpolymeren Lignin geht beispielsweise mit einer hohen Energiedichte einher (Mendu et al. 2011), ist aber bei schnellwüchsigen Arten deutlich niedriger als bei langsam wüchsigen (Novaes et al. 2010). Bei der Sida war aber kein Effekt der eingesetzten Behandlungen auf die Kohlenhydratfraktionen zu erkennen, während bei der Silphie unter erhöhten Temperaturen etwas mehr Lignin gebildet wurde und bei Trockenstress weniger Zellulosen und tendenziell mehr Hemizellulosen (Differenz aus NDF und ADF). Ein Effekt der erhöhten CO_2-Konzentrationen auf die Zusammensetzung der Kohlenhydrate war aber zur Zwischenernte nicht festzustellen.

Endernte 2013

Die bei der Endernte in nicht zwischendurch geschnittenen Pflanzen gemessenen **Trockenmasseanteile** schwankten bei der Silphie in den Behandlungsmitteln zwischen 24.4 und 32.3 % und bei der Sida zwischen 33.8 und 42.4 %. Die Werte lagen damit bei der Silphie in einem optimalen Bereich für die Herstellung von Biogas (s. oben), bei der Sida waren sie aber noch viel zu gering für die Nutzung als Brennstoff. In den zwischendurch geschnittenen Pflanzen wurden in dem Wiederaufwuchs zur Endernte deutlich geringere Trockenmassenanteile gefunden (bei der Silphie sogar unter 25%), was für einen schlechteren Gasertrag des nachgewachsenen Materials und höhere Sickerverluste spricht.

Bei beiden Arten wurden in den nicht zwischendurch geschnittenen Pflanzen dieselben Reaktionsmuster vorgefunden, nämlich keine Effekte der CO_2-Behandlung, aber signifikante Effekte der unterschiedlichen Temperaturen und Wasserbehandlungen (vgl. Tabellen 12 bis 14). Beim zwischen Tag 96 und Tag 150 erfolgten Wiederaufwuchs war lediglich ein positiver Temperatureffekt zu verzeichnen. Wie bereits bei den Jungpflanzen im Versuch 2012 vorgefundenen Ergebnissen, wiesen die Pflanzen in den wärmeren und mit weniger Wasser versorgten Behandlungen geringere Trockenmasseanteile auf. Diese als Anpassung der Pflanzen an Trockenheit zu wertenden Reaktionen gehen maßgeblich auf Veränderungen der pflanzlichen Allokation zurück. Durch den verstärkten Abwurf von seneszenten Bättern (nicht mehr in der nutzbaren Sprossmasse enthalten) unter trockenen Bedingungen und der Ausprägung kompakter oder dickfleischiger Blätter verringert sich die Abgabe von Wasserdampf an die Atmosphäre. Gleichzeitig führen solche Reaktionen zur Verschiebung von Blattmasseanteilen und damit zu Veränderungen der Materialqualität der Energiepflanzen (s. unten).

Die **Brennwerte** der Sida lagen zur Endernte im Mittel unter 14.8 MJ kg^{-1} TM, was deutlich unter den in Tabelle 1 berichteten Werten für zu Ende des Winters geernteten Materials

liegt und auf den noch hohen Blattmassenanteil am Spross zurückgeht. Lediglich die verringerte Wasserzufuhr führte zu einem signifikant verringerten Brennwert.

Die **spezifischen Methanausbeuten** (SME) der einjährigen Silphie-Pflanzen lagen im Mittel über alle Behandlungen mit 0.28 m^3 kg^{-1} organische Trockensubstanz (oTS) unter den bei Jungpflanzen gemessenen Werten aber in derselben Größenordnung wie die in der Praxis gemessenen Werte (vgl. Tab. 1). Die Ergebnisse wurden auch mit berechneten Werten der Gas- bzw. Methanausbeute von Kosubstraten nach der Methodik der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LFL 2014) verglichen. Dabei werden den vier Fraktionen der organischen Trockensubstanz (Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und stickstofffreie Extraktstoffe) unterschiedliche Verdauungsquotienten und ein unterschiedliches Gasbildungspotential zugeordnet. Man kann somit die theoretische Gasbildungsrate und den Methangehalt des Gases verschiedenster Pflanzenarten, für die Futtermitteltabellen vorliegen, näherungsweise ermitteln. Insgesamt lagen die berechneten Werte mit im Mittel 0.28 m^3 kg oTS in derselben Größenordnung wie die gemessenen Methanausbeuten, jedoch ließ sich zwischen den berechneten und gemessenen Werten keine Beziehung erkennen. Im Vergleich zur Berechnung der Gasbildungsrate aus Futtermittelwerten waren die NIRS Daten deutlich besser zur Vorhersage von spezifischen Methanerträgen geeignet (s. Kapitel 3.4.4).

In nachfolgender Tabelle werden schließlich die Brennwerte der Sida bzw. die Methanausbeuten der Silphie in Beziehung zu anderen Parametern gesetzt, um mögliche Zusammenhänge zwischen den Allokationsmustern bzw. der stofflichen Qualität und der energetischen Wertigkeit des Materials aufzuzeigen.

Tabelle 15. Korrelationskoeffizienten (Pearson Produkt-Moment-Korrelation, *r)* zwischen der energetischen Wertigkeit des Pflanzenmaterials und wichtiger im Versuch erhobenen Parameter.

	Spez. Methanertrag der Silphie	**Energiegehalt der Sida**
Stängelzahl (n Pflanze^{-1})	0,24	0,08
Grüne Blätter (n Pflanze^{-1})	**0,62**	0,37
Blattfrischgewicht	**0,71**	0,30
Blattfläche	**0,60**	0,25
Blütenfrischgewicht	-0,13	**0,56**
Stängelfrischgewicht	**0,62**	**0,62**
Sprossfrischgewicht	**0,72**	**0,61**
Blatttrockengewicht	**0,60**	0,34
Blütentrockengewicht	-0,11	0,48
Stängeltrockengewicht	0,44	**0,61**
Masse der abgeworfenen Blätter	-0,08	**0,56**
Sprosstrockengewicht	**0,56**	**0,58**
Anteil der seneszenten Blätter an Sprossmasse	**-0,64**	-0,22
Trockenmasseanteil	-0,44	0,27
Blattmassenanteil am Spross	-0,07	**-0,59**
Stängelmassenanteil am Spross	0,09	**0,55**
Proteingehalt	**-0,60**	-0,35
Aschegehalt	-0,25	**-0,74**

Bei beiden Arten deuteten sich positive Zusammenhänge zwischen der gebildeten Sprossmasse und der energetischen Wertigkeit des Materials pro Masseneinheit an. Dies bestätigt zum einen, dass eine hohe Energieausbeute nur bei günstigen

Wachstumsbedingungen (gute Versorgung mit Nährstoffen und Wasser) realisiert werden kann. Auf der anderen Seite ist aber davon auszugehen, dass die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt gebildete Trockenmasse auch von der zum Zeitpunkt der Ernte erreichten Entwicklung bzw. Phänologie der Pflanze abhängt. So zeigte sich bei der Sida, dass der Energiegehalt negativ mit den Blattmasseanteilen (r = -0.59) korrelierte bzw. mit dem Blattwurf insgesamt anstieg. Bei der Silphie wurde dagegen kein Zusammenhang zwischen den spezifischen Methanerträgen und den Blattmassenanteilen festgestellt, jedoch wirkte sich ein höherer Anteil seneszenter Blätter an der Sprossmasse negativ auf den Methanertrag aus (r = - 0.64).

Bei der Sida tritt die Reife des als Festbrennstoff genutzten Materials erst nach dem kompletten Absterben der Blätter bzw. nach dem Blattwurf ein. Bei der Silphie spielen sowohl die Blatt- als auch die Stängelfraktion eine wichtige Rolle bei der Konversion zu Biogas, jedoch sollten die Blätter noch nicht seneszent sein. Zur Problematik der Auswahl bzw. Festlegung eines optimalen Erntezeitpunkts bei der Silphie siehe auch Mast et al. (2014) und Hartmann et al. (2014). Während der Aschegehalt bei der Sida größeren negativen Einfluss auf die Energieausbeute als bei der Silphie hatte, war bei der Silphie der Proteingehalt stärker negativ mit der Energieausbeute (spezifischer Methanertrag) korreliert. Hohe Asche- und Proteingehalte im Spross gehen hauptsächlich auf das Vorhandensein von aktiven grünen Blättern zurück. Bei der Verbrennung führt ein hoher Anteil mineralischer Komponenten zu verringerten Energieausbeuten. Gleichermaßen führt ein hoher Anteil von Proteinen in der organischen Substanz aufgrund des geringen Verdauungskoeffizienten von Rohprotein - laut LFL (2014) liegt er bei 69.97% - zu geringeren spezifischen Methanausbeuten.

Vergleich der Heizwerte der Sida (als Festbrennstoff) und der Silphie (als Biogas)

Bei einer mittleren spezifischen Methanausbeute von 0.28 m^{-3} kg^{-1} oTS und einer organischen Trockensubstanz von im Mittel 88% können pro kg Trockenmasse der Silphie 0.246 m^{-3} kg^{-1} Methan gewonnen werden. Bei einem mittleren Ertrag von 15 t ha^{-1} Trockenmasse beträgt der Methanertrag somit 3690 m^{-3} pro Hektar. Dieser Wert liegt innerhalb des von der FNR (2014) angegebenen Schwankungsbereichs von 2871 bis 3800 und unter dem Methanertrag von Mais (3900 bis 5900 m^{-3} pro Hektar).

Der Heizwert von Methan liegt bei 36 MJ m^{-3} bzw. 50 MJ kg^{-1} (Dichte von 0.72 kg m^{-3} bei 0°C und 1013 hPa). Legt man diese Zahlen zugrunde, könnte man aus dem Biogas einer einen Hektar großen Silphienkultur eine Heizleistung von 132840 MJ erreichen.

Bei der Sida würde man aus der Verbrennung des trocken Stängelmaterials (im Mittel ca. 8 t ha^{-1}TM und einem Heizwert von 17 MJ kg^{-1}) 136000 MJ erhalten. Damit wäre die Sida trotz ihrer geringen Hektarerträge energetisch als ergiebigere Energiepflanze einzustufen, jedoch muss generell die Art der Nutzung (Produktion von Wärme und/oder Strom im BHKW) sowie die Effektivität des eingesetzten Konversionsverfahrens berücksichtigt werden.

Berücksichtigt man zudem auch die bei der energetischen Nutzung anfallenden Reststoffmengen, bei der Silphie die Gärreste und bei der Sida lediglich die Asche, würde sich der Vorteil der Sida weiter erhöhen. Ferner dürften auch die ökologischen Vorteile, weniger Nährstoffentzüge und vermutlich eine bessere Treibhausgas- und Humusbilanz der Sida, bei der langfristen Nutzung von Energiepflanzen zu Buche schlagen. Bei der Sida ist zudem anzumerken, dass das Material nicht nur energetisch, sondern auch als Rohstoff (z.B. in OSB-Platten) verwendet werden kann. Damit könnte sich die Anlage ausdauernder Sida-Kulturen auf marginaleren Standorten ebenfalls als perspektivreich erweisen.

3.4.4 Ergebnisse der NIRS-Analysen

Von allen zur Endernte 2013 am Tag 150 nach Versuchsbeginn geernteten Sprossmassen der ungeschnittenen und geschnittenen Pflanzen wurden NIRS-Analysen durchgeführt. Das fein vermahlene und getrocknete Material wurde in einer Doppelbestimmung im Wellenbereich 1200 bis 2400 nm gescannt und die erhaltenen mittleren Spektren wurden zur weiteren Analyse der Zusammenhänge zwischen den spektrometrischen Eigenschaften und der Materialqualität genutzt.

Abb. 28 zeigt den Vergleich der mittleren Spektren der beiden Energiepflanzenarten der ungeschnittenen Pflanzen und des bei der Endernte geernteten Wiederaufwuchses der am Tag 96 geschnittenen Pflanzen. Beide Arten weisen einen peak im Bereich der Ersten Obertonbande bei 1900 nm auf, welche vor allem durch C=O-Doppelbindungen charakterisiert wird. Neben der insgesamt stärkeren Absorption im NIR-Bereich der Silphie im Vergleich zur Sida, ist aber auch deutlich zu erkennen, dass der zwischen Tag 96 und 150 durch die Pflanzen gebildete Wiederaufwuchs vor allem bei der Silphie eine verringerte Absorption aufweist. Letzteres deutet auf verschiedene Materialqualitäten jungen und alten Pflanzenmaterials und möglicherweise unterschiedliche energetische Wertigkeiten hin.

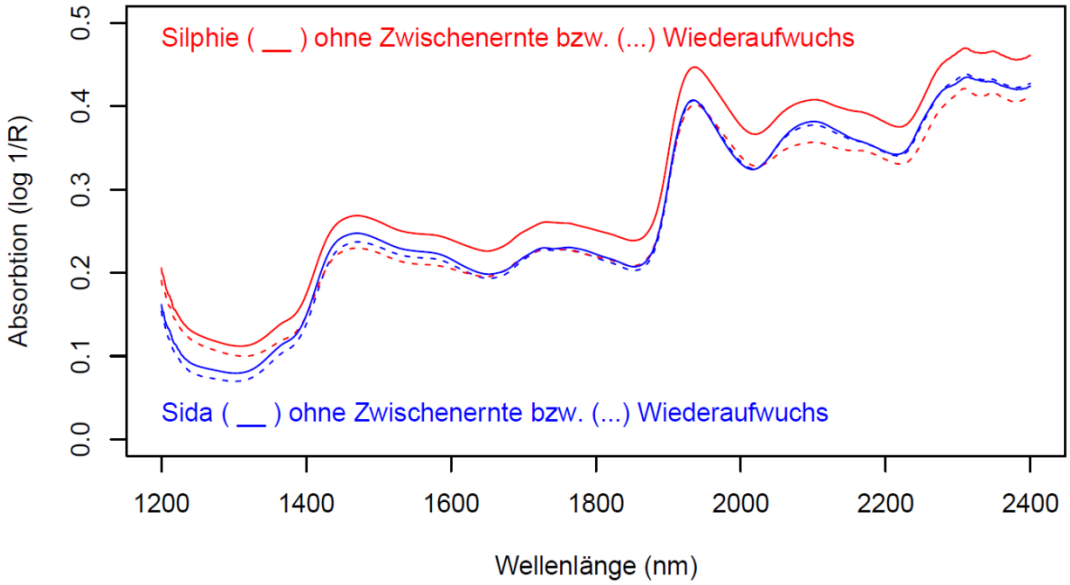

Abbildung 28. Mittlere NIRS-Spektren der nutzbaren Sprossmasse der Sida und der Silphie differenziert nach ungeschnittenen Pflanzen (Tag 0 bis 150) und des Wiederaufwuchses (Tag 96 bis 150) von zwischenzeitlich geernteten Pflanzen.

Im nächsten Schritt wurden Mittelwerte der NIRS-Spektren der trockenen bzw. feuchten Behandlungen sowie der bei unterschiedlichen CO_2-Behandlungen in den Klimakammern und im Freiland gezogenen Pflanzen verglichen (Abb. 29). Dies sollte einen ersten Eindruck darüber geben, welche der verschiedenen Behandlungen größten Einfluss auf die Sprossqualität hatte.

Während die Sprosse von Pflanzen, die unter reduzierter Wassergabe gezogen worden waren, eine insgesamt höhere NIR-Absorption aufwiesen als die Sprosse gut mit Wasser versorgter Pflanzen, unterschieden sich die Spektren von Pflanzen, die unter erhöhten CO_2-Konzentrationen gezogen worden waren, nur unwesentlich von denjenigen der bei 380 ppm CO_2 kultivierten Pflanzen. Im Wellenbereich von 1200 bis 1600 nm absorbierten aber die unter Freiluftbedingungen gezogenen Pflanzen beider Arten stärker als das in den

Klimakammerversuchen gewonnene Material. Der betreffende NIR-Bereich befindet sich in der zweiten Obertonbande (vgl. Schema der NIR Spektren bei ASD Analytical Spectral Devices, http://discover.asdi.com/Portals/) und ist z.B. mit Methylgruppen assoziiert.

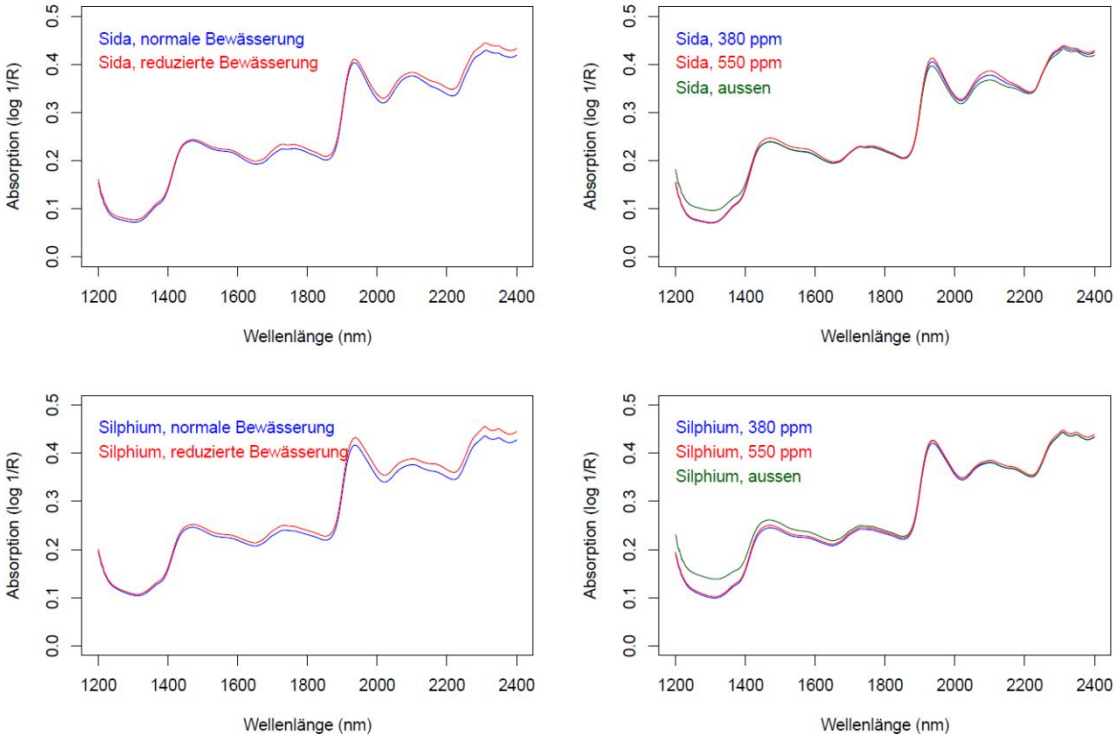

Abbildung 29. Bezüglich Wasserversorgung (links) und CO_2-Behandlung (rechts) gemittelte NIRS-Spektren der nutzbaren Sprossmasse der Sida (oben) und der Silphie (unten). Grüne Kurven rechts beziehen sich auf die unter Freiluftbedingungen kultivierten Pflanzen.

Die Sprosszusammensetzung wurde dann in Beziehung zu den NIR-Spektren gesetzt, da der Anteil von Blättern am Spross (Blattmassenfraktion, BMF) gut geeignet sein dürfte, die Wertigkeit des Materials zu beschreiben. So haben beispielsweise Blätter höhere Protein- und Aschegehalte als hoch polymere bzw. lignifizierte Stängel. Die Verteilung der einzelnen Fraktionen in der Gesamt-Sprossprobe bzw. die chemische Zusammensetzung des Sprossmaterials dürfte sich NIRS-analytisch gut differenzieren lassen.

Die Daten der relativen Blattmasse (Anteil am Spross) wurden mittels der PLSR-Methode (vgl. Kapitel 2.4) auf die NIR Spektren aller Proben einer Art gefittet. Die abgeleiteten Modelle erklärten über 98% der Varianz der Originaldaten und wurden als genügend aussagekräftig erachtet, um zur Vorhersage der Blattanteile am Spross genutzt werden zu können. Nachfolgende Abbildung zeigt das Ergebnis einer Kreuzvalidierung zwischen modellierten und gemessenen Daten. Bei beiden Arten deuten die hohen Bestimmtheitsmasse darauf hin, dass die NIRS-Analytik prinzipiell gut geeignet ist, die Beschaffenheit und energetische Wertigkeit von Energiepflanzenmaterial zu beschreiben, ohne dass aufwändige nasschemische Verfahren eingesetzt werden müssen. Der Ansatz muss aber weiter verfeinert werden und sollte im Rahmen von Ringversuchen beispielsweise über den VDLUFA für Energiepflanzen kalibriert werden.

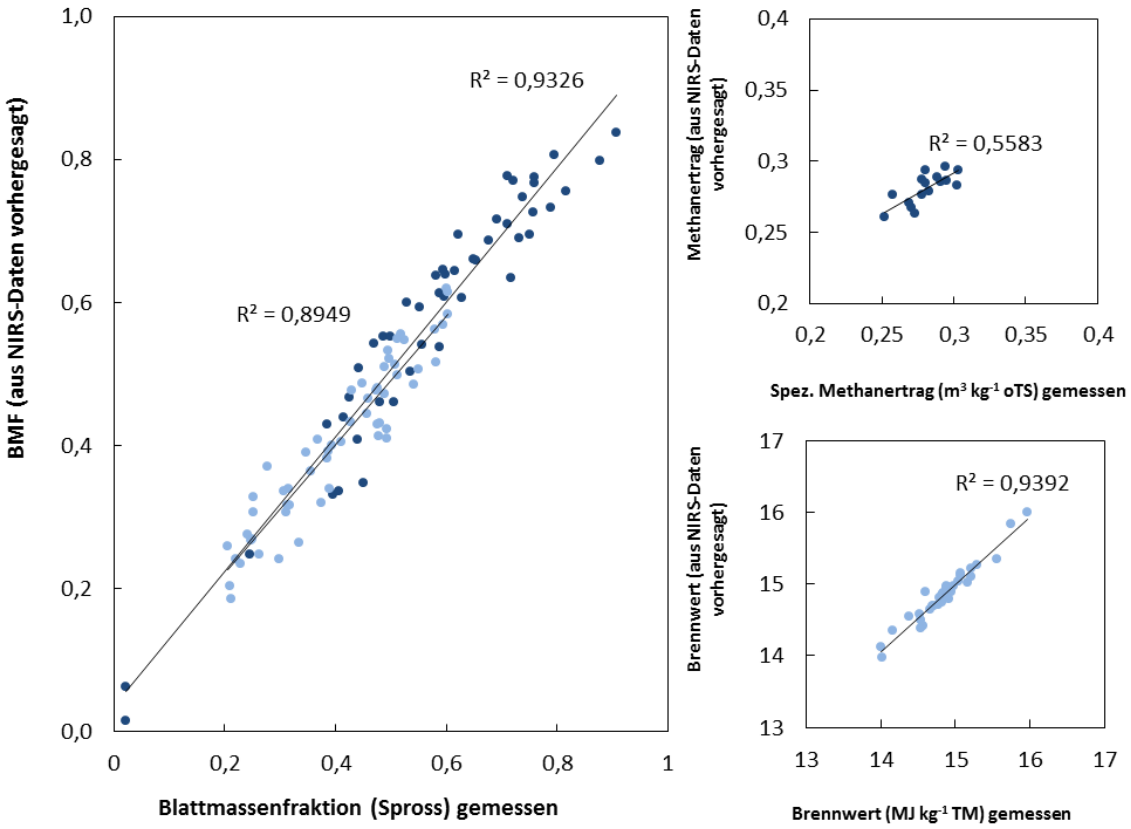

Abbildung 30. Links: Zusammenhänge zwischen modellierten und gemessenen Blattmassenfraktionen der in den Versuchen 2013 genutzten Energiepflanzenarten *Sida hermaphrodita* (●) und *Silphium perfoliatum* (●). Die Modellierung erfolgte über die in den Sprossproben der Endernte gemessenen NIR-Spektren. Oben rechts: Zusammenhang zwischen modellierten und gemessenen spezifischen Methanerträgen bei der Silphie. Unten rechts: Zusammenhang zwischen modellierten und gemessenen Brennwerten der Sida.

3.5 Untersuchungen zu Blatteigenschaften

Um Pigmentkonzentrationen, SPAD, spezifische Blattfläche (SLA), Stickstoffkonzentrationen (N%) und Isotopendiskriminierung ($\delta^{13}C$) der Arten unter Freilandbedingungen gegenüberstellen zu können, wurden Pflanzen der Herkünfte 3 und 8 aus dem im Versuchsgarten durchgeführten Herkunftsvergleich (s. Kapitel 3.2) genutzt.

Von jeder Art wurden am 5. Juli 2013 aus voll entfalteten Blättern kleine runde Blattscheiben (2.83 cm^2) unterschiedlicher Grüntöne ausgestanzt. Nach der Messung der SPAD-Werte als Maß der Blattgrüne wurden die Proben in 3 mL des Lösungsmittels Dimethylformamid (DMF) gegeben, um die Blattpigmente zu extrahieren. Die Extrakte wurden über Nacht kühl und dunkel gelagert und dann am Spektralphotometer bei den Wellenlängen 664.5 und 647 nm gemessen. Die Methode und Berechnung von Chlorophyll a und b basierten auf Inskeep & Bloom (1985). Bei weiteren 2.83 cm^2 großen Blattscheiben wurden neben SPAD auch Frisch- und Trockenmassen bestimmt, um neben dem Flächenbezug auch einen Massenbezug zu ermöglichen. Nach dem Mahlen wurde das Material mittels Isotopenmassenspektrometrie (IRMS) auf Kohlenstoff-, Stickstoff- und ^{13}C-Isotopengehalte untersucht. Letztes lässt Aussagen über die Wassernutzungseffizienz von Pflanzen zu.

Abbildung 31 zeigt die ermittelten linearen Zusammenhänge zwischen SPAD-Werten und Gesamtchlorophyll bzw. N-Konzentrationen und C:N-Verhältnissen. Die Ergebnisse haben Relevanz für die Praxis, da mit den hier präsentierten Eichfunktionen von SPAD-Messungen auf Chlorophyll- und Stickstoffkonzentrationen geschlossen werden kann. Die Bestimmtheitsmaße (R^2) der Regressionen zwischen SPAD und Chlorophyll waren wesentlich höher als die der Regressionen zwischen SPAD und Blattstickstoff, aber auch Werte über 0.7 deuten auf eine genügend große Aussagegüte bei der Beurteilung potentiellen Nährstoffmangels hin. Bei der Silphie ist die Beziehung zwischen SPAD und Chlorophyll wesentlich steiler als bei der Sida und erreicht wesentlich höhere Werte, was auf die vergleichsweise dickeren und tiefgrünen Blätter zurückgeht. Demgegenüber sind bei den Steigungen der Regressionen zwischen SPAD und N keine großen Unterschiede zwischen den beiden Arten ersichtlich und beide Arten decken einen Bereich zwischen 1 und 4% Blattstickstoff ab. Auf der anderen Seite sind die C:N Verhältnisse in den Blättern der Silphie etwas weiter als die in Sida-Blättern gemessenen. Dies deutet auf eine schwerere Abbaubarkeit von Silphienblätter hin und auch die höheren spezifischen Blattflächen (d.h. dünnere Blätter) und insgesamt kürzere Lebensdauer der Sidablätter lassen auf eine höhere Rezyklierbarkeit der photosynthetisch aktiven Organe schließen. Die Stängel der Sida haben allerdings viel weitere C:N Verhältnisse als die Blätter und erreichen Werte von >30 (Ergebnisse der Messungen aus dem CO_2-Versuch 2012).

Schließlich wurden in denselben Proben neben C und N auch noch Messungen der Isotopendiskriminierung durchgeführt. Das Verhältnis zwischen dem schweren ^{13}C und dem leichten ^{12}C (ausgedrückt als $\delta^{13}C$-Wert) lässt Aussagen über die Wassernutzungseffizienz (water use efficiency, WUE) von Pflanzen zu. Eine stärkere Diskriminierung (stärker negativer $\delta^{13}C$-Wert) deutet auf eine schlechtere Wassernutzungseffizienz von Pflanzen hin. Da beide Arten unter denselben Bedingungen aufwuchsen, spricht die insgesamt stärkere Diskriminierung des schwereren Isotops in den Blättern der Sida (im Mittel -30.24 ‰) für eine schlechtere WUE als bei der Silphie, die einen $\delta^{13}C$-Wert von im Mittel -27.3 ‰ aufwies. Blätter haben aber mitunter andere Isotopensignaturen als andere Sprossteile, so dass weitere Aussagen zu Isotopendiskriminierung auf der gesamten Sprossmasse beruhen sollten.

Interessanterweise zeigte die Isotopendiskriminierung eine deutliche Beziehung zu den spezifischen Blattflächen der untersuchten Blattproben (Abb. 31 d). Dies lässt vermuten, dass die dünneren Blätter der Sida weniger stark ausgeprägte Mechanismen der Wasserkonservierung bzw. Transpirationsverminderung besitzen als die Silphie. Bestätigt wird dies auch durch die insgesamt höhere Stomatadichte bei der Sida (530 pro mm^2) als bei der Silphie (220 pro mm^2). Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Blättern der beiden Arten wurden im Anhang des ersten Zwischenberichts gezeigt (Franzaring et al. 2013). Aber auch das Vorkommen der beiden Arten in unterschiedlichen Regionen Nordamerikas (Silphie in Prärien und Sida an Flussufern, vgl. 1. Zwischenbericht Kapitel 1.1) deuten auf eine unterschiedliche Wasserökonomie und ein unterschiedliches ökologisches Verhalten der beiden Arten hin. Weitere Ergebnisse zum Gaswechsel und zu Photosyntheseraten der beiden Arten finden sich in Franzaring et al. (2014).

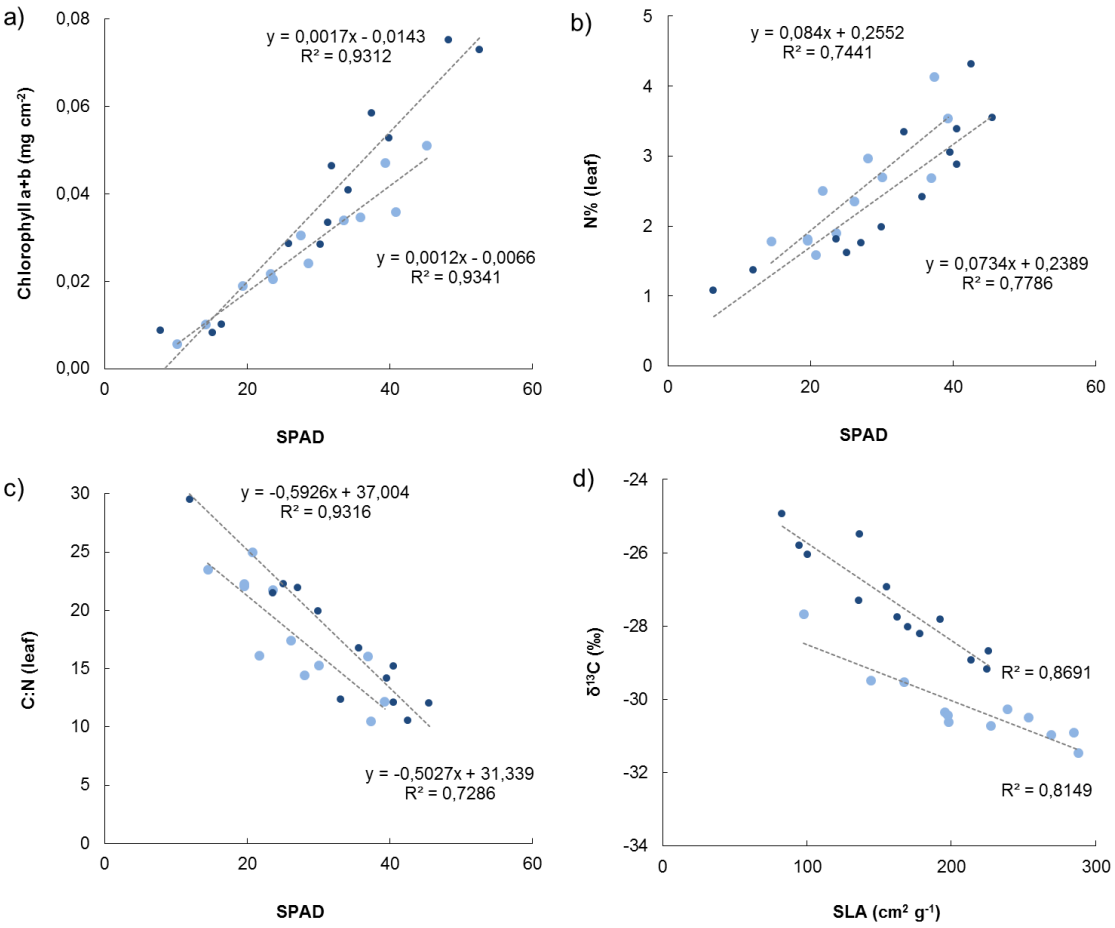

Abbildung 31. Zusammenhänge zwischen SPAD-Messungen und Gesamtchlorophyll (a), Stickstoffkonzentrationen (b) und C:N-Verhältnissen (c) sowie Zusammenhang zwischen spezifischer Blattfläche (SLA) und der Isotopendiskriminierung (d) bei *Sida hermaphrodita* (●) und *Silphium perfoliatum* (●).

3.6 Untersuchungen zur Nährstoffrückverlagerung

Um die im Herbst einsetzende Rückverlagerung von Ressourcen (Einziehen) in den Wurzelstock unter Freilandbedingungen beurteilen zu können, wurden Pflanzen der Herkünfte 3 und 8 aus dem im Versuchsgarten durchgeführten Herkunftsvergleich (s. Kapitel 3.2) genutzt. Ab dem 25.09.2013 wurden drei Zwischenernten zufällig ausgewählter Stängel durchgeführt, um die Rückverlagerung von Nährstoffen im Herbst beurteilen zu können. Dazu wurden die reproduktiven Organe, die Blätter und in verschiedenen Höhen des Stängels jeweils 20 cm lange Stängelstücke als einzelne Fraktionen geerntet. Nach der Bestimmung der Frisch- und Trockenmasse wurden in allen Fraktionen die Aschegehalte bestimmt, um die zeitlichen Veränderungen der Mineralstoffdichte beurteilen zu können.

Diese Betrachtungen haben Praxisrelevanz, da zur energetischen Nutzung vor allem der Sida als Brennstoff das Material möglichst geringe Aschegehalte haben sollte. Es erscheint daher sinnvoll, Ernten erst durchzuführen, wenn ein bestimmter Aschegehalt unterschritten ist. Betrachtungen zur Nährstoffrückverlagerung sind aber auch für die Ermittlung optimaler Düngeempfehlungen wichtig, da die Menge der zu Ende der Vegetationsperiode in den Wurzelstock zurückverlagerten Mineralstoffe bei der in Frühjahr durchzuführenden Nährstoffgabe berücksichtigt werden sollte.

Während an den drei im Herbst erfolgten Ernteterminen die Blattmasse der Silphie nur leicht von ca. 25 bis 20% der Stängelmasse abnahm, waren bei der Sida am dritten Erntetermin (11. November 2013) keine Blätter mehr vorhanden. Bei der Fraktion der reproduktiven Organe (Blüten und Samen) war Folgendes zu beobachten: Bei der Sida machte diese Fraktion maximal 12% der Sprossmasse aus und ging zur letzten Ernte nur leicht auf ca. 10% zurück. Bei der Silphie machte die Blütenmasse bei der ersten und zweiten Ernte 14 und 18% der Sprossmasse aus, ging dann aber auf 4% zurück, was auf den Ausfall reifer Samen vor der letzten Ernte hindeuten könnte.

Bei beiden Arten stieg unabhängig von der betrachteten Fraktion der Trockenmasseanteil von der ersten bis zur dritten Ernte an, was auf das allmähliche Absterben des Sprosses im Herbst hindeutet. Allerdings war der Trockenmasseanteil bei der Silphie (im Mittel aller Fraktionen ca. 30%) anfangs noch geringer als bei der Sida, welche bereits bei der ersten Ernte Ende September einen Trockenmasseanteil von 40% aufwies. Bei beiden Arten ging aber die Restfeuchte bei der dritten Ernte auf unter 40% zurück, wobei die oberen Stängelfraktionen stärker abgetrocknet waren als die darunter folgenden.

Bezüglich der zu verschiedenen Zeiten in den unterschiedlichen Fraktionen bestimmten Aschekonzentrationen war bei beiden Arten deutlich zu sehen, dass Blätter Aschekonzentrationen von über 15% aufwiesen. Während bei der Sida von der ersten bis zur dritten Ernte die Aschekonzentrationen in allen Fraktionen abnahmen, war dies bei der Silphie nur bei den obersten Stängelpartien ausgeprägt. Insgesamt hatte die Sida Aschekonzentrationen von nur ca. 3%, während die Silphie Werte von ca. 4.5% aufwies. Anders als erwartet, war aber bei keiner der Arten eine Differenzierung der Aschekonzentrationen in den Einzelfraktionen bzw. ein Höhengradient der Mineralstoffdichte festzustellen. Es ist also davon auszugehen, dass bei den Mineralstoffen keine aktive Rückverlagerung über das Phloem stattfindet, sondern diese gleichmäßig aus der abgestorbenen Biomasse remobilisiert werden. Anders dürfte dies aber bei den Zuckern und Aminosäuren aussehen, die zu Ende der Vegetationsperiode über das Phloem in den Wurzelstock verlagert werden.

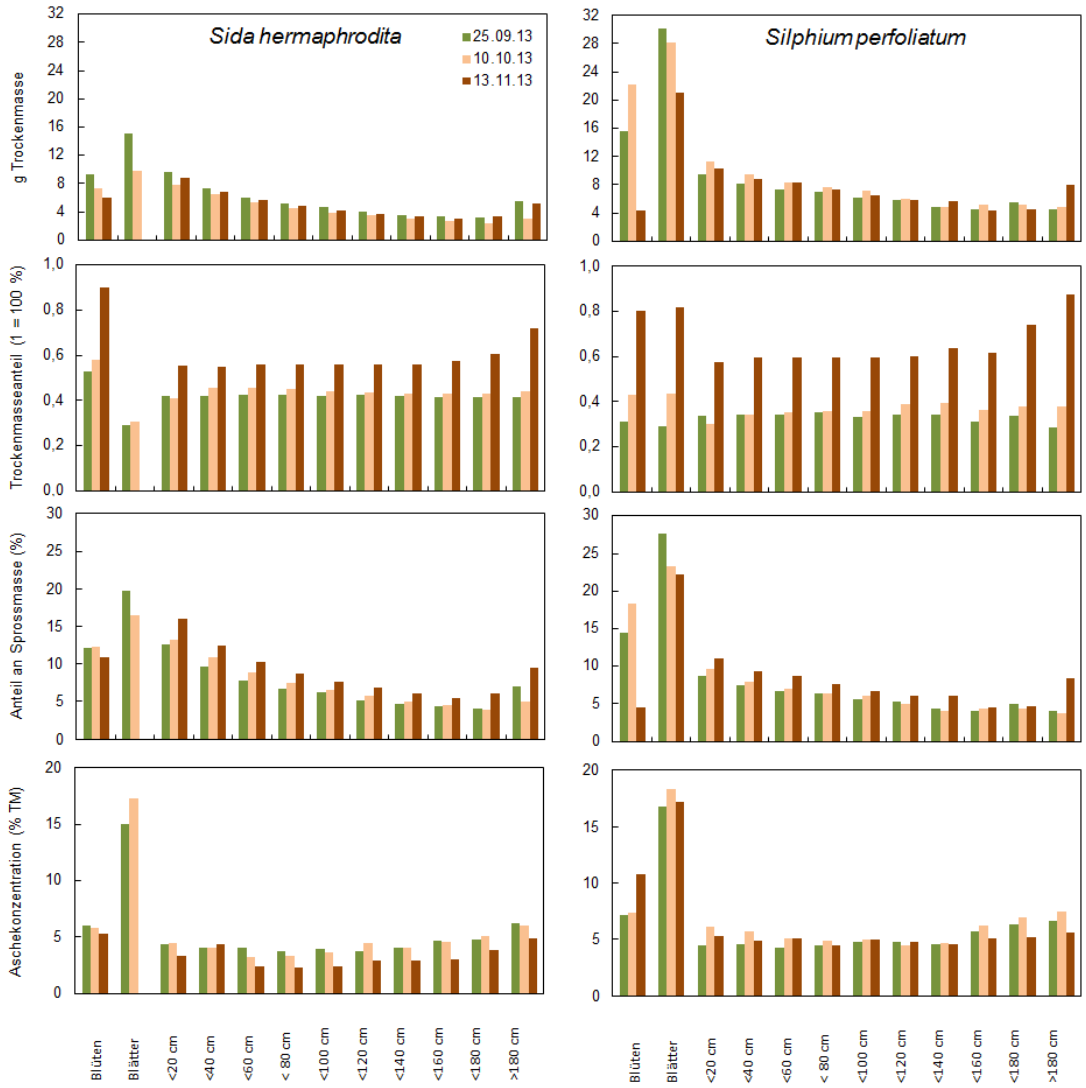

Abbildung 32. Ergebnisse der Untersuchungen zur Rückverlagerung von Ressourcen bei Sida (links) und Silphie (rechts) an den drei nacheinander erfolgten Ernten. Dargestellt sind die in unterschiedlichen Fraktionen (Blüten, Blätter und zehn Stängelabschnitte) ermittelten Trockenmassen (oben), Trockenmasseanteile (2. Reihe von oben), Anteil der jeweiligen Fraktion am Gesamtspross (2. Reihe von unten) und die Aschegehalte (unten).

4. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Experimente mit den beiden neuartigen Energiepflanzenarten *Silphium perfoliatum* L. und *Sida hermaphrodita* Rusby durchgeführt. Es ging dabei um das Wachstum bzw. die Produktivität der beiden nordamerikanischen Pflanzenarten unter den gegenwärtigen mitteleuropäischen Klimabedingungen und mögliche Reaktionen der Arten auf mit dem Klimawandel erwartete erhöhte Temperaturen, reduzierte Niederschläge und den CO_2-Düngeeffekt. In den eingesetzten Klimakammern wurde das heutige Klima von Stuttgart mit den aktuellen CO_2-Konzentrationen (380 ppm) als Referenz genutzt. Die insgesamt acht Behandlungen wurden in der allseitigen Kombination der drei Faktoren Temperaturerhöhung, Niederschlagsreduktion und CO_2-Düngung realisiert. Dabei wurden die Temperaturen um 4°C gegenüber der Referenz erhöht und die Niederschläge um 50% reduziert. Der dritte Faktor ergab sich aus der CO_2-Anreicherung der Klimakammerluft auf Konzentrationen von 550 ppm. Letztere werden für das Jahr 2050 erwartet. Der jeweils fünfmonatige Betrieb der sechs Klimakammern und die Dosierung des Kohlendioxids verliefen in beiden Jahren einwandfrei. Während im ersten Jahr (2012) mit aus Samen gezogenen Jungpflanzen gearbeitet wurde, wurden im zweiten Jahr einjährige, in großen Töpfen vorkultivierte Pflanzen genutzt. Es sollte mit diesem Ansatz überprüft werden, ob es klimabedingte Unterschiede zwischen der Etablierungsphase und der Reaktionen älterer Pflanzen gibt. In den Versuchen wurden die gängigsten bzw. am meisten in der Praxis verwendeten Herkünfte der beiden Arten genutzt: polnisches Saatgut der Sida und thüringisches Saatgut der Silphie.

Neben den artspezifischen Reaktionen der Pflanzenarten waren die Unterschiede zwischen Jungpflanzen und älteren Pflanzen offensichtlich. Dies war vor allem der unterschiedlichen Entwicklungsgeschwindigkeit der beiden Arten geschuldet, denn die Silphie bildete im ersten Standjahr lediglich eine Blattrosette, während die Sida bereits viele hohe verholzende Seitentriebe und Blüten produzierte. Im zweiten Jahr bildete auch die Silphie Stängel und Blüten, letzteres geschah ca. zwei Wochen später als bei der Sida. Dennoch waren gravierende Artunterschiede bei den Allokationsmustern und dem Seneszenzverhalten zu beobachten. Die Sida neigt generell zu einem vorzeitigen Blattwurf und einem indeterminierten Wachstum mit der Bildung neuer blütentragender Seitentriebe, während der Großteil der seneszenten Blätter der Silphie am Stängel anhaften bleibt und die Pflanze während der Vegetationsperiode keine neuen Haupt- und Seitentriebe bildet. Die unterschiedliche Allokation bei den beiden Arten bedingt zu Ende der Vegetationsperiode auch eine unterschiedliche Qualität des Sprossmaterials, nämlich höhere Rohprotein-, Rohfett- und Rohaschegehalte bei der Silphie und höhere Rohfaser- und Ligningehalte bei der Sida. Bei der Nutzung der Biomasse der Sida zur Biogasherstellung sollte daher eine möglichst frühe Ernte im Sommer erfolgen, wenn noch viel Blattmasse vorhanden ist. Allerdings dürfte die Festbrennstoff-Nutzung der trockenen, stark verholzten Stängel dieser Art erst im späten Winter energetisch sinnvoller sein. Zudem gibt es ökologische Vorteile einer solchen Nutzung, welche in der effektiven Nährstoffrückverlagerung begründet sind. Zum einen hat das Holzmaterial geringe Asche- bzw. Stickstoff- und Schwefelgehalte, wodurch die Verbrennung effektiver ist und weniger Schadstoffe emittiert werden. Zum anderen kann die Nutzung der abgestorbenen Pflanze insgesamt ressourcenschonender sein, da nach der Verbrennung des verholzten Materials weniger Reststoffe anfallen und aufgrund des geringen Nährstoffentzugs weniger gedüngt werden muss.

Bezüglich der Produktivität der in den Klimakammern gezogenen Pflanzen bzw. zur Beurteilung der aus den erwähnten drei Faktoren generierten Behandlungseffekte wurde die Sprosstrockenmasse abzüglich der seneszenten Blätter betrachtet. Im Jahr der Aussaat war die Sida der Silphie überlegen, was auf den Verbleib der Silphie im Rosettenstadium zurückzuführen war. Unter höheren Temperaturen und einer guten Wasserzufuhr bildete aber die Silphie bei beiden CO_2-Konzentrationen deutlich mehr nutzbare Sprossmasse als die Sida. Im zweiten Jahr bestätigte sich die höhere Produktivität der Silphie unter günstigen Temperaturbedingungen. Unter normalen Temperaturen produzierte die Silphie unabhängig von der Wasserversorgung und den CO_2-Konzentrationen mehr nutzbare Sprossmasse als die Sida, während letztere in den um 4°C wärmeren Behandlungen etwas mehr produzierte.

Im zweiten Jahr des Klimakammerversuchs wurde auch die nach einem Zwischenschnitt nachgewachsene Sprossmasse betrachtet. Dabei zeigte sich, dass die Silphie in allen acht Behandlungen mehr Wiederaufwuchs als die Sida produzierte. Bei der Aufsummierung der Sprossmassen aus den zwei Schnitten und dem Vergleich mit der Trockenmasse von nur einfach geernteten Pflanzen ergab sich folgendes Bild. Die unter erhöhten Temperaturen und Wasserstress gewachsenen, zweifach geschnittenen Pflanzen der Silphie produzierten mehr Biomasse als die einfach geschnittenen. Hieraus kann geschlossen werden, dass sich unter trockenen Bedingungen ein mehrmaliger Schnitt lohnen und die Biomasseproduktion erhöhen kann. In der normal mit Wasser versorgten Behandlung und unter erhöhten CO_2-Konzentrationen war dieser Effekt jedoch nicht zu sehen, was auf CO_2-bedingte Wassereinspareffekte und die länger anhaltende Wachstumsförderung durch zusätzliches CO_2 hindeuten könnte. Es ist auch davon auszugehen, dass ein Schnitt bei weiter entwickelten Pflanzen nur einen geringen Wiederaufwuchs zur Folge haben wird, da mit dem Einsetzen der Blüte die Biomasseproduktion insgesamt gedrosselt wird. Im Gegensatz zur Silphie zeigten die zweifach geschnittenen Sida-Pflanzen in allen Behandlungen außer der Referenz und der unter erhöhten Temperaturen, normaler Wasserzufuhr und CO_2-Konzentrationen gezogenen Pflanzen höhere kumulative Biomassen als die einfach geschnittenen. Dies könnte auf die bessere Regenerationsfähigkeit der indeterminiert wachsenden Sida zurückgehen.

Bei der Überprüfung statistisch signifikanter Unterschiede mittels Varianzanalyse zeigte sich bei der Silphie in beiden Jahren ein signifikanter CO_2-Düngeeffekt. Die nutzbare Sprossmasse war sowohl bei Jungpflanzen als auch bei einjährigen Individuen erhöht. Bei der Sida war die beobachtete Wachstumsförderung durch CO_2 jedoch nicht statistisch signifikant. Viel deutlicher waren bei dieser Art die Effekte der Temperaturbehandlungen. Während bei den Jungpflanzen die erhöhten Temperaturen zu einer Förderung der nutzbaren Sprossmasse führten, hatte die Temperaturerhöhung bei der Endernte der einjährigen Pflanzen keinen signifikanten Effekt auf das Wachstum. Demgegenüber wirkte sich die verringerte Wasserversorgung bei beiden Arten zu allen Erntezeitpunkten negativ auf die Produktivität aus. Bei normalen Temperaturen und heutigen CO_2-Konzentrationen war die nutzbare Sprossmasse einjähriger Pflanzen in den mit 50% weniger Wasser gezogenen Pflanzen um 63% (Sida) bzw. um 47% (Silphie) reduziert. Bei erhöhten CO_2-Konzentrationen äußerte sich die verringerte Wassergabe in einer Wachstumseinbuße von lediglich 50% (Sida) bzw. 42% (Silphie). Diese Zahlen bestätigen, dass zukünftig erhöhte CO_2-Konzentration die negativen Effekte möglicherweise zunehmender Sommertrockenheit etwas abschwächen können. Der Grund dafür ist, dass die Pflanzen den Gaswechsel (Aufnahme von CO_2 und gleichzeitige Abgabe von Wasserdampf) drosseln und somit weniger Wasser über die Spaltöffnungen verloren geht. Die Ergebnisse legen auch nahe, dass die Sida insgesamt etwas stärker von

Trockenheit betroffen ist als die Silphie. Auch das bis in die semiariden Prärien Nordamerikas heranreichende natürliche Areal der Silphie im Vergleich zum Verbreitungsschwerpunkt der Sida im Bereich der Großen Seen deutet darauf hin, dass die Silphie besser an Trockenheit adaptiert ist als die Sida. Im Rahmen des Projekts wurden auch Isotopendiskriminationsanalysen durchgeführt, die diesen Sachverhalt weiter untermauerten. So sprachen die $\delta^{13}C$-Werte der Sida (im Mittel -30.24 ‰) für eine schlechtere Wassernutzungseffizienz als die der Silphie (im Mittel -27.3 ‰). Auch die höhere Stomatadichte bei der Sida und Untersuchungen zum Gaswechsel deuten auf eine unterschiedliche Ökophysiologie und Anpassung der Arten an Trockenheit hin.

Qualitätsanalysen des in den Klimakammerversuchen aufgewachsenen Sprossmaterials hatten zum Ziel, artspezifische Unterschiede aufzudecken und mögliche Effekte eines veränderten Klimas und des CO_2-Düngeeeffekts festzustellen. Wie oben erwähnt, gab es zwischen den Arten deutliche Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung des Sprossmaterials. Im ersten Jahr wurden aber auch einige statistisch signifikante Effekte der drei variierten Faktoren auf die Sprossqualität festgestellt. So bewirkte die CO_2-Erhöhung bei der Sida signifikant erhöhte C:N-Verhältnisse und eine Verringerung der Rohprotein- und Rohaschegehalte bei beiden Arten. Auch bei der Zwischenernte der einjährigen Pflanzen waren bei der Silphie noch einige signifikante CO_2-Behandlungseffekte auf die Produktqualität, z.B. reduzierte N- und Aschegehalte und höhere Anteile von Rohfaser nachweisbar. Bei der Endernte waren aber auch bei dieser Art im zweiten Jahr nur noch wenige dieser Effekte nachweisbar. Deutlicher waren die Auswirkungen einer reduzierten Wassergabe. Beide Arten hatten unter trockenen Bedingungen höhere Asche- und Stickstoffgehalte und geringere Rohfaseranteile.

Untersuchungen zur bioenergetischen Wertigkeit basierten entsprechend der unterschiedlichen Nutzung der Arten bei der Silphie auf der Ermittlung von spezifischen Methanerträgen im Hohenheimer Biogas-Ertragstest und bei der Sida auf kalorimetrischen Messungen.

Die mittleren spezifischen Methanerträge der Silphie lagen bei den noch nicht blühenden Jungpflanzen im ersten Versuchsjahr bei 311 Nl pro Kilogramm organischer Substanz, während sie in einjährigen, bereits blühenden Pflanzen im zweiten Jahr bei 277 Nl lagen. Während keine signifikanten Effekte der CO_2-Düngung zu verzeichnen waren, deutete sich eine geringere Methan-Ausbeute bei trockenen und wärmeren Bedingungen an. Berücksichtigt man auch die geringeren Erträge bei trockenen Bedingungen, ergeben sich daraus stark reduzierte Methanerträge pro Hektar. Der Wiederaufwuchs von zwischendurch geschnittenen Pflanzen zeigte jedoch keine Reduktion der spezifischen Methanerträge durch Trockenheit.

Bei der Sida lagen die Energiegehalte im aus Stängeln, Blättern und Blüten bestehenden, noch grünen Sprossmaterial bei 15.4 MJ pro kg Trockenmasse in Jungpflanzen und bei 14.8 MJ pro kg TM in einjährigen Pflanzen. Der Energiegehalt von blattlosen, abgestorbenen Stängeln war aber deutlich höher und betrug im Mittel 17.4 MJ pro kg Trockenmasse. Die Ernte der Stängel sollte daher erst nach dem kompletten Absterben der Pflanzen im späten Winter erfolgen. Dies hat zudem den Vorteil, dass die Aschegehalte sinken und die Nährstoffe komplett aus dem Spross zurückgeführt werden.

Anhand der Ergebnisse konnten einige Zusammenhänge zwischen der stofflichen Qualität und der energetischen Wertigkeit des Materials abgeleitet werden. Bei beiden Arten deutete sich an, dass die Materialeigenschaften und die energetische Wertigkeit mit den

Wachstumsbedingungen und der gebildeten Trockenmasse in Verbindung standen. Dies bestätigt, dass eine hohe Energieausbeute nur bei günstigen Wachstumsbedingungen (gute Versorgung mit Nährstoffen und Wasser) realisiert werden kann. Es ist aber auch bezüglich der Festlegung optimaler Erntetermine anzumerken, dass die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt gebildete Trockenmasse und ihr Wert (Reife) von der zum Zeitpunkt der Ernte erreichten Entwicklung bzw. Phänologie der Pflanze abhängen. So zeigte sich bei der Sida, dass der Energiegehalt negativ mit den Blattmasseanteilen korrelierte bzw. mit dem Blattwurf insgesamt anstieg. Bei der Silphie wurde dagegen kein Zusammenhang zwischen den spezifischen Methanerträgen und den Blattmassenanteilen festgestellt, jedoch wirkte sich ein höherer Anteil seneszenter Blätter an der Sprossmasse negativ auf den Methanertrag aus. Bei der Sida tritt die Reife des als Festbrennstoff genutzten Materials erst nach dem kompletten Absterben der Blätter bzw. nach dem Blattwurf ein, wohingegen bei der Silphie sowohl die Blatt- als auch die Stängelfraktion eine wichtige Rolle bei der Konversion zu Biogas spielen.

Im Rahmen des Projekts wurden neben den Untersuchungen zur Wirkung verschiedener Klimabedingungen und des CO_2-Düngeeffekts auf die Produktivität und energetische Wertigkeit der beiden Energiepflanzenarten verschiedene etablierte und neue Methoden eingesetzt. Die Bestimmung der Blattgrüne mit dem SPAD-Meter und die Regression der Werte mit gleichzeitig gemessenen Chlorophyll- und Stickstoffmessungen hat praktische Bedeutung bei der Ermittlung von Nährstoffmangel bzw. der Ableitung von Düngeempfehlungen. Außerdem erfolgte die Messung von NIRS-Spektren und die Kalibration dieser mit gemessenen qualitätsbestimmenden Parametern. Solche Ansätze werden momentan verfolgt, um aufwändige nasschemische Verfahren zukünftig durch optische Hochdurchsatzverfahren ersetzen zu können. Exemplarische Messungen des Gaswechsels und der Photosynthese, rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen und isotopenmassenspektrometrische Messungen hatten zum Ziel, ökophysiologische Unterschiede der beiden Arten anzusprechen.

Während der dreijährigen Laufzeit des Projekts wurden neben den für die Hauptversuche gewählten Herkünften drei weitere Sida-Akzessionen und vier weitere Silphie-Akzesssionen überprüft. Dazu wurden die Pflanzen in einem Versuchsgarten kultiviert und deren Phänologie, Längenentwicklung und Produktivität betrachtet. Die Untersuchung bestätigte die vergleichsweise hohe Produktivität des thüringischen Silphie-Saatguts und des polnischen Sida-Saatguts, welche vielerorts bei der Anlage von Dauerkulturen Verwendung finden. Ebenfalls Bestandteil des Projekts waren Untersuchungen zur Abtrocknung der Pflanzen und der Nährstoffrückverlagerung während der herbstlichen Seneszenz. Dazu wurden bei beiden Arten über mehrere Wochen Trockenmasseanteile und Aschegehalte von zwölf Stängelhöhen bzw. Fraktionen bestimmt. Bei beiden Arten stieg unabhängig von der betrachteten Fraktion der Trockenmasseanteil von der ersten bis zur dritten Ernte an, was auf das Absterben des Sprosses im Herbst zurückgeht. Während bei der Sida die Aschekonzentrationen von der ersten bis zur dritten Ernte in allen Fraktionen abnahmen, war dies bei der Silphie nur bei den obersten Stängelpartien ausgeprägt.

Schließlich erfolgten im Rahmen einer projektbegleitenden Untersuchung Freilandversuche an den vier in unterschiedlicher Höhe über dem Meeresspiegel gelegenen Standorten der Versuchsstation Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim. Diese sollten zur Bewertung der in den Klimakammerversuchen gewonnenen Erkenntnisse herangezogen werden. Es zeigte sich dabei, dass die Silphie auf guten Standorten selbst in höheren Lagen hohe Erträge liefern kann, während die Sida die höchsten Erträge in tieferen Lagen erbrachte. Letzteres deutet darauf hin, dass die Sida vermutlich wärmebedürftiger als die Silphie ist, gleichzeitig aber auch stärker auf Trockenheit reagiert als die in den kühl-semiariden Steppen Nordamerikas beheimatete Silphie.

Insgesamt ist die Silphie unter den gegenwärtigen und zukünftigen mitteleuropäischen Klimabedingungen wesentlich wüchsiger als die Sida und die kräftige Staudenart wird zudem stärker von dem Anstieg der CO_2-Konzentrationen profitieren. Dennoch kann der Anbau mehrjähriger Kulturen der verholzenden Sida vor allem auf marginalen Standorten des Flachlands sinnvoll sein, da die Art aufgrund ihrer Nährstoffökologie deutlich ressourcenschonender angebaut werden kann.

Summary

Responses of the energy plant species Sida and *Silphium* to elevated temperatures, reduced precipitation levels and the „CO_2-fertiliszation effect“

Various experiments were performed within the project using the novel energy plant species *Silphium perfoliatum* L. and *Sida hermaphrodita* Rusby. Objectives were to study the growth performance and productivity of the North American species under the current Central European climatic conditions and responses of the species to climatic change including elevated temperatures, reduced precipitation and the CO_2 fertilization effect. In the growth chamber study the present climate of Stuttgart and current CO_2-concentrations (380 ppm) were used as a reference. In total eight treatments were realized consisting of a factorial combination of the three factors temperature elevation, reduction of precipitation volumes and CO_2 fertilization. Temperatures were raised by 4°C above the reference and precipitation levels were reduced by 50%. The third factor was realized via a CO_2 supply to the air to a set value of 550 ppm. Latter concentration will be reached by the year 2050. In both years, growth chambers and CO_2-supply worked fine. While in the first year (2012) seed grown plantlets were used, pre-grown one-year-old plants were cultivated in the second year in large containers. We wanted to test potential differences in the climatic responses between seedlings and older individuals. In the trials widely grown accessions were used; a Polish origin of *Sida* and Thuringian germplasm of *Silphium*.

Besides species specific responses of the plants, differences between seedlings and older plants were observed. This was mainly due to a different speed of development since *Silphium* staed in the rosette stage in the first year while *Sida* already formed woody side branches and flowers. In the second year, *Silphium* formed stems and flowers as well, latter developmental stage occurring two weeks later than in *Sida*. Nevertheless, strong differences were observed between the species with regard to allocation patterns and senescence. *Sida* generally tends to premature leaf fall and shows indeterminate growth of new flower-bearing side branches, while dead leaves of *Silphium* remain attached to the stem and in contrast to *Sida* the species does not from new main and side shoots. By the end of the vegetation period, the different allocation patterns lead to a different quality of the shoot material, namely higher crude protein, fat and ash concentrations in *Silphium* and higher crude fibre and lignin contents in *Sida*. When farmers propose to use the biomass of *Sida* for the generation of biogas, harvest should thus take place in early summer when plants still have a high leaf mass. However, the use of the dry woody stems of the species as a solid fuel may be more reasonable from an energetical perspective. Additionally, an ecological advantage may be the effective recycling of nutrients. On the one hand, the woody material has lower ash, nitrogen and sulfur contents, whereby its combustion will be more effective and fewer pollutants will be released. On the other hand, the use of died-off shoot material will be resource efficient too, since after the combustion less material will have to be disposed and fewer nutrients will have to be added to the fields as fertilizers.

To address the productivity of plants that were grown in the climate chambers and to assess their responses to the treatment combinations, dry shoot mass without senescent leaves, i.e. usable shoot mass, was looked at. In the first year, *Sida* proved to be superior to *Silphium* under normal temperatures since latter species remained in the rosette stage. However, elevated temperatures, good water supply in combination with elevated CO_2 prompted *Silphium* to produce slightly more usable shoot mass than

Sida. In the second year, the higher productivity of *Silphium* under favorable growth conditions could be confirmed. In the normal temperature treatments, *Silphium* produced more usable shoot mass independently from the supply of water and CO_2 enrichment, while *Sida* performed better in the treatments that were raised by 4°C.

In the second year of the growth chamber experiment, we also considered the shoot mass that regrew after an intermediate harvest. *Silphium* exhibited stronger re-growth and higher shoot mass than *Sida* in all eight treatments. Summing up the shoot mass from both the intermediate and final harvests and comparing cumulative shoot masses of plants that were harvested either once or twice showed the following. Plants of *Silphium* that were cut twice and had grown under elevated temperatures and drier conditions produced more biomass than plants that were only harvested once. It may be followed from this that under extreme conditions intermediate harvests can increase the total productivity of this energy species. However, this effect was not seen under a normal water supply and under elevated concentrations of CO_2, which could be due to the water saving effects resulting from the longer lasting growth stimulation at higher CO_2 availability. Generally, it may be assumed that an intermediate harvest of plants will eventually decrease the regrowth at later growth stages since productivity of plants will be slowed down with the appearance of flowers. In contrast to *Silphium* and in all but two treatments, twice cut plants of *Sida* showed higher cumulative usable shoot mass than plants that were harvested only once. This may suggest a better regeneration capacity of the indeterminate species.

In *Silphium*, ANOVA confirmed significant CO_2 fertilization effects in both years. In this species usable shoot mass increased significantly in young and old individuals, while in *Sida* such stimulatory effects could not be proven statistically. In latter species, temperature effects were more pronounced than CO_2 effects. While in seedlings elevated temperatures boosted usable shoot mass, effects of the same treatment were absent at the final harvest of one-year-old plants. In contrast, the reduced water supply had a strong and negative impact in both species at all of the harvests. Under normal temperatures and current CO_2 concentrations, the reduced water supply decreased the usable shoot mass by 63% in *Sida* and by 47% in *Silphium*. At elevated CO_2 concentrations, the growth reductions were smaller and amounted to 50 and 42%, respectively. The numbers confirm that rising levels of carbon dioxide may in part mitigate adverse effects of summer drought in the future. The reason for this water saving effect is that the gas exchange (uptake of CO_2 and concurrent release of water vapor) and the loss of water via the stomata are reduced. The results also indicate that *Sida* is more prone to drought than *Silphium*. The better drought adaptation of the latter is also supported by the natural range of *Silphium* extending into the dry and cool prairies as compared to the narrower distribution range of *Sida* around the Great Lakes. Isotope discrimination analyses corroborated these findings since $\delta^{13}C$-values of *Sida* (with a mean of -30.24 ‰) indicated a lower water use efficiency than that of *Silphium* (with a mean of -27.3 ‰). In addition, the higher stomatal index of *Sida* and gas exchange analyses pointed to a different ecophysiology and drought adaptation of the two energy species.

Analyses of the chemical quality of the shoot material from the growth chamber study aimed at identifying species-specific differences and potential effects of different climates and the CO_2 fertilization effect. As mentioned above, species differed much with regard to their shoot quality. In addition, some statistically significant differences were observed in the first year between the treatments. In *Sida*, CO_2-fertilization brought about significantly higher C:N ratios and reduced crude protein and ash concentrations were found in both species. Until the first harvest of one-year-old

plants of *Silphium* CO_2 effects on the chemical quality were still present, e.g. reduced N- and ash concentrations and increased crude fibre contents. However, only few of these effects remained until the final harvest in the second year. Plant responses to the reduced water supply were more pronounced than responses to the other factors. In the dry treatments, both species had higher ash and nitrogen contents and produced less raw fibre.

Investigations of bioenergetic values were based on the different intended use of the species, i.e. the identification of specific methane yields in *Silphium* using the Hohenheim biogas test and calorimetric analyses in *Sida*. Mean specific methane yields in young plants of *Silphium* were identified to be 311 Nl per kilogram of organic dry matter, while in flowering one-year old plants a mean value of 277 Nl was recorded. While no effects of the CO_2-fertilization were found, a reduced methane yield under dry and warm conditions was observed. Accounting for the lower yields of dry mass under these conditions, methane yields per hectare will show deterioration under dry conditions. However, no effects of drought were found in the re-grown biomass of plants that had been subjected to an intermediate cut. Energy contents of the green shoot material of *Sida* that consisted of stems, leaves and flowers had mean values of 15.4 MJ per kilogram dry mass in young plants and 14.8 MJ per kilogram in one-year old plants. In leafless dead stems, energy contents were significantly higher and reached a mean value of 17.8 MJ per kilogram dry mass. Harvests should thus be performed in the late winter after the complete die-off of plants. The advantage of a late harvest is that ash contents will be lower and that nutrients will then have been re-drawn from the shoot into the root system.

Based on the bioenergetic analyses some relationships between the chemical quality and the energetic values of the material could be derived. In both species, material quality and energetic values were related to the prevailing growth conditions and the production of dry shoot mass. These findings support that high energy yields can only be realized under favorable growth conditions (high availability of nutrients and water). With regard to the timing of harvests, it must be noted that the dry shoot mass and its energetic value present at a time depend on the growth stage and the phenology of the plants. In *Sida*, energy contents were negatively correlated to the leaf mass fraction, so that they increased with the progression of leaf fall. In contrast, specific methane yields of *Silphium* were not related to the proportion of leaf mass, but a higher percentage of senescent leaves acted negatively on methane yields. In *Sida* energetic maturity of the solid fuel is reached only after the complete shedding of leaves, while in *Silphium* green leaves and stems play a significant role in the conversion of its shoot mass into biogas.

Besides the conventional analyses on productivity and energetic values of the plants under different climatic conditions and elevated CO_2, some established and new methods were applied. The determination of leaf greenness using a SPAD meter and regressions of these values against chlorophyll and nitrogen concentrations may be used in the practical assessment of nutrient deficiencies and the recommendation of fertilizer regimes. Moreover, near infrared spectra (NIRS) were recorded from all samples and calibrated against quality parameters. Such approaches are momentarily being developed to replace wet chemical analyses by optical high-throughput methods. Exemplary gas exchange and photosynthesis measurements and isoptope discrimination analyses aimed to give deeper insights into ecophysiological differences of the species.

During the three-year project three more origins of *Sida* and four more accessions of *Silphium* were examined besides the two origins used in the main experiment. Plants were cultivated in an experimental garden and their phenology, length increments and

productivity were followed thoroughly. The investigations confirmed the high productivity of the Thuringian accession of *Silphium* and the Polish seed material of *Sida*, which are often used to establish permacultures in many places. Furthermore, the wilting of plants and nutrient recycling during the autumn senescence were addressed. To do so, dry matter and ash contents were determined in twelve stem positions, respectively fractions. In both species and in all fractions dry matter contents increased from the first to the third harvest which is related to the die-off of plants in the autumn. While in *Sida* ash concentrations decreased in all fractions, a nutrient removal was only seen in the uppermost stem positions of *Silphium*.

Accompanying the experiments, field experiments were established at different altitudes on plots of the four experimental stations of the Agricultural Sciences Department of the University of Hohenheim. These trials should be used to evaluate the results from the growth chamber studies. On rich soils, *Silphium* produced high yields even at higher altitudes, while Sida was most productive in lower altitudes. Latter finding points to the fact that *Sida* is probably more thermophile than *Silphium*, but at the same time it will be more responsive to drought than *Silphium*, which is native to the cool dry steppes of North America.

Overall, *Silphium* is more productive than *Sida* under current and future Central European conditions and the robust shrub will more strongly profit from rising levels of carbon dioxide. Nevertheless, the set-up of perennial cultures of the woody *Sida* can be meaningful especially in marginal locations since its nutrition ecology supports a resource friendly farming practice.

Literatur

Aguilar, J.F., Fryxwell, P.A., Jansen, R.K. (2003): Phylogenetic relationships and classification of the Sida generic alliance (Malvaceae) based on nrDNA ITS evidence. Systematic Botany 28: 352-364.

Albrecht, K.A., Goldstein, W. (1997): *Silphium perfoliatum*: a North American Prarie plant with potential as a forage crop. Proc. of the VIII International Grassland Congress 1.67-68.

Aurbacher, J., Benke, M., Formowitz, B., Glauert, T., Heiermann, M., Herrmann, C., Idler, C., Kornatz, P., Nehring, A., Rieckmann, C., Rieckmann, G., Reus, D., Vetter, A., Vollrath, B., Wilken, F., Willms, M. (2012): Energiepflanzen für Biogasanlagen. Niedersachsen. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), 80 S. http://www.fnr.de/fileadmin/bioenergie-beratung/niedersachsen-bremen/dateien/brosch.energiepflanzen-niedersachsen-webpdf.pdf

Baskin, C.C., Baskin, J.M. (2002): Propagation protocol for production of container *Silphium perfoliatum* L. plants; University of Kentucky, Lexington, Kentucky. In: Native Plant Network. URL: http://www.nativeplantnetwork.org

Bickerton, H.J. (2011): Recovery strategy for the Virginia Mallow (*Sida hermaphrodita*) in Ontario. Ontario Recovery Strategy Series. Prepared for the Ontario Ministry of Natural Resources, Peterborough, Ontario. vi + 16 pp.

Biertümpfel, A., Bischof, R., Conrad, M., Dotzauer, M., Freund, D., Herrmann, C., Heiermann, M., Hochberg, H., Idler, C., Kornatz, P., Knoblauch, S., Nehring, A., Oswald, M., Peyker, W., Reinhold, G., Reus, D., Schreiber, E., Strauß, C., Vetter, A., Vollrath, B., von Buttlar, C., Wagner, M., Willms, M., Zopf, D., Zorn, W. (2012a): Energiepflanzen für Biogasanlagen. Thüringen. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), 76 S. http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/r/brosch.energiepflanzen-thueringen-web_1.pdf

Biertümpfel, A., von Buttlar, C., Conrad, M., Dudziak, D., Formowitz, B., Gramm, M.,Grunewald, J., Heiermann, M., Herrmann, C., Idler, C., Jäkel, K., Kornatz, P., Vollrath, B., Willms, M., Zander, D. (2012b): Energiepflanzen für Biogasanlagen. Sachsen. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), 91 S. http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/f/n/fnr_brosch.energiepflanzen-sachsen.pdf

Biertümpfel, A., Conrad, M., Blüthner, W.-D. (2012c): Korbblütler könnte Mais verdrängen. Biogas Journal 38-41.

Biertümpfel, A., Rudel, H., Conrad, M., Scheithauer, F. (2013): Praxisanbau Silphie. Ergebnisse einer telefonischen Befragung. In: FNR (Hrsg.) Gülzower Fachgespräch, Band 45, S. 435.

Blüthner, W.-D., Biertümpfel, A., Conrad, M. (2011): Erhöhung des Leistungspotentials und der Konkurrenzfähigkeit der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.). TLL und Chrestensen, Erfurt, http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/Energiepflanzen2011/10Bluethner_Wolf-Dieter-freigegeben.pdf

Buhler, D.D., Hoffman, M.L. (1999): Andersen´s Guide to practical methods of propagation of weeds and other plants. 2nd edition, Allen Press, Lawrence, Kansas, 248 pp.

Butz, A., Heiermann, M., Herrmann, C., Idler, C., Kornatz, P., Kruse, S., Mastel, K., Nerlich, K., Ott, J., Wurth, W., Stolzenburg, K., Vollrath, B., Zürcher, A. (2013): Energiepflanzen für Biogasanlagen. Baden-Württemberg, 80 S. http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/r/brosch_baden-wuerttemberg_web.pdf

Boe, A., Albrecht, K., Johnson, P., Owens, V., Carter, C., Mathees, D., Malmo, T., Kahler, A. (2012): Genetics, Breeding, Agronomy, and Pest Management of Cup Plant (*Silphium perfoliatum*), a Potential New Biomass Crop for the North Central USA, pdf under: http://ncsungrant1.sdstate.org/upload/Boe-Sun-Grant-Ann-Mt-Indianapolis-2012.pdf

Borkowska, H., Wardzinska, K. (2003): Some Effects of *Sida hermaphrodita* R. Cultivation on Sewage Sludge. Polish Journal of Environmental Studies 12: 119-122.

Borkowska, H., Styk, B., Molas, R. (2006): Sida – eine verheißungsvolle, mehrjährige und zukunftsvolle Biomassepflanze mit breitem Anwendungsspektrum. Energiepflanze mit hohem Potenzial. Erneuerbare Energien 7: 76-77.

Borkowska, H., Molas, R. (2011): Two extremely different crops, *Salix* and *Sida*, as sources of renewable bioenergy. Biomass and Bioenergy 36: 234-240.

Chudzik, B., Szczuka, E., Domaciuk, M., Pavlov, M. (2010): The structure of the ovule of *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby after pollination. Acta Agrobotanica 66: 3-11.

Conrad, M., Biertümpfel, A., (2010): Optimierung des Anbauverfahrens für Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum*) als Kofermentpflanze in Biogasanlagen sowie Überführung in die landwirtschaftliche Praxis. Abschlußbericht eines von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. geförderten Projekts, FKZ: 22004307. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 49 S.

Conrad, M., Biertümpfel, A., (2013): Durchwachsene Silphie als neue Biogaspflanze. Versuchsergebnisse und Anbauempfehlungen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Referat Nachwachsende Rohstoffe. Tagung „Pflanzenbau aktuell" – Bernburg 2013.

COSEWIC (2010): Assessment and Status Report on the Virginia Mallow *Sida hermaphrodita* in Canada. Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada. Ottawa, 18 pp.

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften (2012): Empfehlungen Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen, 9 S.

DLR (2013): Versuchsbericht Biomasse 2013. Bericht 14 / 2013, 54 S. Landwirtschaftliches Versuchswesen Rheinland-Pfalz, Dienstleistungszentren Ländlicher Raum (DLR).

El Bassam, N. (2010): Handbook of Bioenergy Crops: A Complete Reference to Species, Development and Applications, Earthscan, 544 p.

Elsässer, M. (1989): Siliereignung und Futterwert von Resele-Gemenge und *Silphium perfoliatum* L. als möglichen Maisersatzpflanzen. Wirtschaftseigene Futter 35: 238-64.

EU (2009): Verordnung zur Festlegung der Probenahmeverfahren und Analysemethoden für die amtliche Untersuchung von Futtermitteln. Verordnung (EG) Nr. 152/2009 der Kommission vom 27. Januar 2009, 130 S.

FNR (2013): Basisdaten Bioenergie Deutschland. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow, 47 S.

FNR (2014): http://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen/. Zusammenstellung der Daten nach Biomasse-Verordnung (2012), Faustzahlen Biogas (KTBL, 2013), Leitfaden Biogas (FNR, 2013), Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung (FNR, 2014), Stromerzeugung aus Biomasse (DBFZ, 2013) und eigene Berechnungen.

Franzaring, J., Schmid, I., Bäuerle, L., Gensheimer, G., Fangmeier, A. (2014): Investigations on plant functional traits, epidermal structures and the ecophysiology of the novel bioenergy species *Sida hermaphrodita* Rusby and *Silphium perfoliatum* L. Journal of Applied Botany and Food Quality 86: 36-45 .

Gauder, M., Graeff-Hönninger, S., Lewandowski, I., Claupein, W. (2012): Long-term yield and performance of 15 different *Miscanthus* genotypes in southwest Germany. Annals of Applied Biology, 160: 126-136.

Gelfand, I., Sahajpal, R., Zhang, X., Izaurralde, R.C., Gross, K.L., Robertson, G.P. (2013): Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. Nature, doi:10.1038/nature11811.

German National Academy of Sciences Leopoldina (2012): Statement Bioenergy – Chances and Limits, 118 pp.

Hartmann, A., Stockmann, F., Fritz, M. (2014): Durchwachsene Silphie als Biogassubstrat. In: Biogas Forum Bayern Nr. I-25/2014, Hrsg. ALB Bayern e.V., http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Durchwachsene_Silphie_als_Biogassubstrat.pdf

Heděnec, P., Novotný, D., Usťak, S., Cajthaml, T., Slejška, A., Šimáčková, H., Honzík, R., Kovářová, M., Frouz, J. (2014): The effect of native and introduced biofuel crops on the composition of soil biota communities. Biomass and Bioenergy 60: 137-146.

Horn, H. (2012): Viel Nektar und Pollen – erste Erfahrungen mit der Durchwachsenen Silphie als Trachtpflanze. ADIZ 11/2012: 14-15.

Howaniec, N., Smolinski, A. (2011): Steam gasification of energy crops of high cultivation potential in Poland to hydrogen-rich gas. International Journal of Hydrogen Energy 36: 2038–2043.

Hübner M., Oechsner, H., Koch, S., Seggl, A., Hrenn, H., Schmiedchen, B., Wilde, P., Miedaner, T. (2011): Impact of genotype, harvest time and chemical composition on the methane yield of winter rye for biogas production. Biomass and Bioenergy 35: 4316-4323.

Iglinski, B., Iglinska, A., Kujawski, W., Buczkowski, R., Cichosz, M. (2011): Bioenergy in Poland. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15: 2999-3007.

Inskeep, W.P., Bloom, P.R. (1985): Extinction coefficients of chlorophyll a and b in N,N-dimethylformamide and 80% acetone. Plant Physiology 77: 483-485.

Johnson, P.J., Boe, A. (2011): Three interesting insects and the cause of reduced vigor of cup plant (*Silphium perfoliatum*) in agronomic plantings. Proc. of the South Dakota Academy of Science 90: 209.

Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (Hrsg.) (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2., neu bearb. u. erw. Aufl., 1032 S. Springer Verlag.

Kaub, F., Selbmann, K., (2013): The seesaw of Germany's biofuel policy – Tracing the evolvement to its current state. Energy Policy 62: 513–521.

Klenke, T. (2012): Effiziente Biogasproduktion mit alternativen Substratpflanzen. Erste Anbauerfahrungen mit *Sida hermaphrodita* Rusby. Präsentation Haus Düsse, 14. Juni 2012, 33 S. http://www.duesse.de/znr/pdfs/2012/2012-06-14-energiepflanzen-03.pdf

Kujawski, J.L., Woolston, D., Englert, J.M. (1997): Propagation of Virginia Mallow from seeds, rhizomes (Virginia). Restoration and Management Notes. 15:2, zitiert in Bickerton (2011)

Lehmkuhler, J.W., Ramos, M.H., Albrecht, K.A. (2007): Cupplant silage as a replacement for corn silage in beef cattle diets. Forage and Grazing lands doi:10.1094/FG-2007-1107-01-RS.

LFL (2014): Biogasanlagen: Berechnung der Gasausbeute von Kosubstraten. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/031560/index.php

LTZ (2011): Erste Versuchsergebnisse mit der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) in Baden-Württemberg. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, 10 S.

Mast, B., Lemmer, A., Oechsner, H., Reinhard-Hanisch, A., Claupein, W., Graeff-Hönninger, S. (2014): Methane yield potential of novel perennial biogas crops influenced by harvest date. Industrial Crops and Products 58: 194–203.

Meier U. (1997): Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. BBCH-Monograph. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry. Blackwell, Oxford, 622 pp.

Mevik, B.-H., Wehrens, R. (2007): The pls Package: Principal Component and Partial Least Squares Regression in R. Journal of Statistical Software 18, 24 pp.

Mevik, B.-H. (2013): Partial Least Squares and Principal Component regression, R package 'pls', 28 August 2013, 58 pp.

Mendu, V., Harman-Ware, A., Crocker, M., Jae, J., Stork, J., Ill, S.M., Placido, M., Huber, G., De Bolt, S. (2011): Identification and thermochemical analysis of high-lignin feedstocks for biofuel and biochemical production. Biotechnology for Biofuels 4: 43.

Ministry of Natural Resources Ontario (2011): Virginia Mallow (*Sida hermaphrodita*). http://www.mnr.gov.on.ca/stdprodconsume/groups/lr/@mnr/@species/documents/document/stdprod_082230.pdf.

Mittweg, G., Oechsner, H., Hahn, V., Lemmer, A., Reinhard-Hanisch, A. (2012): Repeatability of a laboratory batch method to determine the specific biogas and methane yields. Eng. Life Sci. 12: 270–278.

Montes, J., Technow, F., Bohlinger, B., Becker, K. (2012): Grain quality determination by means of near infrared spectroscopy in *Jatropha curcas* L. Industrial Crops and Products 43: 301– 305

Neumerkel, W. (1980): Botanik, Anbau und Futterwert der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.). Dissertation MLU Halle, 190 S.

Novaes, E., Kirst, M., Chiang, V., Winter-Sederoff, H., Sederof, R. (2010): Lignin and biomass: A negative correlation for wood formation and lignin content in trees. Future Perspectives in Plant Biology 154: 555-561.

Pan, G., Ouyang, Z., Luo, Q., Yu, Q., Wang, J. (2011): Water use patterns of forage cultivars in the North China Plain. International Journal of Plant Production 5: 181-194.

Pennsylvania Natural Heritage Program (2007): Sida; Virginia Mallow (*Sida hermaphrodita*). Plant species at concern, 1p., http://www.naturalheritage.state.pa.us/factsheets/14164.pdf

Petersen, J. (2012): Die Durchwachsende Silphie, eine wirkliche Alternative zum Mais? Seminar „Bunte Felder für Biogas" 24.1.2012, Wittlich. FH Bingen.

Pichard, G. (2012): Management, production, and nutritional characteristics of cup-plant (*Silphium perfoliatum*) in temperate climates of southern Chile Ciencia e Investigacion Agraria 39: 61-77.

Poeschl, M., Ward, S., Owende, P. (2010): Prospects for expanded utilization of biogas in Germany. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 1782–1797.

Pszczółkowska, A., Romanowska-Duda, Z., Pszczółkowski, W., Grzesik, M., Wysokinska, Z. (2012) Biomass Production of Selected Energy Plants: Economic Analysis and Logistic Strategies. Comparative Economic Research. Band 15, Heft 3, Seiten 77–103, ISSN (Online), ISSN (Print) 1508-2008, DOI: 10.2478/v10103-012-0018-6, December 2012.

Rumpler, J., Reichardt, I. (2009): Neue Kulturen für die Bioenergie. Demonstrationsanbau und erste Ergebnisse von Verbrennungsversuchen. 25 pp., Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und

Gartenbau Sachsen-Anhalt, http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/Rumpler_Reichardt_24042009_komprimiert.pdf

Settle, W.J. (1967): The chromosome morphology in the genus *Silphium*. The Ohio Journal of Science 67: 10-19.

Slepetys, J., Kadziuliene, Z., Sarunaite, L., Tilvikiene, V., Kryzeviciene, A. (2012): Biomass potential of plants grown for bioenergy production. Proceedings of the International Scientific Conference on Renewa. Renewable Energy and Energy Efficiency, Growing and processing technologies of energy crops. 66-72.

Sokolov, V.S., Gritsak, Z.I. (1972): Silphium – a valuable fodder and nectariferous crop. World Crops 24: 299-301

Spooner, D.M., Cusick, A.W., Hall, G.F., Baskin, J.M. (1985): Observations on the distribution and ecology of *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby (Malvaceae). Sida 11: 215-225.

Stanford, G. (1990): *Silphium perfoliatum* (Cup Plant) as a new forage species. Proceedings of the 12th North American Prairie Conference, pp. 33-37.

Stolzenburg, K. (2012): Erfahrungen zum Anbau der Durchwachsenen Silphie in Baden-Württemberg. LTZ Augustenberg. Gemeinsame Tagung Bioenergieberatung am 28. August 2012 BLE, Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Eifel und Fachhochschule Bingen, 29 S.

Stolzenburg, K. (2013): Blühende Biogaspflanzen. Erste Versuchsergebnisse mit der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) in Baden- Württemberg. Landpost 38: 14-16.

TFZ Bayern (2009): Heizwerttabellen für verschiedene Holzarten. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 2 S.

TLL (2008): Anbautelegramm Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.). Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2 S.

TLL (2010): Optimierung des Anbauverfahrens für Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum*) als Kofermentpflanze in Biogasanlagen sowie Überführung in die landwirtschaftliche Praxis. Abschlußbericht FKZ: 22004307 (FNR), 48 S. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.

Thomas, L.K. (1979): Distribution and ecology of *Sida hermaphrodita*, a rare plant species. Bartonia 46: 51-59.

Trölenberg, S.D., Kruse, M., Jonitz, A. (2012): Verbesserung der Saatgutqualität bei der Durchwachsenden Silphie (*Silphium perfoliatum* L.). VDLUFA-Schriftenreihe 68: 926-933.

USDA (2002): Plant Guide Cup Plant *Silphium perfoliatum* L. United States Department for Agriculture Natural Resources Conservation Service USDA NRCS, National Plant Data Center 2pp., http://plants.usda.gov/plantguide/pdf/cs_sipe2.pdf

VDI (2006): VDI Richtlinie 4630. Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Verein Deutscher Ingenieure. Fachausschuss Regenerative Energien, 92 S.

Voigt, T.B., Lee, D.K., Kling, G.L. (2012): Perennial herbaceous crops with potential for biofuel production in the temperate regions of the USA. CAB Reviews 7, 13 pp.

Wrobel, M., Fraczek, J., Francik, S., Slipek, Z., Krzysztof, M. (2013): Influence of degree of fragmentation on chosen quality parameters of briquette made from biomass of cup plant *Silphium perfoliatum* L. Engineering for Rural Development 653-657.

Wróblewska, H., Komorowicz, M., Pawłowski, J., Cichy, W. (2009): Chemical and energetical properties of selected lignocellulosic materials. Folia Forestalia Polonica 40: 67-78.

Basis des vorliegenden Berichts sind folgende Zwischenberichte

Franzaring, J., Holz, I., Müller, M., Kauf, Z., Fangmeier, A. (2013): Reaktionen der Energiepflanzen Sida und Silphie auf erhöhte Temperaturen, reduzierte Niederschläge und den CO_2-Düngeeffekt. Erster Zwischenbericht zum FNR-Projekt FKZ 22400511, Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie (320) der Universität Hohenheim, 48 S.

Franzaring, J., Holz, I., Kauf, Z., Fangmeier, A. (2014): Reaktionen der Energiepflanzen Sida und Silphie auf erhöhte Temperaturen, reduzierte Niederschläge und den CO_2-Düngeeffekt. Zweiter Zwischenbericht zum FNR-Projekt FKZ 22400511, Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie (320) der Universität Hohenheim, 38 S.

Als Ergänzung zum Forschungsprojekt durchgeführte, abgeschlossene Master- und Bachelorarbeiten sowie im Rahmen des Projekts angefertigte wissenschaftliche Publikationen (chronologische Abfolge)

Bäuerle, L. (2012): Pflanzenökologie und Bauwert verschiedener Herkünfte der Bioenergiepflanzenarten Sida und Silphie während der Etablierungsphase. Masterarbeit am Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim, 129 S.

Slowik, F. (2012): Auswirkungen von troposphärischem Ozon auf das Wachstum der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.). Bachelorarbeit am Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim, 34 S.

Hartmann, A. (2013): Auswirkungen troposphärischen Ozons auf Entwicklung und Wachstum von *Sida hermaphrodita*. Bachelorarbeit am Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim, 40 S.

Pukrop, H. (2013): Vegetative Vermehrung von *Sida hermaphrodita* L. Rusby durch Wurzel- und Sprosssstecklinge. Bachelorarbeit am Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim, 43 S.

Franzaring, J., Hartmann, A., Slowik, F., Fangmeier, A. (2013): Effects of tropospheric ozone on the bioenergy plants *Sida hermaphrodita* L. Rusby and *Silphium perfoliatum* L. In: ICP Vegetation: Ozone Pollution: Impacts on ecosystem services and biodiversity Report prepared by the ICP Vegetation, April, 2013, pp.: 79-81. http://www.ceh.ac.uk/products/publications/documents/icpvegetationozoneecosystemservicesandbiodiversityreport2013.pdf

Franzaring, J., Schmid, I., Bäuerle, L., Gensheimer, G., Fangmeier, A. (2014): Investigations on plant functional traits, epidermal structures and the ecophysiology of the novel bioenergy species *Sida hermaphrodita* Rusby and *Silphium perfoliatum* L. Journal of Applied Botany and Food Quality 87: 36 - 45.

Weiterführende praktische Informationen im Internet

Saat- und Pflanzgut der Silphie:
http://www.chrestensen.de/portraet-durchwachsene-silphie.html

Pillierte Sida-Samen: Visscher MegaSeeds Sida Gold
http://www.visscherholland.com/DE/AGRAR/Biogas/Sida%20Gold

Biomałwa Samen und Pflanzgut von Sida
http://www.biomalwa.com/de/index.html

Sida- Demonstrationsanbau (2.5 ha) auf dem Tannhof (bei Welzheim)
http://www.bauer-tannhof.de/energiekonzept.html

Österreichisches Forschungsprojekt zu Sida (Beginn 04/2014):
Sida: Intelligent Densified Energy Carriers for Austria (Akronym: SIDecA)
http://www.ages.at/ages/landwirtschaftliche-sachgebiete/saat-und-pflanzgut/projekte-und-studien/sida-hermaphrodita-l-rusby/