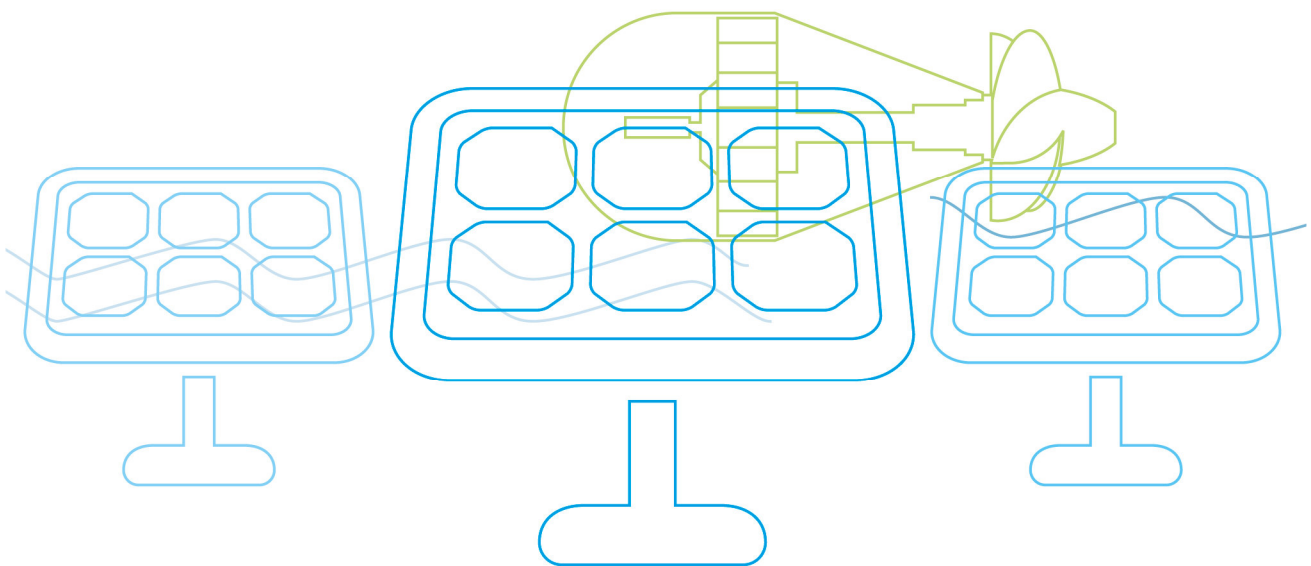




BISUNFUEL

Stoffliche u. energetische
Ganzpflanzennutzung aus der
Zwischenfrucht Zuckerhirse zur
Produktion von Ethanol und Biogas



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Projekttitel

**Stoffliche u. energetische Ganzpflanzennutzung aus der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse zur
Produktion von Bioethanol und Biogas**

Untertitel

BISUNFUEL

AutorInnen:

EVM Energieversorgung Margarethen am Moos GmbH

Lukas Wannasek

Universität für Bodenkultur Wien: Department für Nachhaltige Agrarsysteme – Institut für Landtechnik

Alexander Bauer

Ramon Enguidanos, BSc

Andreas Gronauer

Franz Theuretzbacher

TU-Wien, Institut: Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften

Anton Friedl

Felix Weinwurm

Adela Drljo

JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH

RESOURCES – Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit

Johanna Pucker

Gerfried Jungmeier

Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Meteorologie

Herbert Formayer

Thomas Gerersdorfer

David Leidinger

AGRAR PLUS GmbH

Josef Breinesberger

Manfred Kirtz

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
1 Einleitung	9
1.1 Schwerpunkte des Projektes	9
1.2 Einordnung in das Programm	11
1.2.1 Energiestrategische Ziele	11
1.2.2 Systembezogene Ziele	11
1.2.3 Technologiestrategische Ziele	12
1.3 Aufbau der Arbeit	12
1.3.1 AP 2 Vergleich Ertragspotenzial Hauptfrucht und Nebenfrucht mit Überprüfung auf Eignung zur Bioethanolrohstoffproduktion	12
1.3.2 AP 3 Ertragsoptimierung durch angepasste Anbau-, Logistik- und Lagerungsverfahren ...	13
1.3.3 AP4: Verfahrenstechnische Optimierung zur stofflichen und energetischen Nutzung der Zuckerhirse	13
1.3.4 AP 5 Ökologische Bewertung der kaskadischen Nutzung der Zweitfrucht Zuckerhirse	13
1.3.5 AP 6: Darstellung der Zukunftssicherheit der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse unter dem Aspekt des Klimawandels	13
1.4 Methoden	13
1.4.1 AP 2 Vergleich Ertragspotenzial Hauptfrucht und Zwischen-/Zweitfrucht mit Überprüfung auf Eignung zur Bioethanolrohstoffproduktion	13
1.4.2 AP 3 Ertragsoptimierung durch angepasste Anbau-, Logistik- und Lagerungsverfahren ...	15
1.4.3 AP4: Verfahrenstechnische Optimierung zur stofflichen und energetischen Nutzung der Hirse	16
1.4.4 AP 5 Ökologische Bewertung der kaskadischen Nutzung der Zweitfrucht Zuckerhirse	17
1.4.5 AP 6: Darstellung der Zukunftssicherheit der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse unter dem Aspekt des Klimawandels	17
2 Inhaltliche Darstellung	19
2.1 Charakteristika von Zuckerhirse (<i>Sorghum bicolor</i>)	19
2.2 Eignung von Zuckerhirse als Zweitfrucht als Rohstofflieferant für die Bioethanol- und Biogasproduktion	21
2.2.1 Anbauversuche der Zuckerhirse 2011 und Sortenvergleich von zucker- bzw. stärkebildenden Zuckerhirsevarianten	22
2.2.2 Verfahrenstechnische Aspekte hinsichtlich der Eignung von Zuckerhirse als Bioethanol- und Biogasrohstoff	30
2.2.3 Anbauversuche der Zuckerhirse 2012 und 2013	33
2.2.4 Lagerung der Zuckerhirse	40
2.2.5 Erfassung und Bewertung von Betriebsparametern an der Biogasanlage	41

2.2.6	Durchführung des Monitorings	44
2.2.7	Optimierung der Prozessstufen und Betriebsparameter	44
2.2.8	Ökologische Bewertung der kaskadischen Nutzung der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse 53	
2.2.9	Darstellung der Zukunftssicherheit der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse unter dem Aspekt des Klimawandels	63
3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	64
3.1	Ergebnis Vergleich Ertragspotenzial Hauptfrucht und Nebenfrucht mit Überprüfung auf Eignung zur Bioethanolrohstoffproduktion	64
3.2	Ergebnis Ertragsoptimierung durch angepasste Anbau-, Logistik- und Lagerungsverfahren	64
3.3	Ergebnisse des Monitorings	65
3.4	Ergebnis Verfahrenstechnische Optimierung zur stofflichen und energetischen Nutzung der Zuckerhirse	76
3.5	Ergebnis Ökologische Bewertung der kaskadischen Nutzung der Zweitfrucht Zuckerhirse	78
3.5.1	Treibhausgasemissionen.....	78
3.5.2	Primärenergiebedarf.....	81
3.5.3	Einflussfaktoren.....	83
3.6	Ergebnis Darstellung der Zukunftssicherheit der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse unter dem Aspekt des Klimawandels	84
3.7	Schlussfolgerung:.....	85
4	Ausblick und Empfehlungen.....	87
5	Literaturverzeichnis	88
6	Anhang	91
7	Kontaktdaten.....	92

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gegenüberstellung von zucker- und stärkebetonter Zuckerhirsesorten.....	23
Abbildung 2: Trockenmasseerträge aller untersuchten Kulturen im Vegetationsverlauf und in Abhängigkeit von Niederschlagssumme, Durchschnittstemperatur und Temperaturextremen.....	25
Abbildung 3: Abbildung der Zuckererträge pro Hektar der Sorte SG 1 als Hauptfrucht- und Zwischen-/Zweitfruchtkultur und der Sorte SG 2 im Vegetationsverlauf und in Abhängigkeit von Niederschlagssumme, Durchschnittstemperatur und Temperaturextremen.....	26
Abbildung 4: Zusammensetzung des Zuckergehalts der untersuchten Zuckerhirsehybriden im ersten Versuchsjahr	27
Abbildung 5: Zuckererträge pro Hektar der Zweitfruchtvarianten von SG1, SG2 und Zuckerhirse im Verlauf der Vegetationsperiode	28
Abbildung 6: Lagerbildung und Körnerfraß bei der 5. Versuchsernte der Zuckerhirsevarianten im Versuchsjahr 2011	30
Abbildung 7: Verfahrenslinien für die Produktion von Ethanol und Biogas aus Zuckerhirse.....	31
Abbildung 8: Ethanolertrag von Zuckerhirse und den Referenzrohstoffen Weizen und Mais.	33
Abbildung 9: Trockenmasseerträge der untersuchten Zuckerhirsevarianten an den 3 ausgewählten Standorten sowie Temperaturmaxima und -minima während der Vegetationsperiode.....	38
Abbildung 10: Trockenmasseerträge der untersuchten Zuckerhirsevarianten an den 3 ausgewählten Standorten sowie kumulierter Niederschlag während der Vegetationsperiode.....	39
Abbildung 11: Trockenmasseerträge der untersuchten Zuckerhirsevarianten im Versuchsjahr 2013.....	40
Abbildung 12: Schema der Prozessvariante 1 (Vergleichsprozess-Ethanol aus Mais, Biogas aus Maissilage)	45
Abbildung 13: Schema der Prozessvariante 2 (Getrennte Nutzung von Korn und Stroh einer Körnerhirsesorte).....	46
Abbildung 14: Schema der Prozessvariante 3 (Ganzpflanzenfermentation einer Zuckerhirsesorte)	50
Abbildung 15: Schema der Prozessvariante 4 (Getrennte Verarbeitung von Zuckersaft und Restpflanze)	52
Abbildung 16: Prozessschema für „Variante 2 – Separate Nutzung von Korn und Stroh“ für Biomethan und Bioethanol im Vergleich zum fossilen Referenzsystem mit Benzin und Erdgas	57
Abbildung 17: Prozessschema für „Variante 2a – Separate Nutzung von Korn und Stroh (inkl. CO ₂ -Nutzung)“ für Biomethan und Bioethanol im Vergleich zum fossilen Referenzsystem mit Benzin und Erdgas.....	57
Abbildung 18: Prozessschema für „Variante 3 – Ganzpflanzenfermentation“ für Biomethan und Bioethanol im Vergleich zum fossilen Referenzsystem mit Benzin und Erdgas	58
Abbildung 19: Prozessschema für „Variante 4 – Zuckersaftfermentation“ für Biomethan und Bioethanol im Vergleich zum Referenzsystem mit Benzin und Erdgas.....	58
Abbildung 20: Ethanolertrag von Zuckerhirse und den Referenzrohstoffen Weizen und Mais.	64
Abbildung 21: Anteile der eingesetzten Einsatzstoffe während der Monitoringphase.....	66
Abbildung 22: Verteilung der Einsatzstoffe über den Monitoringzeitraum	67

Abbildung 23: Raumbelastung in den Hauptfermentern (kombiniert) während des Monitorings der BGA	68
Abbildung 24: produzierter Strom, verbrauchter Strom und daraus abgeleiteter Eigenstrombedarf der BGA im Verlauf des Monitorings.....	69
Abbildung 25: absoluter Stromverbrauch während des Monitoring aufgeteilt auf die einzelnen Aggregate	70
Abbildung 26: Temperatur und Füllstände der Hauptfermenter im Verlauf des BGA Monitorings	71
Abbildung 27: FOS und TAC Werte bzw. deren Verhältnis zueinander im ersten Hauptfermenter.....	72
Abbildung 28: FOS und TAC Werte bzw. deren Verhältnis zueinander im zweiten Hauptfermenter	72
Abbildung 29: Vergleich von Ethanolpotential und Simulationsergebnissen	77
Abbildung 30: Treibhausgasemissionen von Biomethan und Bioethanol aus Zuckerhirse nach Art des Treibhausgases.....	79
Abbildung 31: Treibhausgasemissionen von Biomethan aus Zuckerhirse im Vergleich zu Erdgas und Biomethan aus Mais unterteilt in Prozessschritte.....	80
Abbildung 32: Treibhausgasemissionen von Bioethanol aus Zuckerhirse im Vergleich zu Benzin und Bioethanol aus Weizen und Mais.....	80
Abbildung 33: Treibhausgasemissionen und Einsparung von Treibhausgasemissionen von Biomethan und Bioethanol aus Zuckerhirse im Vergleich zu Benzin und Erdgas	81
Abbildung 34: Primärenergiebedarf von Biomethan und Bioethanol aus Zuckerhirse unterteilt in nicht erneuerbare, erneuerbare und andere Anteile	82
Abbildung 35: Primärenergiebedarf von Biomethan und Bioethanol aus Zuckerhirse im Vergleich zu Erdgas und Benzin unterteilt in nicht erneuerbar, erneuerbare und andere Energieträger	82
Abbildung 36: Anteil der Jahre, in denen alle klimatischen Mindestanforderungen erfüllt werden; INCA, 2003 - 2012	84
Abbildung 37: Zukünftige Entwicklung (2011 - 2040 links, 2036 - 2065 mitte, 2071 - 2100 rechts) der potentiellen Anbauggebiete;Aladin oben, RegCM3 unten.....	85
Abbildung 38: Detailliertes Schema der Fermentationskette.....	91
Abbildung 39: Detailschema der Ethanolanreicherung	91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anbaufläche von Hirse im Jahr 2012 (Quelle: FAOSTAT).....	19
Tabelle 2: Die weltweit wichtigsten Kulturpflanzen 2012 (Quelle: FAOSTAT).....	20
Tabelle 3: Durchschnittserträge von Hirse (Kornertrag) der 12 wichtigsten Erzeugerländer (FAO, 2012)	21
Tabelle 4: Integrierte Fruchtfolge für den Standort Margarethen am Moos	22
Tabelle 5: Vegetationsstadien und Wuchshöhe aller untersuchten Kulturen im Vegetationsverlauf	24
Tabelle 6: Daten zur Versuchsernte 2011 (4. Erntetermin)	26
Tabelle 7: Darstellung der Niederschlagssummen des langjährigen Durchschnitts und des Versuchsjahres 2011	29
Tabelle 8: Standortbedingungen für den Anbauversuch im zweiten Projektjahr (2012).....	34
Tabelle 9: Tausendkorngewichte der Hirsesorten	35
Tabelle 10: Erfasste Parameter Biogasanlagenmonitoring sowie dafür angewandte Messmethoden	42
Tabelle 11: Weenderanalyse der Zuckerhirseernte 2011 (Vierter Erntetermin).....	47
Tabelle 12: Zusammensetzung zweier Varianten von LE399 Alpha-Amylase, Liquozyme EX und und Liquozyme X	48
Tabelle 13: Zusammensetzung des produzierten Biogases in Prozessvariante 2.....	49
Tabelle 14: Weender Analyse von Sugargraze I der Versuchsernte 2011 (Vierter Erntetermin)	50
Tabelle 15: Zusammensetzung des in Variante 3 produzierten Biogases	51
Tabelle 16: Zusammensetzung des Biogases in Prozessvariante 4.	53
Tabelle 17: Übersicht der Varianten mit Zuckerhirse als Rohstoffe.....	55
Tabelle 18: Grunddaten zum Anbau der Zuckerhirse für das Versuchsjahr 2011	60
Tabelle 19: Mineralischer Stickstoffbedarf	61
Tabelle 20: Nutzungsgrad und Emissionswerte von Gaskessel, BHKW und Schwachgasbrenner (GEMIS 4.8 und Gemis-Datensatz Österreich, IINIAS 2013 und Umweltbundesamt 2009).....	62
Tabelle 21: Zusammensetzung Österreichischer Strommix 2007, davon 69% Stromaufbringung Österreich und 31% Stromimport (Beermann et al., 2010)	62
Tabelle 22: klimatische Mindestanforderungen von Zuckerhirse.....	63
Tabelle 23: während des Monitorings eingesetzte Stoffe und deren Trockenmasse bzw. organische Trockenmassegehalt	65
Tabelle 24: Gesamtmassenbilanz.....	73
Tabelle 25: Energiebilanz um das BHKW	74
Tabelle 26: Gesamtenergiebilanz	75
Tabelle 27: Stromaufnahme der el. Verbraucher	75
Tabelle 28: Zusammenfassung der Ergebnisse der Prozessvarianten	76
Tabelle 29: Treibhausgasemissionen beim Anbau von Rohstoffen in [t CO ₂ -Äq./ha*a].....	83

1 Einleitung

Der Anstieg des jährlichen Bedarfs an nachwachsenden Rohstoffen (NAWAROs) sowie die Tank - Tellerdiskussion macht es notwendig, neue Produktionsschienen für die benötigten Rohstoffe zu finden. Zwischen-/Zweitfrucht für die Produktion von NAWAROs sowie die kaskadische Nutzung wurden in diversen Forschungsprojekten im Labor in getrennten Projekten behandelt, aber im Großversuch unter mitteleuropäischen Praxisbedingungen noch nicht überprüft. Mittels Zuckerhirse (*Zuckerhirse*) steht für die Ackerbaugebiete im Osten Österreichs eine Pflanze als Zwischen-/Zweitfrucht zur Verfügung, die sich für diese Nutzung eignet. Teile der Pflanze können als Rohstoff für die Bioethanolindustrie und die Pflanzenrestmasse zur Biogasproduktion zweiter Generation mittels mechanischen Aufschluss herangezogen werden.

Die Motivation für den Biogasanlagenbetreiber ist einerseits die Möglichkeit einen Großteil seiner benötigten Rohstoffe aus Pflanzenrestmassen einer Zwischen-/Zweitfrucht zu beziehen und andererseits einen Rohstoff für die Bioethanolproduktion zu erzeugen. Für die Bioethanolindustrie steht dadurch ein neuer Rohstoff zur Verfügung. Dadurch ist es möglich sich von den Getreide- und Maispreisschwankungen abzukoppeln. Volkswirtschaftlich stehen hingegen durch einen geringeren Bedarf an Getreide bzw. Mais für die Bioethanolindustrie sowie der Biogasproduktion mehr Anbauflächen für die Nahrungsmittelindustrie zur Verfügung.

Ziel des Projektes ist es, anhand des vollständigen Produktionsablaufs aufzuzeigen, dass die Produktion des Rohstoffs für die Bioethanolindustrie und die Biogasproduktion zweiter Generation mittels Zwischen-/Zweitfrucht (*Zuckerhirse*) nachhaltig, ökologisch und wirtschaftlich umgesetzt werden kann. Dazu wird mittels Pflanzengroßversuche unter wissenschaftlicher Anleitung zusammen mit Landwirten, Biogasanlagenbetreiber und Bioethanolproduzent die potenzielle Zuckerhirsesorte zusammen mit der optimalen Ernte- und Lagermethode sowie die effizientesten Methode für die Bereitstellung des Rohstoffes für die Bioethanolindustrie und der Biogasanlage erarbeitet. Dies erfolgt aus einer Kombination aus Laborarbeiten sowie einem technischen Monitoring, welches sich über den gesamten Produktionszyklus für die Bereitstellung der Rohstoffe und der Überprüfung der Eignung der Bagasse für die Biogasproduktion erstreckt.

1.1 Schwerpunkte des Projektes

Durch die kaskadische Ganzpflanzennutzung von Zuckerhirse zur Produktion eines Rohstoffs für die Bioethanolindustrie sowie zur Nutzung der Pflanzenrestmasse mittels mechanischen Aufschluss in Biogasanlagen kann pro Flächeneinheit ein wesentlicher Mehrertrag erwirtschaftet werden, wobei die Hauptfrucht für die Nahrungsmittelindustrie eingesetzt und die Zwischen-/Zweitfrucht zur Produktion für die Bioethanolindustrie sowie Biogasproduktion herangezogen wird. Dadurch kann die Fruchtfolge aufgelockert, und der Anteil an Maismonokulturen reduziert werden. Dazu werden im Projekt Großversuchsflächen angelegt, auf denen der Pflanzzeitpunkt, Pflegemaßnahmen sowie Erntezeitpunkt variiert werden, um aus zuvor definierten Sorten von Zuckerhirse jene pflanzenbaulichen Ergebnisse zu bringen, welche für den Einsatz zur Produktion eines Rohstoffes für die Bioethanolindustrie sowie die

Bereitstellung der Pflanzenrestmasse für die Produktion von Biogas zweiter Generation die besten Ergebnisse erzielen.

Für die Bioethanol Rohstoffbereitstellung bietet Zuckerhirse prinzipiell zwei Ansätze:

- Zuckerproduktion aus der Ganzpflanze
- Stärkeproduktion aus den Früchten.

Gewisse Sorten weisen einen sehr hohen Zuckergehalt in den Stängeln auf, welcher entweder abgepresst und als Pflanzensaft für die Ethanolproduktion bereitgestellt, oder die zerkleinerte Ganzpflanze für den Fermentationsprozess eingesetzt werden kann. Wichtig für die Ethanolproduktion ist ein kontinuierlicher Belieferungsprozess. Dies kann aber aufgrund des kurzen Zeitfensters der Ernte nur bewerkstelligt werden, indem entweder der gewonnene Zuckersaft eingedickt wird oder die Ganzpflanze bei der Einlagerung so behandelt wird, dass der Zuckerabbau bei der Lagerung minimiert wird.

Bei den Stärkesorten erhält man stärkehaltige Körner welche in Ihrer Größe vergleichbar sind mit Weizen. Diese könnten als Ethanolrohstoffersatz für Mais oder Weizen herangezogen werden.

Neben Laboranalysen bezüglich der Eignung der gelagerten Zwischen-/Zweitfrucht für die gesteckten Ziele werden die produzierten Pflanzen in einem Großversuch mittels Versuchsanlage, welche in eine bestehende Biogasanlage integriert wird, auf den Ertrag hinsichtlich Rohstoff für die Bioethanolindustrie sowie den Biogasertrag zweiter Generation überprüft.

Weiters ist es bei der bestehenden Biogasanlage möglich, Aussagen über allfällige Auswirkungen auf das Biogas hinsichtlich Reinigung zur Treibstoffqualität zu machen, da die Anlagenbetreiber die erste in Österreich installierte Insel - Biogastankstelle und damit über eine eigene Gasaufbereitungsanlage verfügen.

Als weiterer Schwerpunkt des Projektes ist neben der Produktion und Verwertungspotenzial auch eine ökologische Bewertung der Produktion von Bedeutung. Um Zuckerhirse als Zwischen-/Zweitfrucht in den Bioethanolprozess einführen zu können, müssen die Voraussetzungen der EU-Richtlinie RL 2009/28/EG eingehalten werden. Laut der EU-Richtlinie (RL 2009/28/EG) müssen derzeit Biokraftstoffe eine Mindesteinsparung von Treibhausgasemissionen in der Höhe von 35% erreichen. Ab 1.1.2017 muss die Einsparung 50% betragen und ab 1.1.2018 muss die Einsparung bei Anlagen die ihre Produktion im Jahr 2017 oder später gestartet haben, 60% betragen. Im Zuge des Projektes werden die einzelnen Produktionsschritte erhoben sowie für die Ethanolproduktion auf bestehende Berechnungen zurückgegriffen, um eine Aussage über die ökologische Eignung entsprechend der EU-Richtlinie zu geben.

In einem weiteren Arbeitspaket wird die Zukunftssicherheit der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse untersucht. Bedingt durch den Klimawandel werden sich im nächsten Jahrzehnt die Anbaubedingungen auf Österreichs Ackerflächen wesentlich ändern. Ziel dieses Schwerpunktes ist es mittels

Klimasimulationen die potenziellen Anbauggebiete der Zuckerhirse als Zwischen-/Zweitfrucht in Österreich festzustellen.

1.2 Einordnung in das Programm

1.2.1 Energiestrategische Ziele

Die Nutzung von Flächen, die während der Sommermonate besonders nach früh räumenden Kulturen unbestellt sind und dadurch stark durch Erosion und Nährstoffverfrachtung betroffen sind, können durch den Anbau von Zwischen-/Zweitfrüchten nachhaltig und ökologisch geschützt werden. Problematisch ist die Nutzung der Zwischen-/Zweitfrucht, da Kosten und Nutzen für die Betriebsführer oftmals nicht in Einklang gebracht werden können. Die kaskadische Nutzung der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse zur Produktion eines Rohstoffes für die Bioethanolindustrie sowie die Nutzung der Pflanzenrestmasse für die Biogasproduktion zweiter Generation hilft einerseits dem Landwirt mit zusätzlichen Einkünften und andererseits erhalten Biogasanlagenbetreiber und Bioethanolproduzenten einen Rohstoff, der nicht durch Börsennotierungen geprägt wird. Weiters werden durch die Nutzung der Zweitfruchtprodukte als Rohstoff in der Bioethanolindustrie sowie in der Biogasanlage Anbauflächen frei, welche für die Nahrungsmittelproduktion eingesetzt werden können. Dadurch werden Ressourcen- und Energieeffizienz gesteigert, und durch die eigene Produktion werden Abhängigkeiten einerseits bei der Nahrungsmittelproduktion andererseits auch bei der Stromproduktion vom Ausland verkleinert. Durch die kaskadische Nutzung bei der Biogasanlage wird auch ein weitestgehend CO₂-neutraler Rohstoff für die Bioethanolindustrie sowie für Biogasproduzenten verfügbar, welcher durch den kleinregionalen Ansatz die Wirtschaftskraft vor Ort anhebt und klimaschützende Maßnahmen durch die Produktion von Ökostrom langfristig absichert.

1.2.2 Systembezogene Ziele

Die kaskadische Ganzpflanzennutzung der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse und die Erschließung einer neuen nachwachsenden Ressource tragen dazu bei, dass durch die Bereitstellung von Rohstoffen für die Bioethanolindustrie sowie für Biogasanlagen die Abhängigkeit gegenüber fossilen Energieträgern sinkt. Durch die kaskadische Ganzpflanzennutzung der Zweitfrucht an einem Standort ergibt sich eine höhere Umwelteffizienz, da einerseits geringere Anbauflächen benötigt werden und andererseits sich durch die Produktion von Zuckerdicksaft in der Biogasanlage Synergien, wie die Nutzung von Personal, Betriebstätten (kein zusätzlicher Flächenverbrauch), Restwärme aus Ökostromproduktion, usw. ergeben, welche die Gesamtenergienutzung steigern.

Weiters wird in diesem Großversuch zum ersten Mal in Österreich Biogas zweiter Generation aus den Pflanzenrestmassen mittels mechanischen Aufschluss für eine Biogasanlage erzeugt. Die in vielen Studien beschriebene Möglichkeit der Nutzung von Zellulose und Hemizellulose zur Biogasproduktion wurde in Österreich nur im Labormaßstab erforscht und in Modellen dargestellt. Diese Verfahren sowie deren technische Umsetzung haben das Potenzial zur Schlüsseltechnologie dieses Jahrzehnts. Für Biogasanlagenbetreiber aber auch für andere Industriezweige stehen nach marktreifer Einführung dieser Technologien neue Rohstoffe in Form der Ackernebenprodukte wie zum Beispiel Stroh zur Verfügung. In dem vorgestellten Projekt wird der Einsatz von Pflanzenreststoffen aus einer kaskadischen

Ganzpflanzennutzung in einer großtechnischen Versuchsanlage erprobt und gibt dadurch erstmals Aufschluss über deren großtechnische Umsetzung bei einer Biogasanlage. Anhand der Ergebnisse bzw. des erarbeiteten Leitfadens ist es für Biogasanlagenbetreiber sowie für Landwirte ersichtlich unter welchen Bedingungen ein Umstieg auf neue Produktionsverfahren sinnvoll ist, bzw. zeigt er zukünftigen Biogasanlagenbetreibern auf, unter welchen Bedingungen ein stabiler, nachhaltiger, ökologischer und wirtschaftlicher Betrieb einer Biogasanlage möglich ist.

1.2.3 Technologiestrategische Ziele

Die kaskadische Nutzung einer Ganzpflanze durch die Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse zur Produktion von Rohstoff für die Bioethanolindustrie sowie der Produktion von Biogas zweiter Generation mittels mechanischen Aufschluss im Großversuch stellt vor allem für Wissenschaft, Anlagekomponentenlieferanten, Biogasanlagenbetreiber sowie Bioethanolproduzenten eine Herausforderung dar, welche nur durch Forcierung von Kooperationen zwischen den einzelnen Partnern zu meistern ist.

Durch die Nutzung der Ergebnisse bei bestehenden Biogasanlagen bzw. bei neu zu errichtenden Biogasanlagen steigt der inländische Wertschöpfungsanteil im Bereich der Energiesysteme, und darüber hinaus werden durch die kaskadische Nutzung der Ganzpflanzen Bereiche miteinander verknüpft, welche in den eingefahrenen Schienen bis dato keine Anknüpfungspunkte hatten (Biogasanlagenbetreiber und Bioethanolproduzenten).

Weiters erfolgt durch die kaskadische Ganzpflanzennutzung der Zweitfrucht eine höhere Ressourceneffizienz für den Biogasanlagenbetreiber, da Synergien im Betrieb der Biogasanlage genutzt werden können (Personal, Flächen, Restwärme aus der Ökostromproduktion), und dadurch die Gesamteffizienz der Anlage erhöht wird.

Dadurch kommt es zu einer Stärkung der Klimakompetenz national und international gesehen, da ein solches Produktionsverfahren noch nicht umgesetzt wurde. Durch die Erfahrungen aus dem Projekt kann eine Vielzahl an Neuprojekten initiiert werden.

Zusätzlich sind die Ergebnisse aus der Produktion von Biogas zweiter Generation wichtig, da Ableitungen für andere Pflanzenreststoffe, die bis dato nur im Labormaßstab untersucht wurden, erklärbar sind, und dadurch weitere Verfahren zur Nutzung von Pflanzenreststoffen wie Getreidestroh oder Maisstroh für die Biogasanlagenbetreiber als Spin-off-Technologie durch adaptierte Verfahrenslösungen umsetzbar sind.

1.3 Aufbau der Arbeit

1.3.1 AP 2: Vergleich Ertragspotenzial Hauptfrucht und Nebenfrucht mit Überprüfung auf Eignung zur Bioethanolrohstoffproduktion

Ziel dieses AP ist der Vergleich zwischen den Ertragsverhältnissen von Zuckerhirse bei Hauptfrucht und Zwischen-/Zweitfrucht sowie der Nachweis der Eignung von Zuckerhirse als Rohstofflieferant für die Bioethanolindustrie

1.3.2 AP 3: Ertragsoptimierung durch angepasste Anbau-, Logistik- und Lagerungsverfahren

Optimierung des gleichzeitigen Zucker/Stärke- und Biogasertrages aus Zuckerhirse durch angepasste pflanzenzüchterische und pflanzenbauliche Methoden sowie Logistik- und Lagerungsverfahren

1.3.3 AP 4: Verfahrenstechnische Optimierung zur stofflichen und energetischen Nutzung der Zuckerhirse

Ziel ist eine verfahrenstechnische Optimierung der Prozessstufen (Aufbereiten Biogasrohstoff) und deren Betriebsparameter zur Erzielung der höchstmöglichen und qualitativ hochwertiger Bioethanolrohstoffe (Zucker oder Stärke) bzw. Biogaserträge.

1.3.4 AP 5: Ökologische Bewertung der kaskadischen Nutzung der Zweitfrucht Zuckerhirse

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Erstellung einer ökologischen Bewertung von Zuckerhirse als Zwischen-/Zweitfrucht zur Produktion von Biogas und Bioethanol. Es werden die Umweltwirkungen, Beitrag zum Treibhauseffekt und Primärenergiebedarf dieses Energiesystems mittels Lebenszyklusanalyse bestimmt und Kriterien für eine Optimierung ermittelt

1.3.5 AP 6: Darstellung der Zukunftssicherheit der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse unter dem Aspekt des Klimawandels

Es werden die klimatischen Ansprüche der untersuchten Zuckerhirsesorten quantifiziert. Eine Gegenüberstellung dieser Ansprüche mit den derzeitigen klimatischen Bedingungen in Österreich und den durch den Klimawandel zu erwartenden Veränderungen, liefert die Anbau- und Ertragspotenziale der untersuchten Sorten unter derzeitigen und zukünftigen klimatischen Bedingungen in Österreich.

1.4 Methoden

1.4.1 AP 2: Vergleich Ertragspotenzial Hauptfrucht und Zwischen-/Zweitfrucht mit Überprüfung auf Eignung zur Bioethanolrohstoffproduktion

➤ Vergleich Hauptfrucht Zwischen-/Zweitfrucht

Empirischer Vergleich zwischen Hauptfrucht und Zwischen-/Zweitfrucht in den Bereichen Zucker, bzw. Stärkeertrag und Laborversuche im Bereich Lagerung und Rohstoffgewinnung bzw. Zwischenproduktgewinnung für die Bioethanol und Biogasgewinnung.

➤ Zucker/Stärkegehaltsanalyse

Die Zuckergehalte der einzelnen Proben wurden mittels Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (kurz GCMS) bestimmt. Die Bestimmung der Stärke wurde mittel VDLUFA Methode durchgeführt.

➤ Zuckeranalytik mit GCMS

Die Zuckerhirse wurde zusammen mit Trockeneis in einer Schneidmühle (Retsch) auf eine Länge von ca. 3 bis 5 mm zerkleinert. Eine aliquote Probe von 3 g wurde in einer Cryomühle (Retsch) auf eine Größe von <1 mm vermahlen und anschließend für 24 h lyophilisiert. Zur Derivatisierung werden 10 mg der lyophilisierten Probe mit 200 µl Pyridin [enthält zusätzlich 200 µg Methylgalactopyranosid (interner Standard) und 8 mg Ethoxyamin (40 mg in 1 ml Pyridin)] vermischt. Das Gemisch wird in geschlossenen Probenbehältern für eine Stunde bei 70°C erhitzt. Nach der Oximation werden nochmals 200 µl Pyridin [enthält zusätzlich 4-(dimethylamino)pyridin (1.5 mg in 1 ml Pyridin)] und 200 µl N,O-bis(trimethylsilyl)trifluoroacetamid (BSTFA) [enthält zusätzlich 10 % Trimethylchlorosilan] zugegeben. Das Gemisch wird anschließend zwei Stunden lang auf 70°C erhitzt, mit Ethyl Acetat (0,6 ml) verdünnt und gefiltert. Ein Aliquot von 0,2 µl wird anschließend in das GCMS System injiziert.

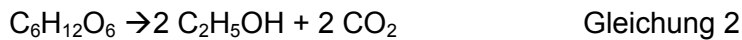
Die GCMS wurde an einer GC 7890A / MSD 5975C mit einer geschmolzenen Silicium HP-5ms (30 m; 0,25 mm; 25 µm) Säule und Helium als Trägergas durchgeführt. Die Fließrate betrug 27,5ml/min bei einem Trägergasdruck von 46,9 kPa und der daraus resultierende Säulenfluss betrug 0,9 ml/min. Die Temperatureinstellungen waren wie folgt: 50°C (5 min), 5°C/min bis 280°C (68 min). Die Probe wurde bei einer Einlasstemperatur von 260°C „splitless“ (d.h. die ganze Probe wird verdampft und durchläuft die Säule) injiziert. Die Ionisation wurde mit einer Elektronenstoßionisation bei 70 eV durchgeführt. Die Daten wurden mit dem Programm MSD Chemstation E.2.01.1177 (Agilent Technologies, USA) erfasst und verarbeitet.

➤ Bestimmung des Stärkegehalts

Der Stärkegehalt wurde auf Basis der amtlichen VDLUFA Methode aus dem Band „Die chemische Untersuchung von Futtermitteln“ durchgeführt. Zunächst wird ein Teil der Probe mit verdünnter Salzsäure behandelt. Nach Klärung und Filtration wird die optische Drehung der Lösung polarimetrisch gemessen. Bei der zweiten Bestimmung wird die Probe mit 40%igem Ethanol extrahiert. Nach Behandlung des Filtrats mit Salzsäure wird sie geklärt, filtriert und die optische Drehung unter den gleichen Bedingungen wie bei der ersten Bestimmung gemessen. Der Unterschied zwischen den beiden Messungen, multipliziert mit einem bekannten Faktor, ergibt den Stärkegehalt der Probe.

➤ Ethanolertrag

Berechnung des Ethanolertrages aufgrund des nutzbaren Zucker-, bzw. Stärkegehaltes entsprechend Literaturangaben für die Umsetzung von Zucker bzw. Stärke in Ethanol.



1.4.2 AP 3 Ertragsoptimierung durch angepasste Anbau-, Logistik- und Lagerungsverfahren

➤ Anbau

Entsprechend wissenschaftlicher Methodik (Auswahl des Standorts, Versuchsdesign, Wiederholungen,...) werden auf den Versuchsflächen der Biogasanlage St. Margarethen/Moos jährlich 3 Hirse-Sorten angebaut und auf ihre Ertragsleistung (Zucker-/Stärke, Biomasse) und Trockensubstanzgehalte (=> ev. Silierverluste) untersucht. Das Versuchsdesign beinhaltet auch Varianten in Bezug auf unterschiedliche Anbau- und Erntezeitpunkte (unter Berücksichtigung der Wachstumsperioden der Hauptfrüchte), Abstände zwischen und in den Reihen, sowie Pflege- und Düngemaßnahmen (Gärrestmenge pro Hektar, Art und Zeitpunkt der mechanischen Beikrautbekämpfung,...).

➤ Ernte

Sämtliche Ernten wurden zwischen 9 und 12 Uhr durchgeführt, da hier die Photosyntheseleistung am höchsten ist. Für die jeweilige Sorte wurden fünf über das Feld verteilte Beprobungen durchgeführt. Bei jeder Beprobung wurden in einer Reihe, auf einer Länge von drei Metern, sämtliche Pflanzen ca. 10 cm über dem Boden abgetrennt und zu Paketen zusammengefasst. Zur Bestimmung des Frischmasseertrags wurden die Pakete vor Ort gewogen. Zur Ermittlung des Zuckergehalts wurde von jeder Sorte eine Pflanze vor Ort mit Hilfe von Trockeneis tiefgefroren und anschließend bis zur weiteren Analytik im Tiefkühlraum bei -20°C gelagert. Zur Bestimmung des Trockensubstanzgehalts wurde eine Mischprobe aus jeweils zwei Pflanzen aus jedem Paket angefertigt. Anschließend wurde die Probe gehäckselt und bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

➤ Lagerung

Im Hinblick auf optimale Konservierung des Zuckergehaltes wird die Lagerung im Flach- und Schlauchsilo (bei unterschiedlicher Verdichtung) verglichen;

Abbauprozesse werden anhand der Silagequalität (Gärsäuren inkl. TS-Gehalt, Weender-Analyse, Zuckergehalt,...) vor und während der Silierung (Probenahme in regelmäßigen Abständen) und mittels Temperaturmessungen bestimmt.

➤ Datenbereitstellung für ökologische Bewertung

Die erhobenen Stoff- und Energieströme sowie Verfahrens- und Prozesskennzahlen werden berechnet und an den Projektpartner zur Durchführung einer ökologischen Bewertung bereitgestellt.

1.4.3 AP4: Verfahrenstechnische Optimierung zur stofflichen und energetischen Nutzung der Hirse

➤ Erhebung Istzustand Biogasanlage

Input/Outputanalyse: Bilanzierung der Stoff- und Energieströme der Ist-Situation

➤ Rohstoffanalyse

Proben vor und nach Vorbehandlung sowie nach Pressen und Vorbehandlung werden im Batch-Versuch (VDI 4630) auf spezifische Gasausbeute untersucht (ist entfallen, da eine Ethanolrohstoffproduktion aufgrund von Zuckersaftproduktion unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht wirtschaftlich dargestellt werden kann).

➤ Prozesskennzahlen bei beigemischten Zuckerhirsereststoffen

Empirisches erfassen der Prozesskennzahlen (Substratinput, Biogasausbeute, Gasqualität) eventueller Prozessstörungen (Schwimmschichten,...)

➤ Optimierung der Prozessstufen und Betriebsparameter

Für die Biogas- und Bioethanolproduktion zur Erarbeitung optimaler Betriebsparameter für die unterschiedlichen Verfahrensketten für die Zucker oder die Stärkesorten sowie für die ökologische Bewertung der produzierten Rohstoffe Erarbeitung wesentlicher Produktionskennzahlen. Die Simulation der Prozessstufen und Prozessparameter wurde mittels des Programmes Aspen Plus durchgeführt.

1.4.4 AP 5 ökologische Bewertung der kaskadischen Nutzung der Zweitfrucht Zuckerhirse

➤ Ökologische Bewertung

Die Treibhausgasemissionen bei der Herstellung und Verwendung von Bioethanol und Biomethan aus Zuckerhirse wurden auf Basis der in der EU Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (RL 2009/28/EG) angeführten Berechnungsmethode bestimmt. Dabei wurden die Treibhausgasemissionen beim Anbau der Zuckerhirse (eec), der Verarbeitung zu Bioethanol und Biomethan (ep), von Transport- und Vertrieb (etd) und Nutzung (eu) berücksichtigt. Entsprechend den Vorgaben der EU-Richtlinie wurden die Treibhausgasemissionen auf den Energieinhalt der Kraftstoffe bezogen (g CO₂-Äquivalent/MJ Kraftstoff), wobei der Anteil der beiden Biokraftstoffe aufgeteilt wird (z.B. 36% Biomethan und 64% Bioethanol). Zur Bestimmung der Einsparung von Treibhausgasemissionen durch Biomethan und Bioethanol aus Zuckerhirse wurden diese den fossilen Kraftstoffen Erdgas und Benzin gegenübergestellt. Weiters wurde ein Vergleich zu Standardwerten der EU Richtlinie und Literaturwerten für die Erzeugung von Biomethan aus Mais und Bioethanol aus Mais und Weizen durchgeführt. Für die Ermittlung des Primärenergiebedarfs, der nicht Teil der EU Richtlinie ist, wurde methodisch gleich vorgegangen wie für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen.

Die Grunddaten für die Ermittlung von Treibhausgasemissionen und Primärenergiebedarf setzen sich aus

- projektspezifischen Daten (z.B. Zuckerhirseerträge basierend auf den Anbauversuche im Jahr 2011, Simulationsergebnisse der Biomethan- und Bioethanolproduktion aus Zuckerhirse),
- Daten aus LCA-Datenbanken (GEMIS Österreich, ecoinvent 3.0) und
- Literaturwerten (z.B. Stickstoffverluste bei der Aufbringung von Gärresten zur Düngung) zusammen.

1.4.5 AP 6: Darstellung der Zukunftssicherheit der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse unter dem Aspekt des Klimawandels

➤ Klimatische Bewertung zukünftiger Anbauggebiete in Österreich

Mittels der Anbauversuche bzw. anhand von Literaturquellen wurden die klimatischen Ansprüche von Zuckerhirse quantifiziert. Die Analyse des gegenwärtigen Anbaupotentials wurde mittels des Datensatzes INCA (von der Zentralanstalt für

Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)) durchgeführt. Das zukünftige Anbaupotential wurde mittels 3 verschiedener regionaler Klimamodelle (RCMs), „Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational“ (Aladin), „REgional Modell“ (REMO) und RegCM3 berechnet.

Die räumliche Auflösung liegt jeweils bei 1 km x 1 km. INCA liegt für den Zeitraum von 2003 – 2012 vor, die Klimaszenarien von 1951 bis 2100. Um systematische Fehler bei den RCMs zu minimieren wurden diese mittels Quantilemapping fehlerkorrigiert. Um die relativ grobe räumliche Auflösung der RCMs zu erhöhen wurde eine Lokalisierung mittels INCA Daten durchgeführt.

Da keine flächigen Informationen zur Bodentemperatur vorliegen, wurde eine Regressionsbeziehung zwischen minimaler Bodentemperatur und mittlerer Lufttemperatur auf Tagesbasis hergestellt und so die minimale Bodentemperatur abgeleitet.

2 Inhaltliche Darstellung

Verschiedene Entwicklungen der letzten Jahre bzw. Jahrzehnte bedingen die Notwendigkeit auf dem Gebiet der landwirtschaftlichen Bioenergieproduktion von konventionellen Energiepflanzen, allen voran Mais, auf alternative Kulturarten auszuweichen. Durch vermehrte Wetterextreme kommt es zum Beispiel im Sommer zu längeren Dürreperioden, wodurch die Nutzung von trockenheitsresistenten Pflanzen an Bedeutung gewinnt. Ein weiterer Faktor ist der Schädlingsdruck, der sich vor allem auf die Erträge von intensiv genutzten Kulturarten wie Mais negativ auswirkt.

Neben einer Anpassung der Kultivierung von Ackerfrüchten an negative Einwirkungen wie Trockenheit und Schädlingsdruck, kann auch eine Optimierung der Fruchtfolge an die lokalen Gegebenheiten ein wesentlicher Faktor für eine erfolgreiche Produktion von Energiepflanzen sein.

Speziell die Vegetationsdauer sowie Effekte der landwirtschaftlichen Nutzung auf den Boden kommt in diesem Zusammenhang eine spezielle Bedeutung zu. Durch eine Verschiebung der Ansaat einer Sommerfrucht von beispielsweise April auf Ende Mai kann eine bessere Nutzung der Vorfrucht wie etwa Grünroggen als Winterzwischenfrucht erreicht werden. Der Intensität der Durchwurzelung des Bodens kommt, vor allem im Hinblick auf die Bodenauflockerung sowie dem Humusaufbau, eine gewichtige Rolle zu.

Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen, welche im Rahmen von Forschungstätigkeiten für dieses Projekt, behandelt werden:

- A. Welche Charakteristika von Zuckerhirse sind für die Kultivierung als Energiepflanze in einer typisch regionsspezifischen Fruchtfolge relevant?
- B. Wie wirkt sich ein verspäteter Anbauzeitpunkt auf Biomasseerträge und Inhaltsstoffe aus?
- C. Wie müsste eine Logistikkette aufgebaut sein um die kombinierte Ethanol- und Biogasproduktion aus Zuckerhirse zu ermöglichen?
- D. Welche Adaptierungen müssen an einer bestehenden Biogasanlage vorgenommen werden um mit dem geänderten Substratangebot betrieben werden zu können?
- E. Sortenwahl für die Ethanolrohstoffproduktion (Zucker oder Stärkesorten)
- F. ökologische Bewertung von Biogas und Bioethanol aus Zuckerhirse
- G. Nutzungsverlagerung aufgrund von Klimaänderungen in den nächsten Jahrzehnten

2.1 Charakteristika von Zuckerhirse (*Sorghum bicolor*)

Zuckerhirse ist, genauso wie Mais, eine C4 Pflanze (Geng et al., 1989) und hat ihren Ursprung im östlichen Afrika. Sie ist dort auch heute noch eine der wichtigsten Kulturpflanzen. Die Nutzung umfasst in diesen Regionen hauptsächlich den direkten Einsatz als Lebensmittel, entweder als Brei oder zum Brauen von Bier, findet aber auch als Tierfutter Verwendung. In Tabelle 1 sind die weltweiten Anbauflächen von Zuckerhirse (Stand 2012) dargestellt.

Tabelle 1: Anbaufläche von Hirse im Jahr 2012 (Quelle: FAOSTAT)

	Land	Anbaufläche [ha]
	weltweit	38.161.647
1	Indien	6.320.000
2	Nigeria	5.500.000
3	Sudan	4.103.400
4	Niger	3.111.086
5	Vereinigte Staaten von Amerika	2.005.240
6	Mexiko	1.819.945
7	Burkina Faso	1.788.695
8	Äthiopien	1.711.485
9	Argentinien	913.815
10	Tschad	900.000
84	Österreich	1.200

In den USA werden hauptsächlich Zuckerhirsehybriden verwendet. Diese lagern im Stamm freie Zucker ein, welche zu Sirup weiterverarbeitet werden können. Global betrachtet kommt Hirse bereits eine große Rolle als Kulturpflanze in der gesamten landwirtschaftlichen Produktion zu. Im Jahr 2012 wurden auch bereits in Österreich 1.200 ha Hirse angebaut (Tabelle 1).

Tabelle 2: Die weltweit wichtigsten Kulturpflanzen 2012 (Quelle: FAOSTAT)

	Kulturpflanze	Anbaufläche [ha]
1	Weizen	215.489.485
2	Mais	177.379.507
3	Reis	163.199.090
4	Soja	104.997.253
5	Gerste	49.525.988
6	Zuckerhirse	38.161.647

Zwei Haupteigenschaften von Hirse, wie man sie auch von anderen C4-Pflanzen kennt, sind ihre Wärmebedürftigkeit sowie ihre Frostepfindlichkeit, wonach sich auch die Anbauverbreitung richtet. Andererseits zeichnet sich die Hirse durch eine hohe Trockenheitsresistenz und durch geringe Bodenansprüche aus (Farré and Faci, 2006; Zegada-Lizarazu and Monti, 2012). Unter optimalen Voraussetzungen können die Erträge höher als bei der Kultivierung von Mais sein (Amaducci et al., 2004).

Demnach wird *Zuckerhirse* bevorzugt in tropischen und subtropischen Gebieten angebaut. C4-Pflanzen nutzen den Stoffwechselweg der räumlichen CO₂ Vorfixierung. Sie weisen dadurch höhere Photosyntheseleistungen auf was in günstigeren Transpirationskoeffizienten resultiert.

Tabelle 3: Durchschnittserträge von Hirse (Kornertrag) der 12 wichtigsten Erzeugerländer (FAO, 2012)

Staat	Ertrag [t/ha]
United States of America	4,51
Mexico	3,92
India	0,86
Nigeria	1,01
Argentina	4,83
Ethiopia	1,84
Sudan (former)	0,47
Burkina Faso	1,00
China	3,16
Australia	3,10
Brazil	2,32
Niger	0,39

Vergleicht man die Hektarerträge an Hirse der produzierenden Länder aus Tabelle 3, fallen deutliche Unterschiede von bis zu achtfachen Mengendifferenzen auf. Hierbei korrelieren Höchsterträge mit hohem Einsatz von Dünger, Pflanzenschutzmittel und Bewässerungen wie beispielsweise in den USA und Argentinien. Die niedrigsten Erträge verzeichnet man wie erwartet in Ländern wie Indien und dem Sudan mit niedrigem Betriebsmitteleinsatz.

Einfluss auf den weltweiten Produktionsmengenverlauf hat aber beispielsweise der Zuchtfortschritt für Trockenresistenz bei Mais. So werden Hirseanbauflächen, welche sich im Grenzgebiet für den Maisanbau befinden, durch trockenresistentere Hybridsorten von Mais verdrängt. Auf Grund der hohen Trockenresistenz von Hirse, wird dieser bevorzugt dort kultiviert, wo der Maisanbau nicht mehr möglich ist. So stellt Hirse beispielsweise in trockenen Regionen Afrikas die wichtigste Getreideart dar.

Hitze- und Trockenheitstoleranz in Verbindung mit einem sehr guten Biomassebildungsvermögen machen die Hirse zu einer sehr attraktiven Pflanze im Zwischen-/Zweitfruchtanbau nach frühräumenden Kulturen. Dieselben Eigenschaften machen Hirse zu einer Kulturpflanze, die großes Potential bezüglich Anbau- und Verbreitungsgebiet in Hinblick auf den Klimawandel aufweist.

2.2 Eignung von Zuckerhirse als Zweitfrucht als Rohstofflieferant für die Bioethanol- und Biogasproduktion

Im Rahmen von Anbauversuchen auf Ackerflächen im Bereich Margarethen am Moos wurde in den drei Projektjahren die prinzipielle Eignung von verschiedenen Zuckerhirsehybriden für die kombinierte Ethanol- und Biogasproduktion untersucht. Da lediglich die Möglichkeit einer Ethanolproduktion erster Generation betrachtet wurde, waren nur Zuckerhirsehybriden, die entweder stärkehaltige Körner oder fermentierbaren Zucker produzieren, Gegenstand der Untersuchungen. Da Zuckerhirse auch eine große Menge an Lignocellulose bildet, würde auch die Produktion von Ethanol der zweiten Generation

prinzipiell in Frage kommen. Da es jedoch im Moment nur sehr eingeschränkt wirtschaftliche Verfahren zu deren Produktion am Markt gibt, wurde diese Möglichkeit vorerst nicht weiter verfolgt.

Ein wesentliches Ziel der Anbauversuche war es, die Anbauzeitpunkte der Zuckerhirsehybriden zu variieren und die Nutzung von Zuckerhirse als Zwischen-/Zweitfrucht zu untersuchen. Dies bedingt vor allem eine enge Integration in die Fruchtfolge, d.h. dass jeweils vor dem Anbau und nach der Ernte nur kurze Zeitfenster für eine eventuelle Bodenbearbeitung zur Verfügung stehen. Dadurch kann außerdem auch eine möglichst durchgängige Bodenbedeckung und somit eine verringerte Wasser- bzw. Winderosion erzielt werden.

In Tabelle 4 ist eine, für den Standort Margarethen am Moos mögliche, integrierte Fruchtfolge dargestellt. Es wird sichergestellt, dass im Herbst immer genügend feuchte Zwischenfruchtbiomasse verfügbar ist, die zu dem eher trockenen Zuckerhirse- bzw. Maisstroh gemischt werden kann um eine gute Konservierung (in diesem Fall Silierung) gewährleisten zu können. Die integrierte Fruchtfolge erlaubt eine gleichzeitige Produktion von Lebensmitteln, Futtermitteln und Energie. Die Nutzung von Zwischenfrüchten sowie die Rückführung vom Gärrest sind wesentlich für die Sicherstellung der Bodenfruchtbarkeit.

Tabelle 4: Integrierte Fruchtfolge für den Standort Margarethen am Moos

Feldfrucht	Energetische Verwertung	Lebensmittel/Futtermittel/Industrie
Körnermais	Stroh für Biogaserzeugung	Körner für Lebensmittel- oder Futtermittelproduktion
Grünroggen GPS	Biomasse für Biogaserzeugung	Zwischenfrucht – organische Masse (Wurzeln) zur Bodenverbesserung
Zuckerhirse	Stärke bzw. Zucker für Ethanolherzeugung, Stroh für Biogaserzeugung	-
Winterweizen	Stroh für Einstreu bzw. Biogaserzeugung	Körner für Lebensmittel- oder Futtermittelproduktion
Luzerne	Biomasse für Biogaserzeugung	Zwischenfrucht – organische Masse (Wurzeln) zur Bodenverbesserung; Stickstofffixierung
Zuckerrübe	Rübenblätter für Biogaserzeugung	Rüben für Lebensmittelproduktion
Begrünung (Gemenge mit hohem Kleeanteil)	Biomasse für Biogaserzeugung	Zwischenfrucht – organische Masse (Wurzeln) zur Bodenverbesserung; Stickstofffixierung

2.2.1 Anbauversuche der Zuckerhirse 2011 und Sortenvergleich von zucker- bzw. stärkebildenden Zuckerhirsevarianten

Für die Anbauversuche im ersten Projektjahr (2011 standen zwei Zuckerhirsehybriden, welche die fermentierbaren Zucker produzieren und ein Zuckerhirsehybrid, welcher stärkehaltige Körner produziert, zur Verfügung). Neben dem 5. Mai als Anbauermin für die Hauptfrucht wurde der 25. Mai als zweiter Anbauermin für die Zwischen-/Zweitfrucht gewählt. Dieser Termin liegt somit rund ein Monat später als wenn Mais im Normalfall angebaut wird.



Abbildung 1: Gegenüberstellung von zucker- und stärkebetonter Zuckerhirsesorten

Der Feldversuch wurde in Margarethen am Moos durchgeführt. Im Rahmen des Versuches wurden drei verschiedene Zuckerhirsehybriden untersucht. Die Sorten „Sugargraze I“ (SG 1) und „Sugargraze II“ (SG 2) bilden einen zuckerhaltigen Saft, der vor allem im Stängel eingelagert wird. Die Sorte „Chopper“ (C) weist einen hohen Korn- und somit Stärkeanteil auf. Zusätzlich wird auch eine gewisse Menge Zucker im Stängel eingelagert. Im Rahmen der Versuche wurden die Biomasse- und Zuckererträge dieser drei Sorten bei einem Anbautermin Ende Mai ermittelt. Bei der Sorte SG 1 wurde zusätzlich eine Versuchsfläche angelegt, bei der der Anbau bereits Anfang Mai stattfand. Dieser Zeitpunkt liegt im Rahmen eines normalen Anbautermins bei der Kultivierung von Mais als Hauptfrucht.

Die verwendete Versuchsfläche war ein Lößboden mit stabilem Schwarzerdenhorizont, welche eine Bodenbonität von 65 aufweist. Im Rahmen der Fruchtfolge kam vor den 2011 durchgeführten Anbauversuchen ebenfalls Zuckerhirse, allerdings ausschließlich als Hauptfrucht, zum Einsatz. Im Frühjahr wurde Wicke angebaut. Die Bodenbearbeitung erfolgte durch eine Tiefenlockerung und anschließende Bearbeitung des Oberbodens mit einer Scheibenegge. Es erfolgte eine einmalige Düngegabe von 20 m³ Biogasgülle pro Hektar. Entsprechend einer Gülleuntersuchung der AGES entspricht dies 30 kg Stickstoff (davon 12 kg Ammoniumstickstoff), 30 kg Phosphor und 44 kg Kalium pro Hektar. Nach erfolgtem Anbau kam einmal ein Wuchsstoff als chemischer und einmal ein Hacker als mechanischer Pflanzenschutz zum Einsatz. Die Ertragsentwicklung wurde durch Versuchsernten im Zeitraum zwischen Juni und Oktober 2011 ermittelt. Die Zuckergehalte der einzelnen Proben wurden mittels GCMS und der Stärkeertrag mittels VDLUFA Methode bestimmt.

Zum Zeitpunkt des Anbaus war die für die Keimung notwendige Bodentemperatur von 10-12°C (Farrahi-Aschtiani, 1964) bereits erreicht. Die SG 1 Variante, welche Ende Mai angebaut wurde, holte sowohl bei der Wuchshöhe, als auch bei dem Vegetationsstadium relativ schnell zur Hauptfruchtkultur auf.

Wie in Tabelle 5 dargestellt, entsprachen bereits Mitte September Höhe und Entwicklungsstadium einander. Die Sorte SG 2 erreichte mit 2,80 m eine ähnliche Wuchshöhe wie die SG 1 Varianten. Während bei SG 1 die Fruchtentwicklung und die Samenreife innerhalb der jeweiligen Kultur zur selben Zeit erfolgten, geschah dies bei SG 2 über einen längeren Zeitraum verteilt. Während sich einige Pflanzen noch in der späten Milchreife befanden, waren die Samen anderer Pflanzen bereits im Stadium der Vollreife. Bis zum Erntetermin Ende September befanden sich jedoch alle Kulturen, mit Ausnahme der SG 1 Variante, die bereits Anfang Mai angebaut wurde, im Stadium der Vollreife.

Tabelle 5: Vegetationsstadien und Wuchshöhe aller untersuchten Kulturen im Vegetationsverlauf

	Sugargraze 1 Hauptfrucht			Sugargraze 1 Zweitfrucht			Sugargraze 2 Zweitfrucht			Chopper Zweitfrucht		
Anbau	05.05.2011			25.05.2011			25.05.2011			25.05.2011		
Ernte	Höhe [m]	VS BBCH		Höhe [m]	VS BBCH		Höhe [m]	VS BBCH		Höhe [m]	VS BBCH	
26.07.	1,70	37		1,00	35		1,55	36		1,20	36	
24.08.	2,98	62		2,40	39		2,60	60		1,80	65	
13.09.	3,00	77		2,90	73		2,80	77-89		1,84	85	
29.09.	3,00	83		2,90	89		2,80	89		1,84	89	
01.11.	n.e.	n.e.		n.e.	n.e.		2,75	93		1,84	93	

n.e. = nicht erntbar, VS = Vegetationsstadium

Sämtliche Erträge wurden anhand von Mischproben und in mehrfacher Wiederholung bestimmt. Zum Zeitpunkt der vierten Ernte (Ende September) lieferte die Variante SG 1, welche Anfang Mai angebaut wurde, die höchsten Trockenmasseerträge pro Hektar. Die niedrigsten Trockenmasseerträge zu diesem Zeitpunkt wurden bei der Sorte SG 2 ermittelt (siehe Abbildung 2).

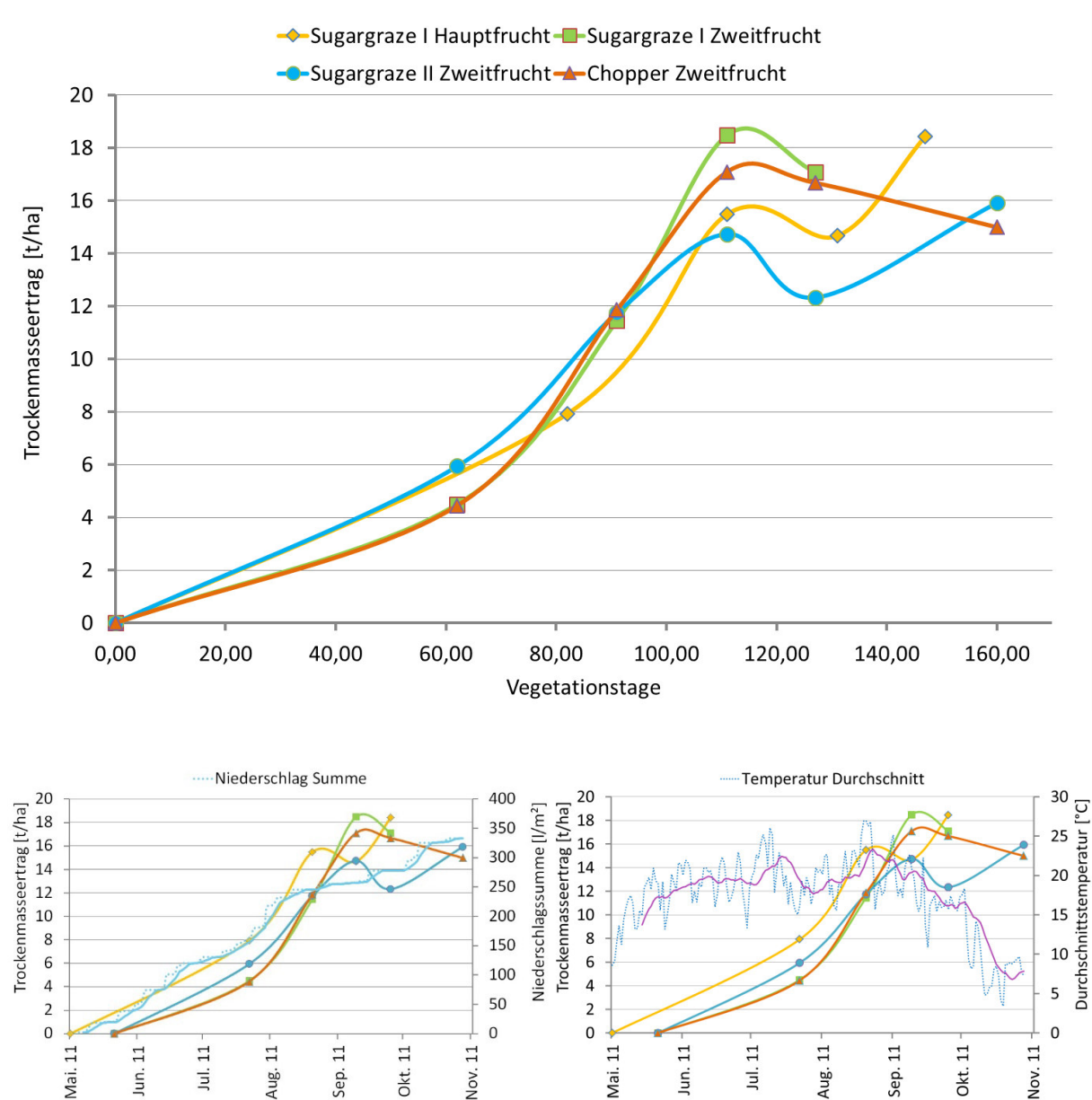


Abbildung 2: Trockenmasseerträge aller untersuchten Kulturen im Vegetationsverlauf und in Abhängigkeit von Niederschlagssumme, Durchschnittstemperatur und Temperaturextremen

Bei der letzten Ernte Anfang November konnten nur mehr die Sorten SG 2 und C geerntet werden, da die Variante SG 1 mit Anbauermin Anfang Mai bereits abgeerntet und der Bestand SG 1 mit Anbauermin Ende Mai zur Gänze umgeknickt war. Bei der Sorte SG 2 konnte gegenüber der vierten Ernte ein Trockenmassezuwachs beobachtet werden, während bei der Sorte C bereits ein Trockenmasseverlust zu verzeichnen war.

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

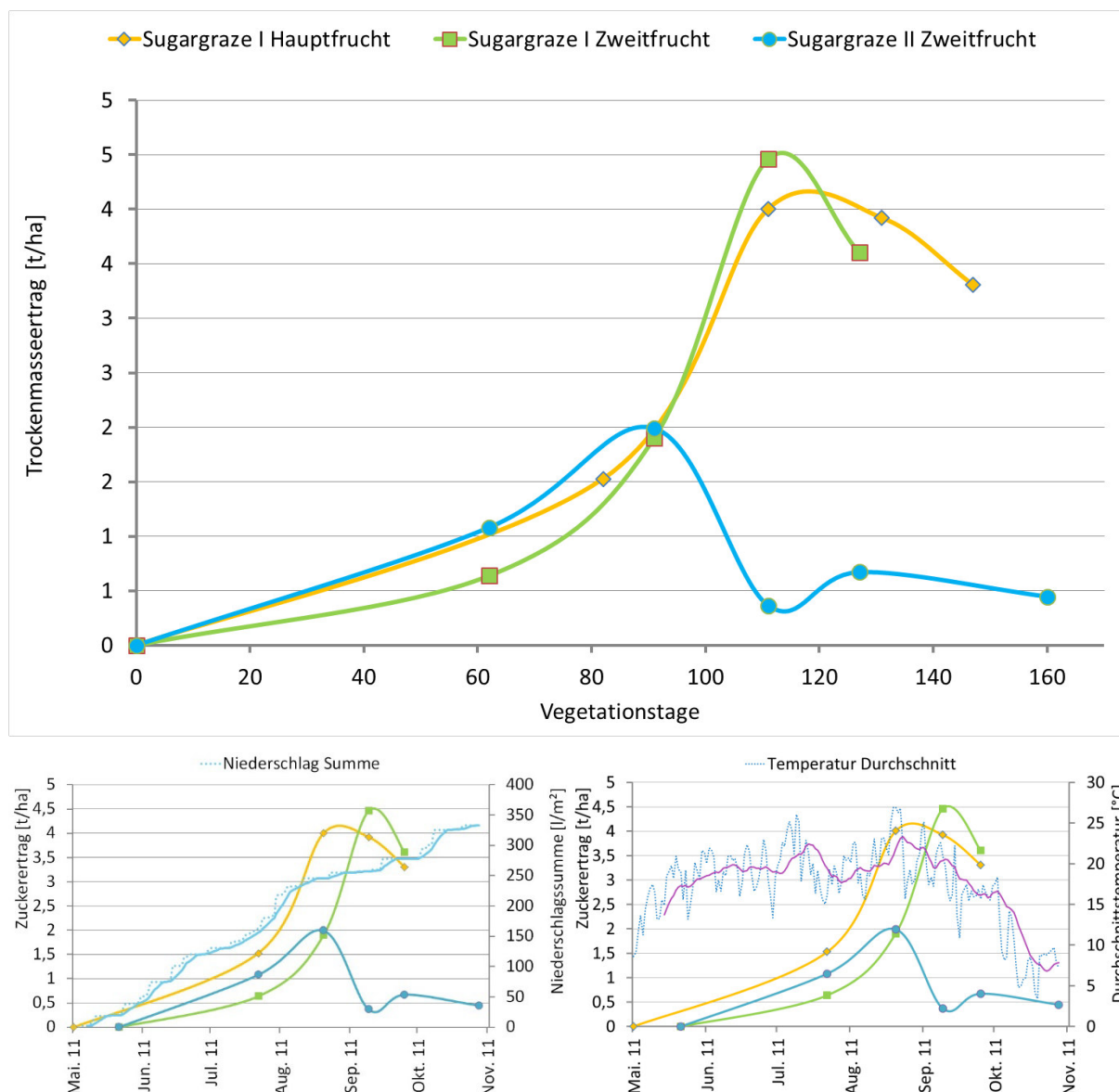


Abbildung 3: Abbildung der Zuckererträge pro Hektar der Sorte SG 1 als Hauptfrucht- und Zwischen-/Zweitfruchtkultur und der Sorte SG 2 im Vegetationsverlauf und in Abhängigkeit von Niederschlagssumme, Durchschnittstemperatur und Temperaturextremen

Tabelle 6: Daten zur Versuchsernte 2011 (4. Erntetermin)

	Einheit	Chopper Zweitfrucht Korn	Chopper Zweitfrucht Stroh	Sugargraze I Zweitfrucht
Ertrag	t TM / ha	10,23	7,22	17,08
Sim. Input	kg FM/h	374,79	777,72	1731,6
TS	% FM	68,26	23,2	24,7
Protein	% TS	6,5	3,4	3,7
Fett	% TS	3	1,9	1,5
Lignin	% TS	1,5	8,6	7,6
Zellulose	% TS	7,8	35,4	28,5
Hemizellulose	% TS	15,2	24	18,8

Asche	% TS	2,80	9,50	6
Stärke	% TS	63,7	2,2	-
Zucker	% TS	1,5	4,3	21,43
Organischer Rest	% TS	-	-	13,8

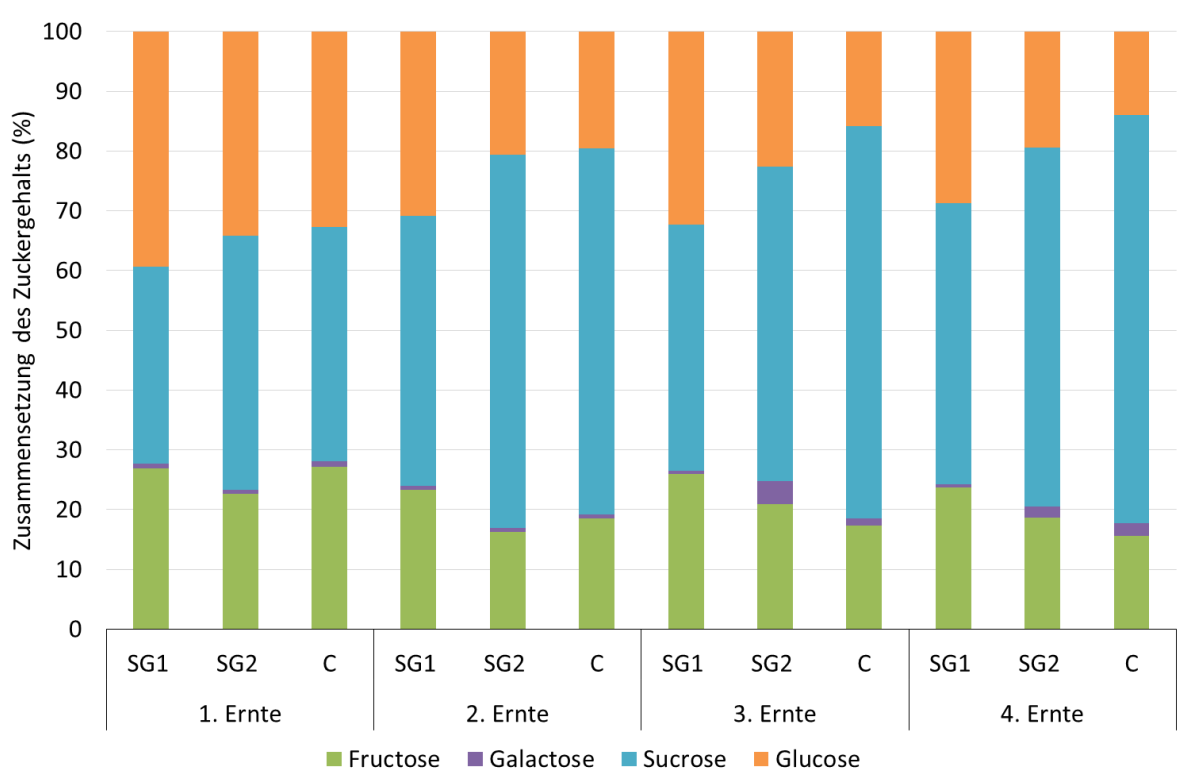


Abbildung 4: Zusammensetzung des Zuckergehalts der untersuchten Zuckerhirsehybriden im ersten Versuchsjahr

Die Abbildung 4 zeigt die Resultate der GCMS Zuckeranalyse. Zu sehen ist die Zusammensetzung des Zuckergehalts der jeweiligen Zuckerhirsevariante zu den ersten vier Erntezeitpunkten. Unterschieden werden die Zucker Fructose, Galactose, Sucrose und Glucose, da diese für die Ethanolfermentation verwertbar sind. Bei der Zuckerhirsevariante Chopper wurde nur der Zuckergehalt in den grünen Teilen der Pflanze untersucht (keine Körner). Bei der Zuckerhirsevariante Sugargraze I konnte beobachtet werden, dass der Fructoseanteil mit ca. 25% relativ stabil blieb. Der Galactoseanteil war während der gesamten Vegetationsperiode unter 1%. Der Anteil der Sucrose erhöhte sich von 30 auf 45% während der Anteil der Glucose von 40 auf 30% fiel.

Die Variante Sugargraze II zeichnet sich durch größere Fluktuationen bei der Zusammensetzung der Zucker aus. Der Hauptbestandteil war Sucrose, welcher zwischen der ersten und der zweiten Ernte von 40 auf 62% anstieg und bis zur letzten Ernte auf diesem Niveau verblieb. Der Anteil an Glucose und Fructose fiel im Lauf der Vegetationsperiode von 34% auf 17% bzw. von 22% auf 14%. Der höchste Galactosegehalt mit 3% wurde bei der dritten Ernte gemessen.

Da die Variante Chopper hauptsächlich Stärke bildet, sind die Zucker, welche in den grünen Teilen der Pflanze gebildet werden, nur von geringem Interesse. Nichtsdestotrotz stellt dieser Zuckeranteil ein interessantes Potential für die Biogasproduktion dar, sofern sie gut konserviert bzw. in organischen Säuren, welche ebenfalls im Biogasprozess verwertbar sind, umgewandelt werden. Der Fructose- als auch der Glucosegehalt fielen im Laufe der Vegetationsperiode von 30% auf 20%, im selben Zeitraum stieg der Anteil der Sucrose von 40% auf 60%. Der Galactosegehalt erreichte mit 2% sein Maximum bei der vierten Ernte.

Den höchsten Zuckerertrag pro Hektar lieferte die Sorte SG 1 mit Anbautermin Ende Mai bei einem Erntetermin Mitte September. Bei der Variante mit Anbau Anfang Mai (Hauptfrucht) war der Zuckerertrag um ca. eine halbe Tonne pro Hektar geringer. Der Zuckergehalt der Sorte SG 2 sank zwischen Ende August und Mitte September von 17% auf 3%.

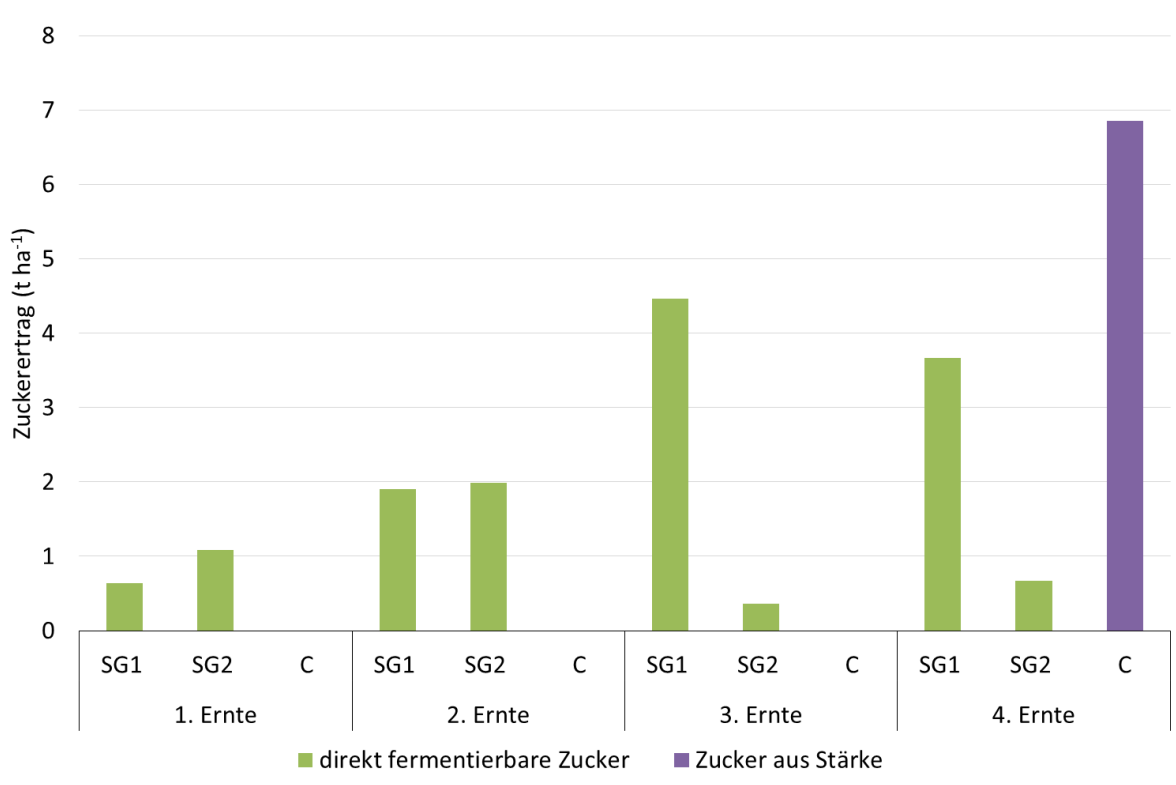


Abbildung 5: Zuckererträge pro Hektar der Zweitfruchtvarianten von SG1, SG2 und Zuckerhirse im Verlauf der Vegetationsperiode

Diese Entwicklung könnte auf eine schwierige Wasserversorgung, eine sinkende Durchschnittstemperatur oder aber auch auf eine Ertragsdepression aufgrund größerer pflanzenverfügbarer Stickstoffmengen im Boden zurückzuführen sein. Ein „peak“ an freien Zuckern zum Zeitpunkt der Blütenanlagen, wie er von Leible and Kahnt, 1991 festgestellt wurde, konnte bei keiner der untersuchten Zuckersorten beobachtet werden. Bei der Stärkesorte C wurde bei der vierten Ernte ein Kornertrag von 10,23 t TM/ha erzielt. Der Stärkeanteil im Korn betrug 63,7%. Setzt man einen Zucker-Umsetzungsgrad von 100% voraus, so ergibt sich dadurch ein Zuckerertrag von 7,2 t TM/ha.

Um den Vergleich zwischen den Klimadaten 2011 und den langjährig ermittelten Klimanormalwerten durchzuführen zu können, wurde auf die Daten der Wetterstation Schwechat zurückgegriffen.

Beim Anbau von Zuckerhirse als Zwischen-/Zweitfrucht spielt die Wasserversorgung eine entscheidende Rolle. Zuckerhirse zeigt mit einem Transpirationskoeffizienten von 250-350 l H₂O/kg TM (Lipinsky and Kresovich, 1980) eine effiziente Wassernutzung, eine gewisse Grundversorgung ist im Hinblick auf optimale Erträge jedoch trotzdem notwendig (Leible and Kahnt, 1991). Da eventuelle Wasserreserven aus dem Winter bereits durch die vorangehende Kultur aufgebraucht wurden, kommt dem Niederschlag eine besonders wichtige Rolle zu. Aufgrund einer Trockenperiode zwischen Mitte August und Anfang Oktober und der damit verbundenen schlechten Wasserversorgung, kam es in diesem Zeitraum zu einer Stagnation bzw. einem leichten Rückgang der Trockenmasseerträge. Während die Varianten SG 1 (Anbautermin Anfang Mai) und SG 2 bei einer verbesserten Wasserversorgung anschließend wieder einen Zuwachs an Biomasse aufwiesen, trat bei der Sorte C ein leichter Verlust auf. Auffallend ist auch, dass die Sorte SG 1 mit Anbautermin Anfang Mai auf den Wassermangel früher mit einer Stagnation reagiert, sich jedoch auch wieder früher erholt. Aufgrund der extremen Lagerbildung bei der Sorte SG 1 (Anbautermin Ende Mai) konnte die letzte geplante Ernte nicht durchgeführt werden, daher konnte auch nicht beurteilt werden ob sich diese Sorte von der Trockenperiode erholt hat.

Tabelle 7: Darstellung der Niederschlagssummen des langjährigen Durchschnitts und des Versuchsjahres 2011

Monat	Niederschlagssumme Klimanormalwerte	Niederschlagssumme 2011
	[l/m ²]	[l/m ²]
Mai	56,5	39
Jun	59,8	81,4
Jul	58	60,9
Aug	51,3	73,6
Sep	52	23,4
Okt	33,5	55,1
Gesamt	311,1	333,4

Die Niederschlagssituation 2011 Tabelle 4 kann als extreme Abweichung vom langjährigen Durchschnitt betrachtet werden. Während im Mai und September die Niederschläge unterdurchschnittlich ausfielen, regnete es in den Monaten Juni, August und Oktober um jeweils ca. 22 mm mehr als im Durchschnitt. Betrachtet man die Niederschläge über die gesamte Vegetationsperiode, so ergibt sich der Unterschied gegenüber dem langjährigen Durchschnitt als relativ gering. Die Niederschlagsverteilung gestaltete sich 2011 jedoch als sehr viel unausgeglichener.

Zuckerhirse hat ein höheres Temperaturbedürfnis als Mais (Schuster, 1964), entgegen den Untersuchungsergebnissen von (Leible and Kahnt, 1991) konnte jedoch keine Abhängigkeit der Trockenmasseerträge von den Temperaturextremen oder der Durchschnittstemperatur festgestellt werden. Die für den Biomassezuwachs notwendige Durchschnittstemperatur von 12-15°C (Kresovich,

1982) war, nahezu über die gesamte Vegetationsperiode, vorhanden. Der sinkende Zuckergehalt bei SG 1 (beide Anbauvarianten) könnte jedoch, neben der suboptimalen Wasserversorgung, auch seine Ursache in der sinkenden Durchschnittstemperatur haben.

Laut (Schuster, 1964) hat die Temperatur während der Vegetationsperiode einen größeren Einfluss auf Trockenmasse- und Zuckererträge als die Summe der Sonnenstunden. Die Sonnenstunden im Versuchszeitraum summierten sich auf 1.510 h.

Ab Ende August konnte bei den sämtlichen SG 1 und SG 2 Varianten eine gesteigerte Lagerbildung beobachtet werden. Während sich die Sorte SG 2 bis Ende Oktober wieder aufgerichtet hat, knickten die Stängel der Sorte SG 1 kurz über den Boden ab. Dadurch wurde das Wiederaufrichten verhindert und es kam zu einer Verrottung der Pflanze. Bei der letzten durchgeführten Ernte lag der gesamte Bestand der SG 1 (Anbau Ende Mai) am Boden und es konnte bereits ein modriger, leicht stechender Alkoholgeruch wahrgenommen werden. Bei C konnte ab Ende September ein vermehrter Körnerfraß durch Vögel festgestellt werden (siehe Abbildung 6: Lagerbildung und Körnerfraß bei der 5. Versuchsernte der Zuckerhirsevarianten im Versuchsjahr 2011).



Abbildung 6: Lagerbildung und Körnerfraß bei der 5. Versuchsernte der Zuckerhirsevarianten im Versuchsjahr 2011

2.2.2 Verfahrenstechnische Aspekte hinsichtlich der Eignung von Zuckerhirse als Bioethanol- und Biogasrohstoff

Ausgangspunkt für die Konzeptionierung verschiedener Verfahrenslinien für die Nutzung der Zuckerhirse in der Bioethanol- und Biogasproduktion (siehe Abbildung 7) sind zwei unterschiedliche Sortentypen. Die erste Sorte („Chopper“, C) bildet, neben geringen Zuckermengen im Stängel, vorwiegend Stärke in den Körnern. Der Körneranteil wird mittels Mähdrescher geerntet, bei Bedarf nachgetrocknet und kann anschließend relativ einfach gelagert werden. Das verbliebene Stroh wird zur weiteren Verarbeitung bzw. Nutzung vom Feld geborgen. Der zweite Sortentyp („Sugargraze 1 und 2, SG 1 und SG 2) bildet direkt fermentierbare Einfachzucker. Anbau, Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenschutz gestalten sich bei beiden Typen gleich. Die unterschiedliche Haltbarkeit von Zucker und Stärke haben jedoch weitreichende Folgen auf die Lagerung und Konservierung.

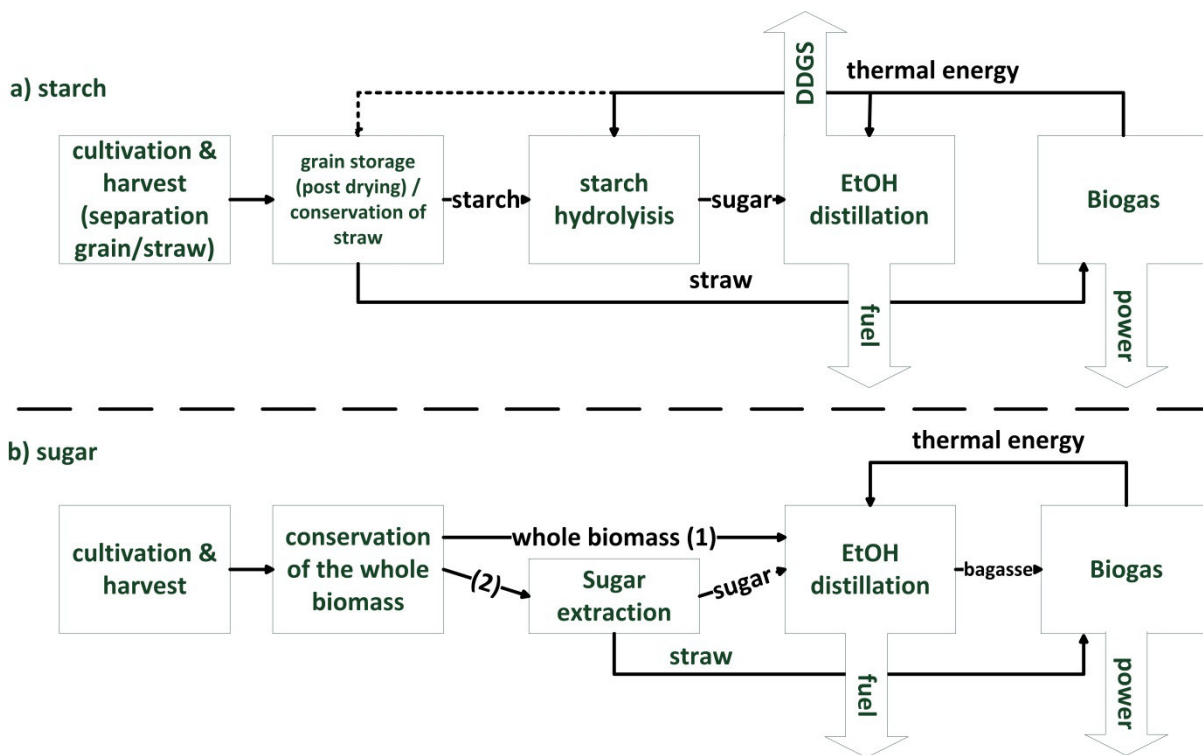


Abbildung 7: Verfahrenslinien für die Produktion von Ethanol und Biogas aus Zuckerhirse

Für die Wahl des optimalen Erntezeitpunkts sind einerseits Trockenmasse- und Zuckererträge und andererseits TS-Gehalt und die Abreifung der Körner (C) zu berücksichtigen. Bei den Varianten, die einfach fermentierbare Zucker bilden, gestaltet sich die Lagerung aufwendiger. Da der Zucker im Pflanzensaft enthalten ist, muss bei der Ernte bereits auf schonende Verfahren geachtet werden, ansonsten treten schon bei der Ernte hohe Zuckersaftverluste auf.

Anschließend muss die zuckerhaltige Biomasse zügig weiterverarbeitet werden, da es sehr rasch zu einer Metabolisierung des Zuckers kommt. Eine sofortige Fermentation der gesamten Ernte hat bei dem sehr engen Zeitfenster und dezentraler Produktion den gravierenden Nachteil, dass eine sehr große Ethanolproduktionsanlage benötigt wird, die nur schlecht ausgelastet ist und daher aus heutiger Sicht keine wirtschaftliche Grundlage hat. Daher ist eine Konservierung nötig, die mit verschiedenen Verfahren durchgeführt werden kann:

- (1) Silierung
- (2) Abpressen bzw. Extraktion des Zuckersafts mit anschließendem Eindicken (Eindampfen)
- (3) die chemische Stabilisierung der gesamten Biomasse, z.B. durch Behandlung mit Ameisensäure (Schmidt et al., 1997), (Rohowski et al., 2011).

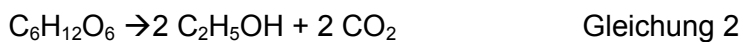
Variante (1) ist unattraktiv, da es zu Milchsäurebildung und Zuckerverlusten kommt.

Die Anlagentechnik für die Variante (2) ist mit hohem Energieaufwand und Investitionskosten verbunden wobei für die Abpressung des Zuckersaftes momentan keine Presse verfügbar ist welche die Abpressung im Kampagnebetrieb (max. 1 Monat) mit einem hohen Wirkungsgrad (höchstmögliche Zuckersaftgewinnung >90%) durchzuführen kann. Desweiteren wird für die Eindickung des

Zuckersaftes, welche ebenfalls im Kampagnebetrieb durchgeführt werden muss, eine Verdampfungsapparatur benötigt, welche ohne Baulichkeiten Minimum 1,2 Mio. Euro (Auslegung für 200 Hektar Anbaugelände) an Investitionskosten auslöst aber auch nur für rund einen Monat im Jahr im Einsatz wäre.

Die Variante (3) erscheint am attraktivsten und verspricht eine Stabilisierung des in der Biomasse enthaltenen Zuckers bei einfacher Anwendung.

Bei erfolgreicher Konservierung kann die zuckerhaltige Biomasse gleich wie die stärkehaltige Biomasse kontinuierlich über den Jahresverlauf abgearbeitet werden. Nach der Abtrennung vom Stroh erfolgt bei der Stärkesorte die Hydrolyse der Stärke zu Einfachzuckern (Gleichung 1) und die anschließende Ethanolfermentation (Gleichung 2) analog zur Ethanolproduktion aus Weizen oder Mais.



Bei vollem Formelumsatz werden also aus einem kg Stärke 1,11 kg Zucker und aus einem kg Zucker 0,51 kg Ethanol und 0,49 kg CO₂ gewonnen. Untersuchungen haben dabei gezeigt, dass Stärke aus Zuckerhirse sehr gut für die Ethanolproduktion geeignet ist (Rooney et al., 2007). Wang et al. (2008) erreichten einen kombinierten Umsatz¹ von über 90%. Barcelos et al. (2011) konnten mehr als 99% der Stärke zu Zucker hydrolysieren und mehr als 97% der Zucker zu Ethanol fermentieren.

Bei zuckerhaltiger Zuckerhirse Biomasse ist keine Stärkehydrolyse (Gleichung 1) nötig. Hier besteht die Möglichkeit durch Pressen oder Auslaugen einen Zuckersaft zu gewinnen und diesen zu fermentieren oder die gesamte Pflanze zu Ethanol umzusetzen. Beim Pressen und Auslaugen bleiben Zucker in der Bagasse zurück; durch diesen Zuckerverlust sinkt die Ausbeute (Wu et al., 2010) an Ethanol. Der beim Pressen gewonnene Zuckersaft ist jedoch sehr gut für die Ethanolfermentation (Gleichung 2) geeignet; so wurden bei Versuchen mit Zuckersaft Fermentations-Umsätze über 90% erzielt (Wu et al., 2010). Die durch das Pressen bedingten Zuckerverluste können vermieden werden, wenn die gesamte zuckerhaltige Biomasse fermentiert wird. Diese Fermentation kann in der Festphase, also mittels „(advanced) solid state fermentation“ ((A)SSF) durchgeführt werden, wobei die erzielten Produktivitäten und Umsätze mit der konventionellen Fermentation von Stärkehydrolysat und Zuckersaft vergleichbar sind (91% bei SSF (Yu et al., 2008) und 92% in 36h ASSF (Li et al., 2011)).

2.2.2.1 Ethanolertrag

In Abbildung 8 sind die Ethanolerträge für die unterschiedlichen Zuckerhirsesorten (SG 1, SG 2 und der Stärkesorte C) und den Referenzrohstoffen Weizen und Mais dargestellt.

¹ Kombiniertes Umsatz = (Umsatz Hydrolyse) * (Umsatz Fermentation)

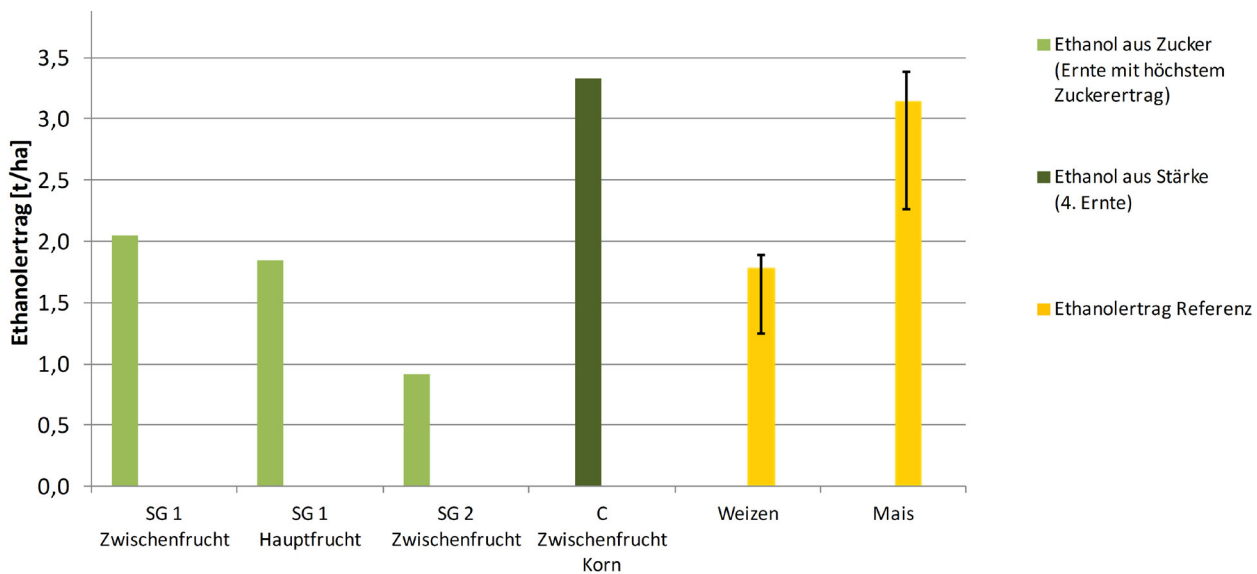


Abbildung 8: Ethanolreferenz von Zuckerhirse und den Referenzrohstoffen Weizen und Mais.

Bei der Berechnung des Potentials von Ethanol aus Zucker, wurde jener Erntetermin herangezogen, bei dem am meisten Ethanol gewonnen werden kann. Stärke wurde nur beim letzten (4.) Erntetermin analysiert, weshalb diese Werte für die Berechnung herangezogen wurden. Die Ethanolreferenzen der Referenzrohstoffe basieren auf Hektarerträgen, die mit Winterweizen und Körnermais in Niederösterreich im Jahr 2011 erreicht wurden (Statistik Austria, 2011). Der Schwankungsbereich bei den Referenzstoffen gibt einerseits zeitliche Variationen der Hektarerträge (Jahre 2000-2011, (AMA, 2011)) und andererseits Variationen des Wasser- und Stärkegehalts, wie sie in der Literatur (Roehr, 2001) dokumentiert sind, wieder.

Es ist klar ersichtlich, dass die Zuckerhirse Sorten SG 1 und C mit den Referenzrohstoffen konkurrieren können. Des Weiteren ist klar zu erkennen, dass sich im Rahmen der Untersuchungen der Anbau als Zwischen-/Zweitfrucht nicht negativ auf das Ethanolpotential auswirkt. Besonders mit der Stärkesorte C, wurden sehr gute Erträge erzielt; die Ethanolreferenzen, die mit C als Zwischen-/Zweitfrucht erzielt wurden, sind vergleichbar mit den Erträgen von Mais und übersteigen jene von Weizen deutlich. Die Erträge von SG 1 als Zwischen-/Zweitfrucht entsprechen in etwa denen von Weizen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zwei der drei untersuchten Sorten sehr gute Ethanolreferenzen erzielten, wobei hinsichtlich Ethanolproduktion vor allem die Stärkesorte C vielversprechend ist. Betrachtet man den gesamten energetischen Output, so müssen allerdings in weiterer Folge auch die verbleibenden Reststoffmengen und daraus das Biogaspotential bestimmt werden. Eine Sorte, aus der etwas weniger Ethanol gewonnen werden kann, kann dies ev. mit einer höheren Biogasausbeute wettmachen. Im Konkreten scheint dies auch bei SG 1 der Fall zu sein. Vergleicht man die Reststoffmengen von SG 1 und C beim jeweiligen optimalen Erntezeitpunkt, so ist dies ersichtlich. Bei SG 1 stehen pro Hektar ca. 3,6 t TM mehr für die Biogasproduktion zur Verfügung als bei C.

2.2.3 Anbauversuche der Zuckerhirse 2012 und 2013

In der Vegetationsperiode des Versuchsjahres 2012 wurden drei Zuckerhirsevarianten an drei Standorten mit unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit untersucht. Die Sorten „Sugargraze I“ (SG 1) und „Nectar“ (NE) sind Züchtungen, die freie Zucker, vor allem im Stängel, einlagern. Die dritte Variante „Nutrigrain“ (NU) ist eine Züchtung, die vor allem stärkehaltige Körner bildet. Die Sorte SG 1 wurde bereits im Versuchsjahr 2011 untersucht. Im Verlauf der Vegetationsperiode konnte beobachtet werden,

dass die Sorte NU ein, für eine Stärkevariante, untypisch starkes Höhenwachstum aufwies. Des Weiteren blieb die Entwicklung der Körner weit hinter den Erwartungen zurück. Auf Nachfrage beim Züchter konnte als mögliche Ursache eine falsche Etikettierung bzw. Falschlieferrung des Saatguts in Frage kommen.

Daher konnten in diesem Versuchsjahr keine Untersuchungen zur Performance einer Stärkevariante durchgeführt werden.

2.2.3.1 Charakterisierung der Versuchsfläche

Die Versuche wurden an drei Standorten mit unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit durchgeführt. Die Charakteristika der Versuchsstandorte sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Standortbedingungen für den Anbauversuch im zweiten Projektjahr (2012)

Parameter Standort	Wasserversorgung	Humus	Kalkgehalt	Bodenart, Grobanteil
Standort 1	mäßig trocken, mäßige Speicherkapazität, hohe Durchlässigkeit	mittel bis stark humos, Mull	stark kalkhaltig	sandiger Lehm, schluffiger Lehm oder reiner Lehm
Standort 2	mäßig trocken, mäßige Speicherkapazität, hohe Durchlässigkeit	mittelhumos (z.T. stark humos), Mull	stark kalkhaltig	feinsandiger Lehm z.T. geringer Grobanteil (Kies)
Standort 3	wechselfeucht mit Überwiegen der feuchten Phase, mäßige Speicherkraft, mäßige bis hohe Durchlässigkeit	stark humos, Anmoormull (z. T. Mull)	stark kalkhaltig	sandiger Lehm, lehmiger Schluff oder schluffiger Lehm

Hirse stellt als Kulturpflanze keine hohen Ansprüche an ihre Vorfrucht und lässt sich diesbezüglich gut nach allen Getreidearten anbauen (STEINBRENNER et al., 1981). Als Vorfrucht wurde Wintergrünroggen geerntet nach welchem der Hirseanbau in Hinblick auf Fruchtfolge und Vorfruchtwirkungen unproblematisch durchzuführen ist. Der Wintergrünroggen wurde mittels Ladewagenerntetechnik der Firma Pöttinger vom Feld abtransportiert. Auf Grund der Breitbereifung des Traktors sowie des Lade- und Transportanhängers konnte eine geringe Bodenverdichtung bei der Ernte der Vorfrucht sichergestellt werden. Die Vorfruchternte auf den Versuchsflächen fand am 6. Juni, also 10 Tage vor Anlage der Hirseversuchsflächen statt. Die Vorfrucht Grünroggen kann auch wie Hirse als Substrat zur

anaeroben Vergärung in Biogasanlagen verwendet werden. Der oben angegebene Erntetermin der Vorfrucht wurde unüblicherweise spät gewählt, um die Kultivierung von Hirse nach frühräumenden Kulturen wie Sommergerste, Raps oder Weizen bestmöglich zu simulieren.

2.2.3.2 Düngung, Aussaat, Pflanzenschutz

Mit dem im Vorfeld zur Bestimmung der optimierten Sämaschinenkonfiguration ermitteltem Tausendkorngewicht, konnte die angestrebte Körnerzahl pro Hektar bezüglich des Saatgutes, in Kilogramm Saatgut pro Hektar umgerechnet werden und umgekehrt. In Tabelle 6 sind die Tausendkorngewichte der drei Sorten angeführt.

Tabelle 9: Tausendkorngewichte der Hirsesorten

Sorte	Tausendkorngewicht [g]
Nutrigrain	38,4
Sugargraze	30,7
Nectar	14,4

Die hohen Tausendkorngewichte der Züchtungen Nutrigrain und Sugargraze deuten auf große Saatkörner hin. Die Züchtung Nectar erreicht mit ihrem kleinen Tausendkorngewicht nur knapp die Hälfte der beiden anderen Züchtungen und stellt damit Herausforderung an die Sätechnik. Die an den Zuckerrübenanbau angepassten Vereinzelungsorgane der Einzelkornsätechnik könnten in ihrer Wirkung auf Grund der zu kleinen Körner bei Nectar versagen, was eine ungenaue Anbaumenge sowie Anbauverteilung bewirkt. Das Tausendkorngewicht ist auch insofern für die Einzelkornsaat von Bedeutung, dass hierbei anstatt von Kilogramm Saatgut pro Hektar, eine Körnerzahl pro Hektar angestrebt wird.

2.2.3.2.1 Aussaat

Die Aussaat wurde mittels einer Einzelkornsämaschine des Herstellers Kleine bewerkstelligt. Es handelt sich hierbei genauer um eine pneumatisch arbeitende, zwölfreihige Mulchsämaschine mit der Typenbezeichnung „Multicorn“ deren Säaggregate auf Basis des Saugluftprinzips mit einer Lochscheibe die Körner aus den Saatgutbehältern vereinzelt und diese mechanisch mittels Kammerrad im eingestellten Abstand ablegt. Durch eine spezielle Synchronisationseinrichtung für Fahrgeschwindigkeit und Geschwindigkeit der Ablageeinrichtung konnte das Rollen der Saatkörner in der Reihe, was direkten Einfluss auf die Verteilgenauigkeit in der Reihe hat, weitgehend verhindert werden. Die Reihenweite betrug hierbei 45 cm und die Saatstärke $\sim 30 \text{ K/m}^2$. Es wurde deshalb das Tausendkorngewicht durch Zählung und Wiegung von 3 mal 100 Körnern und anschließender Berechnung für 1000 Körner bestimmt. Der Saatzeitpunkt wurde mit 16. Juni festgelegt. Die gewählte mittlere Saattiefe betrug 4 cm. Die Fahrtgeschwindigkeit betrug einheitlich $\sim 10 \text{ km/h}$. Die Saatbettbereitung erfolgte mittels Scheibenegge (GRABER, et al., 2001).

2.2.3.2.2 Pflanzenschutz

Zum Zweck des Pflanzenschutzes wurde eine einmalige Applikation des Herbizides Arrath (Wirkstoffe Tritosulfuron und Dicamba, BASF) in der Menge von 200 g/ha gemeinsam mit dem Netzmittel Dash (Emulsionskonzentrat aus Fettsäuremethylester, Fettalkoholalkoxylat und Ölsäure, BASF) in der Menge von 1 l/ha angewandt. Der Pflanzenschutz wurde drei Wochen nach Aussaat, beziehungsweise bei einer Wuchshöhe von rund 10 cm durchgeführt.

2.2.3.3 Düngung

Die Düngung wurde ausschließlich mittels 25 m³ Gülle durchgeführt, was einer Nährstoffzufuhr von 37,5 kg Gesamtstickstoff, 15 kg Ammoniumstickstoff, 37,5 kg Phosphat und 55 kg Kaliumoxid, bezogen auf einen Hektar entspricht.

2.2.3.4 Systematische Probenahme

Die Probenahme im Pflanzenbestand erfolgt im Laufe der Vegetationsperiode an sieben Tagen, jeweils zur gleichen Tageszeit. Es wurden Beprobungsflächen einheitlicher Größe geerntet, um Ertragszeitreihen bezüglich des flächenspezifischen Ertrages erstellen zu können. Die Proben wurden an jedem Standort innerhalb gleicher Sortenanbaustreifen zufällig gezogen. Optisch sehr auffallende kleinräumige Stellen, an denen das Pflanzenwachstum vermutlich wegen sehr schlechter Bodeneigenschaften wie beispielsweise sehr schotterreicher Stellen beeinträchtigt war, wurden nicht in die Probenahmen einbezogen. Weiters wurden diejenigen Saatreihen, welche sich in Randzonen befinden, ebenfalls von den Probenahmen ausgeschlossen, um jegliche Randeffekte, die nicht repräsentativ für die Gesamtfläche sind, auszuschließen. Das Gewicht der Probenfrischmasse wurde unmittelbar nach der Probennahme bestimmt. Für weitere Laboranalytiken wie Trockensubstanzbestimmung, Messung des spezifischen Methanertrages und Zuckeranalytik wurden die Proben im Laufe der Vegetationsperiode gesammelt und der Nutzungsabsicht entsprechend gelagert, um diese am Ende der Vegetationsperiode kumuliert analysieren zu können. Die Versuchsflächen wurden nach der Anleitung des statistisch relevanten Versuchsdesigns beprobt. Die Ausmessung der für die Probe herangezogenen Fläche wurde mittels Längenmessung in der Reihe mit späterer Berechnung der äquivalenten Flächen anhand der Reihenweite bewerkstelligt. An allen Terminen der Zeiternten wurden für jede Sorte und jeden Standort 5 Proben auf zufällig gewählten Stellen innerhalb der Schläge geerntet. Jede der 5 Proben umfasste genau den definierten Probenumfang von jeweils 3 Metern in der Reihe. Die Pflanzen wurden bei der Beprobung in einer Höhe von durchschnittlich 10 cm mit einer handelsüblichen Gartenschere der Marke Gardena abgeschnitten, zu Bündel geschnürt und zum Verwiegen mittels offenem Transporter zur Biomasseanlage EVM GmbH transportiert.

Das Verwiegen der Proben wurde mittels einer digitalen Waage, welche einen Messbereich von 0-30 kg aufweist und mit 10 g abgestuft ist, durchgeführt. Die Ganzpflanzenbündel wurden ohne weitere Zerkleinerungsschritte nacheinander gewogen und dokumentiert. Nach dem separaten Verwiegen wurden die geernteten Hirseproben für Zuckeranalytik, Methananalytik und Trockensubstanzbestimmung in Vakuumsäcken verpackt. Für die drei Schläge mit jeweils drei Sorten für jede Sorte pro Schlag wurden drei separate Pflanzenproben verpackt und eingefroren. Die Proben für die Zuckeranalytik wurden mittels Trockeneis bei -62 °C sofort am Feld eingefroren, um einen raschen

Abkühlprozess zu gewährleisten, der eine schnelle Unterbindung der Ab- und Umbauprozesse von enthaltenen Zuckern bewirkte. Die vakuumverpackten Proben für die Methananalytik und die Trockensubstanzbestimmung wurden unmittelbar nach der Probenverarbeitung bei -20 °C eingefroren. Demnach wurden an jedem Probenerntetermin 27 Proben produziert, wobei neun davon unter Verwendung von Trockeneis bei -72 °C schockgefroren, und 18 lediglich in einem Tiefkühlgerät bei -20°C konserviert wurden. Die neun mit Trockeneis behandelten Proben wurden anschließend bei -20 °C über den weiteren Zeitraum bis zur Analytik gelagert.

2.2.3.5 Methoden für die Ganzpflanzen-, Korn- sowie Strohernte für Zuckerhirse

Sowohl in der Physiologie als auch in der Kultivierung weist Zuckerhirse sehr große Ähnlichkeiten mit Mais auf. Betreffend der benötigten Maschinen für Bodenbearbeitung, Anbau, Bestandspflege, Ernte und Transport kann somit die bereits existierende Ausstattung, die für die Kultivierung von Mais benötigt wird, verwendet werden. Da die Vegetationsperiode von Zuckerhirse weitgehend mit der von Mais übereinstimmt, kann auch die Bereifung von Zugmaschinen bzw. Häcksler und Mähdrescher entsprechend der Wetter- und Bodenverhältnisse angepasst werden.

Für die Anbauversuche wurde als Bodenbearbeitung eine Tiefenlockerung (Grubber) und anschließende Bearbeitung des Oberbodens mit einer Scheibenegge durchgeführt. Eine einmalige Düngegabe wurde durch das Ausbringen von Biogasgülle mittels Schleppschlauchverfahren durchgeführt. Der Anbau erfolgte als Direktsaat mit einer Einzelkornsämaschine. Da die Korngröße bei Zuckerhirse deutlich kleiner ist als bei Mais, musste an der Sämaschine eine geringe Adaptierung bei der Kornablage vorgenommen werden. Die Umrüstzeit dafür betrug jedoch nur einige Stunden. Nach dem Anbau kam jeweils einmal ein Wachstumsstoff als chemischer und einmal ein Hacker als mechanischer Pflanzenschutz (Hacke) zum Einsatz.

Je nach Verfahrensvariante ist entweder das Korn oder die Ganzpflanze zu ernten, wobei bei der Stärkevariante auch das Stroh geerntet werden muss, da es direkt als Substrat für die Biogasanlage genutzt werden kann.

Für die Ganzpflanzenernte kann ein Exaktfeldhäcksler(reihenlos da Anbau auf 45cm) ohne weitere Adaptierungen verwendet werden. Bei der Körnerernte muss unter Umständen die Dreschtrommel des Mähdreschers adaptiert werden um einen eventuell auftretenden Körnerbruch zu reduzieren. Die Bergung der Feldreste nach der Körnerernte kann durch Ladewägen erfolgen, welche das Material zur Einlagerung an die Biogasanlage transportieren.

2.2.3.6 Erträge der Anbauversuche 2012

Die Trockenmasseerträge erreichten mit ca. 11 t/ha nur 60% der maximalen Erträge aus dem Versuchsjahr 2011. Dies kann vor allem auf die schleppende Jugendentwicklung der Bestände zurückgeführt werden.

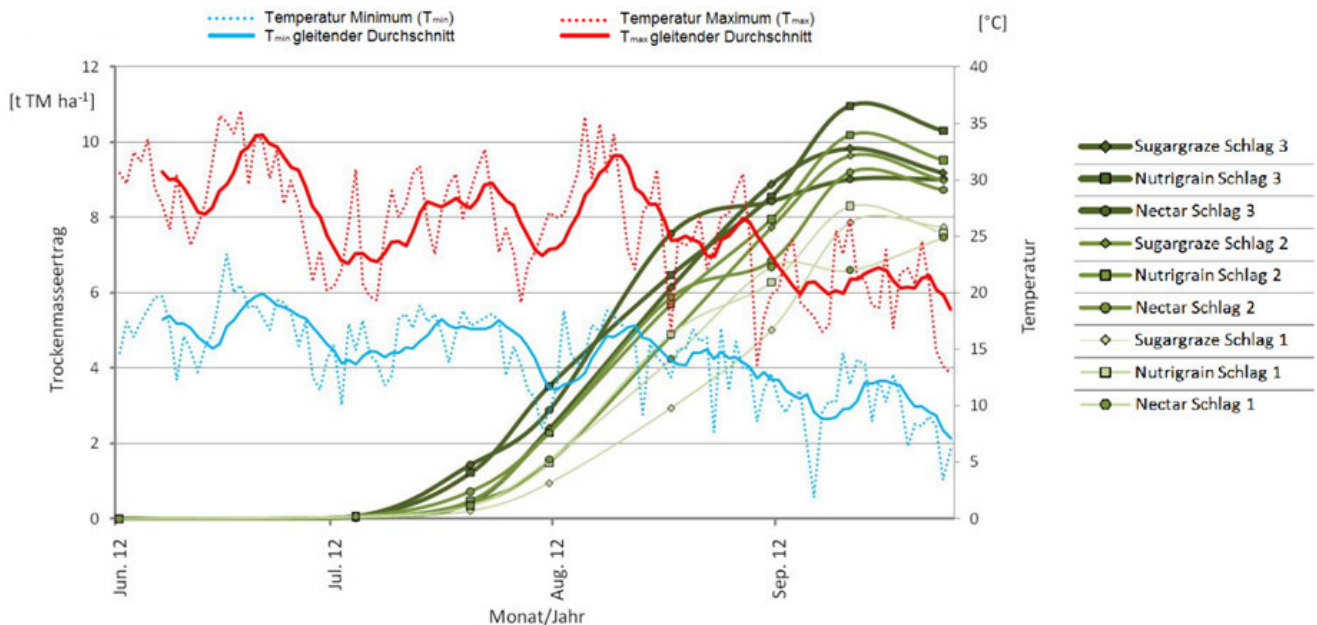


Abbildung 9: Trockenmasseerträge der untersuchten Zuckerhirsevarianten an den 3 ausgewählten Standorten sowie Temperaturmaxima und -minima während der Vegetationsperiode

In Abbildung 9 sind die erzielten Trockenmasseerträge pro Hektar sowie die täglichen Temperaturmaxima sowie -minima dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sämtliche Sorten an allen Standorten relativ lange benötigen um Biomasse zu bilden. Mitte Juli wurde bei sämtlichen Varianten ein Hektarertrag von unter 2 t TM ermittelt. Fast die gesamte Biomasse wurde zwischen August und Mitte September gebildet, bei der Ernte Anfang Oktober sinkt der Hektarertrag bei nahezu allen Sorten. Lediglich die Sorte NE legte auf dem Standort 1 und 3 noch an Biomasse zu. Dies könnte auf die niedrigen Tagesminima und einen daraufhin einsetzenden Abbau der Biomasse zurückzuführen sein. Ansonsten kann kein eindeutiger Einfluss der Temperatur während der Vegetationsperiode auf die erzielten Erträge abgeleitet werden.

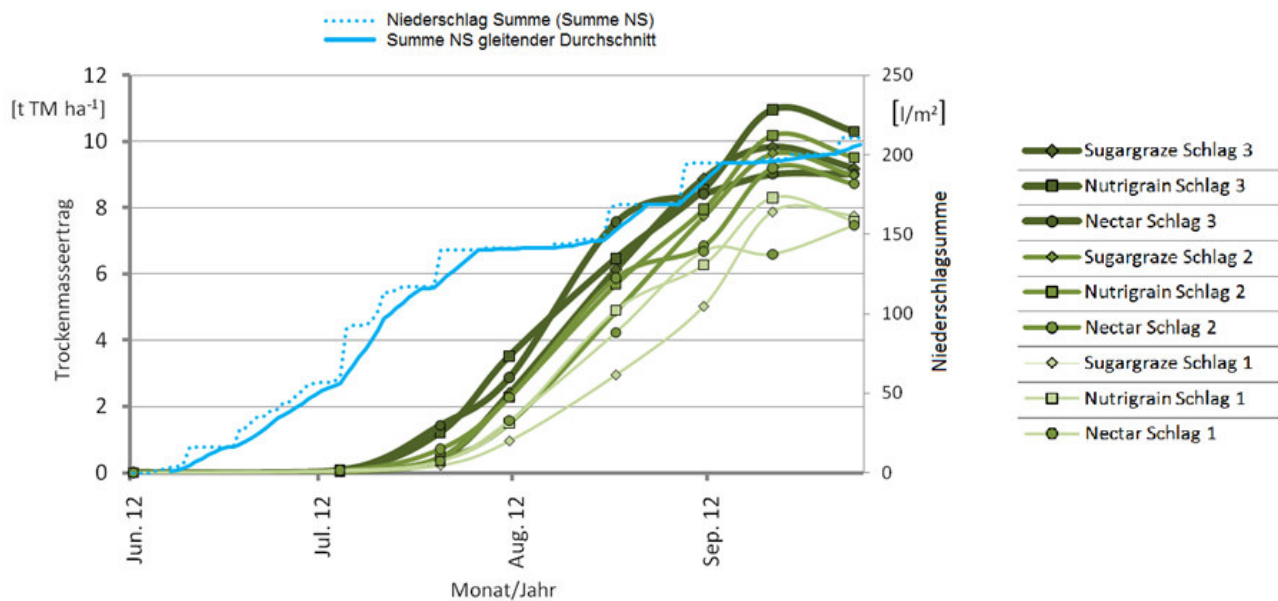


Abbildung 10: Trockenmasseerträge der untersuchten Zuckerhirsevarianten an den 3 ausgewählten Standorten sowie kumulierter Niederschlag während der Vegetationsperiode

In Abbildung 10 sind die Trockenmasseerträge der untersuchten Varianten, zusammen mit den Niederschlägen, an den Versuchsstandorten in der Vegetationsperiode dargestellt.

Im Gegensatz zum Versuchsjahr 2011 konnte kein Einfluss der Niederschlagsmenge auf die Erträge festgestellt werden, jedoch kam es in der Vegetationsperiode 2012 auch zu keiner längeren Trockenperiode.

2.2.3.7 Erträge der Anbauversuche 2013

Aufgrund der sehr guten Ergebnisse der Stärkevariante im ersten Versuchsjahr wurde entschieden, dass im dritten Projektjahr neun verschiedene Zuckerhirsehybriden untersucht werden sollen, die stärkehaltige Körner bilden. Außerdem wurden drei Anbautermine (Anfang und Ende Juni bzw. Anfang Juli) geplant. Aufgrund der Wettersituation (extreme Niederschläge im Frühjahr, Hochwasser) musste der erste Anbautermin jedoch fallen gelassen werden.

Die Methode der Flächenvorbereitung, Düngung, Saat, Pflegemaßnahmen und Erntelogistik wurde aufgrund der guten Erfahrungen aus dem Jahr 2012 übernommen.

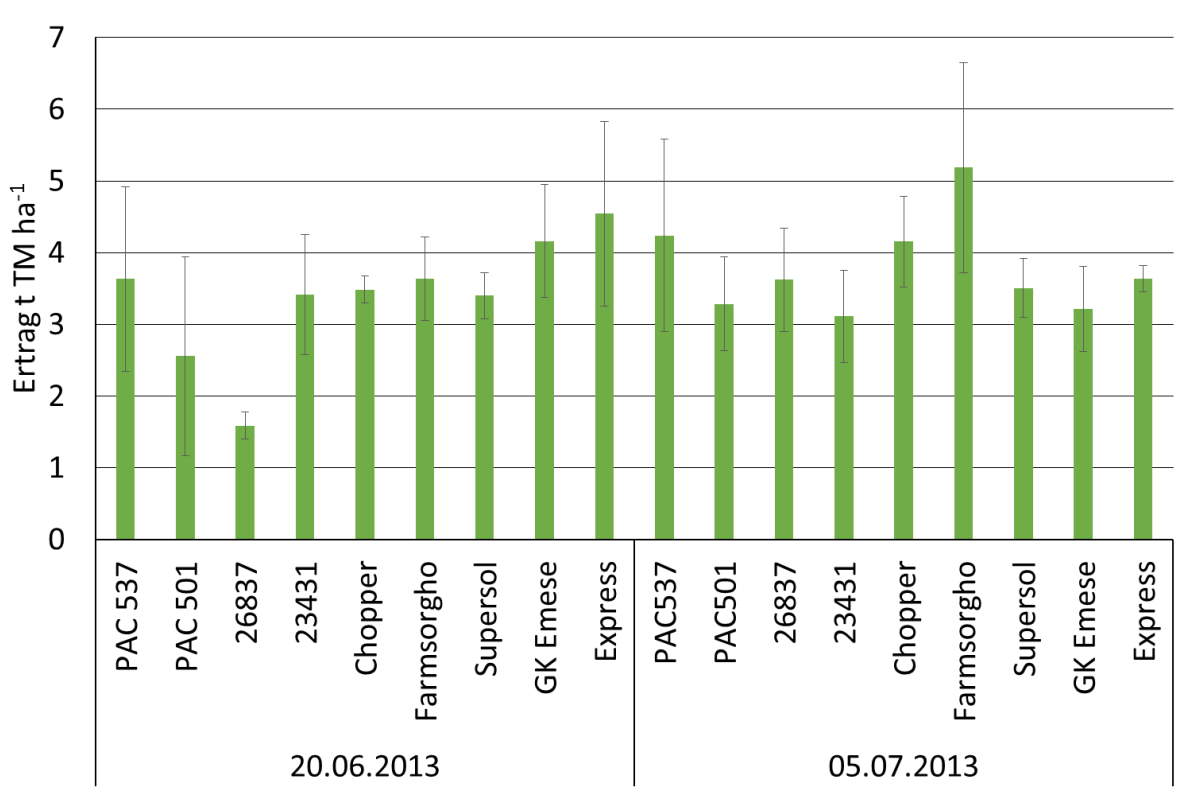


Abbildung 11: Trockenmasseerträge der untersuchten Zuckerhirsevarianten im Versuchsjahr 2013

Generell wurden die Anbauversuche 2013 durch die extremen Wetterverhältnisse geprägt. Die Trockenmasseerträge blieben im Versuchsjahr 2013 weit hinter den in den vorhergehenden Versuchsjahren erzielten Erträgen zurück. Dies hat vor allem mit der extremen Trockenheit im Sommer 2013 zu tun. In den ersten 2 Monaten der Vegetationsperiode fand nahezu keine Wasserzufuhr durch Niederschlag statt. Durch die Kombination aus kurzer Vegetationsperiode und der ausgeprägten Trockenheit fand bei den meisten Sorten keine Körnerbildung statt. Lediglich die Zuckerhirsevarianten Chopper, Farmsorgho, Supersol und GK Emese zeigten bei der Ernte im Oktober über den ganzen Bestand hinweg die Ausbildung von Körnern. Bei der Untersuchung dieser Körner nach dem Stärkegehalt wurde jedoch festgestellt, dass in keiner der untersuchten Proben Stärke gebildet wurde.

2.2.4 Lagerung der Zuckerhirse

Für die praktische Umsetzung einer Ethanolproduktion aus den, in der Zuckerhirse gebildeten, freien Zuckern ist es notwendig, diese über einen längeren Zeitraum zu konservieren. In dezentralen Anlagen würde ein Kampagnenbetrieb zur direkten Ethanolfermentation oder zur Herstellung eines höher konzentrierten Zuckersafts aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisierbar sein (hohe Investitionskosten für Zuckersaftabpresseinrichtung und Verdampfer).

Eine Möglichkeit zur Konservierung des Zuckers in der Pflanzenbiomasse ist die Anlage einer Silage, in der jedoch keine Milchsäuregärung stattfinden darf. Dazu muss die Biomasse vor der Einlagerung mit z.B. Ameisensäure möglichst schnell auf einen niedrigen pH Wert gebracht werden (Rohowsky et al.,

2011; Schmidt et al., 1997). Im Rahmen des Projektes wurden von den Sorten SG 1 und NE am 26. September Versuchssilagen angelegt.

Untersucht wurde der Effekt einer Beimengung von 80%iger Ameisensäure zu SG 1 sowie NE. Die Gesamtkonzentration der Ameisensäure wurde auf 0,5%, 0,75% und 1%, bezogen auf die Frischmasse, im Container eingestellt. Am Boden der Container wurde ein Ablauf installiert um den gebildeten Sickersaft aufzufangen.

Die Probenahmen aus den Versuchssilos erfolgten jeweils nach einem, zwei und drei Monaten. Dabei wurde festgestellt, dass bei den Varianten mit 0,5% (sowohl NE als auch SG 1) bzw. bei den anderen NE Varianten zum Zeitpunkt der dritten Probenentnahme ein Silagegeruch und eine Verfärbung wahrgenommen werden konnte. Dies deutet auf einen Abbau der Zucker zu organischen Säuren, z.B. Milchsäure, hin. Dies würde, sowohl aufgrund des niedrigeren Bioethanolpotentials, als auch aufgrund der Hemmwirkung von organischen Säuren auf die Ethanolfermentation, ein Problem darstellen. Bei den Versuchssilos der SG 1 Variante mit 0,75% und 1% Ameisensäure wurde weder ein Silagegeruch noch eine Verfärbung der Biomasse festgestellt. Die Analyse des Zuckergehalts aus der SG 1 Probe, welche nach 3 Monaten gezogen wurde, zeigte nur minimale Zuckerverluste. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Ameisensäureanteil bei der Konservierung von zuckerhaltiger Zuckerhirsebiomasse mindestens 1% sein muss um eine Gärung zu verhindern.

Hinsichtlich der Lagerung der Körner von Stärkehirsen gibt es bereits etablierte Verfahren aus der Getreideproduktion. Wichtig ist die Einhaltung eines Trockenmassegehalts von über 83% um mikrobiologische Aktivitäten zu unterbinden. Wird dieser nicht erreicht, so müssen die Körner zuvor getrocknet werden.

2.2.5 Erfassung und Bewertung von Betriebsparametern an der Biogasanlage

Die Nutzung der Reststoffe nach der Ernte bzw. nach der Ethanolproduktion für die Biogasproduktion hat zwei Kernnutzen. Zum einen wird weitgehend CO₂ neutrale Energie erzeugt und zum anderen kann somit der Nährstoffkreislauf für die landwirtschaftlichen Flächen geschlossen werden. Ein wesentliches Kriterium zur Bewertung der Effizienz dieses Verfahrens ist die Erfassung des Umwandlungseinsatzes bzw. die Berücksichtigung von Umwandlungsverlusten. Um diese beiden Parameter untersuchen zu können, wurde im Rahmen des Projektes ein 3-monatiges Monitoring der Biogasanlage Margarethen am Moos durchgeführt. Die dafür benötigten Parameter sowie die zur Messung verwendeten Methoden sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 10: Erfasste Parameter Biogasanlagenmonitoring sowie dafür angewandte Messmethoden

zu messender Parameter	Messmethode
Substrat	
Substratart	Logbuch
Substratmenge	automatische Wiegung in der Fütterungseinheit
Substratqualität	Probenahme
Energieeinsatz	
Fütterungseinheit	Stromzähler
Biomasse Vorbehandlung	durchschnittliche Leistungsaufnahme & Einschaltzeiten
Rührwerke	durchschnittliche Leistungsaufnahme & Einschaltzeiten
Pumpen	durchschnittliche Leistungsaufnahme & Einschaltzeiten
Biogas- bzw. Stromproduktion	
Gasmenge	Gaszähler vor BHKW
Gasqualität (CO ₂ & CH ₄)	Tägliche Messung mit IR Sensor
erzeugter Strom	Stromzähler am BHKW

Während der Monitoringphase wurde aufgrund eines defekten Pressschneckenseparators kein flüssiger Gärrest rezykliert, daher wurde von den dafür relevanten Komponenten kein Stromverbrauch erfasst. Des Weiteren wurde auch die Wärmeenergie, die zum Beheizen der Fermenter benötigt wird, messtechnisch nicht erfasst, da das Monitoring in den Sommermonaten durchgeführt wurde und dementsprechend die Fermenterheizung nicht in Betrieb war.

2.2.5.1 Biomasselagerung, -aufbereitung und -einbringung

Das Gewicht (Frischmasse) der angelieferten Biomasse wird über eine Brückenwaage erfasst. Für die Bestimmung der Trockenmasse wird eine Probe entnommen und mit einem Schnellanalysegerät auf den Trockenmassegehalt untersucht. Die Biomasse wird anschließend auf einer Siloplatte bzw. zwei Fahrsilos verdichtet und mit dem Feststoffanteil des Gärrests (nach Separierung) bis zur Entnahme abgedeckt. An der Biogasanlage der EVM wird zudem Pferdemist verwertet. Dieser wird offen auf der Siloplatte gelagert.

Zur Dosierung der gefütterten Menge wird das Aggregat „Biofeeder“ der Fa. BioG Biogastechnik verwendet. Dazu wird die Biomasse schichtweise in den Vorratsbehälter eingebracht und mittels Schubboden zum Kopfende der Einheit gebracht. Dort befinden sich Schnecken, die nach und nach zuschaltbar sind und die Biomasse von der Anschnittfläche „kratzen“. Anschließend wird das Material über eine Förderschnecke weiter zur mechanischen Aufbereitung, dem „Biokonverter“, transportiert. Dieser ist eine Eigenentwicklung der Fa. MethaPower bzw. der EVM. Die Biomasse wird dabei in einem tonnenförmigen Behälter durch ein schnell rotierendes Werkzeug zerkleinert bzw. zerfasert.

Dieser Prozess wird kontinuierlich betrieben. Die aufgeschlossene Biomasse wird anschließend mittels Wangenpumpe mit Fermenterinhalt vermischt und in die Fermenter gefördert.

2.2.5.2 Fermenter

Die Biogasanlage Margarethen am Moos bestand zum Zeitpunkt des Monitorings aus 2 Hauptfermentern (jeweils 2.200 m³) und einem Nachfermenter (3.500 m³) sowie einer Lagune, die zur Lagerung des separierten Flüssiganteils des Gärrests dient. Die Fermenter sind jeweils mit 2 Rührwerken (ein Stabrührwerk und ein hydraulisch betriebenes Taupropellerrührwerk) ausgestattet. Die Biogasspeicher sind in Form eines Doppelmembrangasspeichers am Fermenter ausgeführt.

2.2.5.3 Biogasverwertung

Der Großteil des erzeugten Biogases wird in einem BHKW (637 kW_{el}) verstromt. Die dabei anfallende Abwärme wird zum Heizen der Fermenter sowie zum Betrieb eines kleinen Nahwärmenetzes verwendet. Nicht benötigte Wärme wird über ein Tischkühlersystem an die Atmosphäre abgegeben. Ein Teil des gewonnenen Biogases wird über ein Membranverfahren zu Biomethan aufgereinigt und dann als Treibstoff (u.a. für Traktoren) eingesetzt.

2.2.5.4 Gärrestverwertung

Der Gärrest wird über einen Pressschneckenseparator in eine flüssige Fraktion und in einen festen Anteil separiert. Ein Teil des festen Gärrests wird zur Abdeckung des Silos verwendet, der Rest wird auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht und in den Boden eingearbeitet. Der Flüssiganteil wird bei Bedarf in die Fermenter rezirkuliert oder ansonsten ebenfalls auf landwirtschaftlichen Flächen als Dünger ausgebracht.

2.2.5.5 Umbauarbeiten

Vor bzw. auch zum Teil während, des Monitorings kam es an der Anlage zu umfangreichen Umbauarbeiten. Dies betraf zunächst hauptsächlich die Fermenter, in die neue Rührwerke (Stabrührwerke) sowie Doppelmembrangasspeicher installiert wurden. Da sich der Biokonverter zurzeit noch in der Entwicklungsphase befindet, kam es bei dessen Betrieb zu gewissen Unregelmäßigkeiten bzw. Ausfällen.

2.2.5.6 Bewertung der biologischen Prozessstabilität

Um eine Aussage über die biologische Prozessstabilität treffen zu können, wurde der FOS/TAC Wert von Hauptfermenter, Nachfermenter sowie Gärrestlager bestimmt. Der FOS/TAC ist das Verhältnis von organischen Säuren (free organic acids) zu Puffervermögen (total anorganic carbon) im Fermenter. Der Wert eignet sich zwar nicht zum Vergleich zweier Anlagen, jedoch kann bei Änderung von Betriebsparametern an einer Anlage eine gewisse Aussage über deren Wirkung gemacht werden. Steigt der FOS/TAC Wert, so heißt dies, dass der Gehalt an organischen Säuren zunimmt bzw. die Pufferkapazität abnimmt. Dies weist auf einen schnelleren Abbau der Biomasse in den ersten drei Phasen der anaeroben Vergärung (Hydrolyse, Acidogenese und Acetogenese) hin. Solange die Archaeen in der Lage sind dieses Angebot an organischen Säuren in der Methanogenese weiterzuverarbeiten, ergibt sich kein Problem hinsichtlich der biologischen Prozessstabilität im Fermenter. Übersteigt dieses Angebot jedoch die Kapazität der Archaeen, so kommt es zu einer

Akkumulation der organischen Säuren, was in weiterer Folge zu einer Übersäuerung des Fermenters und schlussendlich zum sogenannten „Absturz“ eines Fermenters führen kann.

Sinkt der FOS/TAC hingegen, so ist dies ein Zeichen für eine langsamere Abbauleistung in den ersten Phasen der anaeroben Gärung. Dies weist auf eine schwierigere Abbaubarkeit der eingesetzten Biomasse, vor allem in der Hydrolyse hin. Dadurch ergibt sich zwar prinzipiell kein biologisches Problem, jedoch können nur relativ geringe Raumbelastungen im Fermenter umgesetzt werden, da es ansonsten zu Problemen hinsichtlich der Rührfähigkeit des Fermentermaterials kommen kann. Dies geht auch mit einer erhöhten mechanischen Beanspruchung sowie einem erhöhten Energieverbrauch der Rühraggregate einher.

2.2.6 Durchführung des Monitorings

Die Datenerfassung für das Monitoring wurde vom Anlagenpersonal vor Ort durchgeführt. Die Datenblätter bzw. Excel-Tabellen für die Erfassung wurde vom Personal des BOKU ILT und der TU erstellt bzw. zur Verfügung gestellt. Die ersten Daten wurden am 06.05.2013 erfasst, die letzten am 24.07.2013. Die Dauer des Monitorings betrug somit 79 Tage. Aufgrund von technischen Fehlfunktionen kam es jedoch bei einzelnen Parametern zu teils beträchtlichen Lücken in der Datenerfassung. Dies betrifft zum Beispiel die Erfassung der eingebrachten Mengen, die Zusammensetzung des Biogases oder die Erfassung der produzierten Strommenge. Zudem konnte bis zum Beginn des Monitorings kein stabiler Anlagenbetrieb etabliert werden. Ein Hauptfermenter war zum Zeitpunkt des Monitoringbeginns offen (Installation des Doppelmembrangasspeichers) und wurde erst Ende Mai in Betrieb genommen. Da jedoch beide Hauptfermenter über dasselbe Aggregat gefüttert werden, konnte keine Zuordnung getroffen werden, wie viel Biomasse in welchen Fermenter gefördert wurde. Eine wesentliche Einschränkung der Interpretierbarkeit der Daten ergibt sich dadurch, dass während des Monitorings keine Proben der Einsatzstoffe gezogen wurden. Um dennoch eine gewisse Aussage über die Raumbelastung treffen zu können, wurde auf den Trockenmassegehalt der Biomasse bei Anlieferung zurückgegriffen. Auf eine Bestimmung des Gasertrags pro eingesetzte Einheit Biomasse wurde aufgrund des fehlenden Trockenmasse- bzw. organischen Trockenmassegehalts, der Unregelmäßigkeiten bei der Fütterung sowie der teilweise lückenhaften Aufzeichnung der Gas- bzw. Stromproduktion verzichtet. Haupt- und Nachfermenter sowie das Gärrestlager wurden zum Zweck der Bewertung der biologischen Prozessstabilität im 4-Wochen-Abstand beprobt.

2.2.7 Optimierung der Prozessstufen und Betriebsparameter

Für die Optimierung der Prozessstufen und Betriebsparameter für die Produktion von Bioethanol und Biogas unter Nutzung von Zuckerhirse wurden vier Varianten ausgewählt welche mittels des Prozesssimulationsprogramms ASPLEN Plus® durchgeführt wurde.

Für die Berechnung von Variante 1 (konventionelle Vergleichsprozesse), als auch für die Simulation der Varianten 2-4 (Hirsebasierte Prozesse) wurde als Basis eine landwirtschaftliche Fläche von 200 ha und 8000 Betriebsstunden herangezogen. Für die Varianten 2-4 wurden die Ernteergebnisse aus dem Versuchsjahr 2011 herangezogen.

Variante 1, die konventionellen Vergleichsprozesse, sind in Abbildung 20 dargestellt. Der Biogasprozess beinhaltet die Ernte des Substrates, Silierung und Fermentation zu Biogas. Die Ernte wird beim Ethanolprozess durch die Anlieferung des Substrates abgelöst. Dieses wird dann gegebenenfalls gelagert und vor der Fermentation zerkleinert. Nach Anmeischung erfolgt der Prozess in zwei wesentlichen Schritten: Erstens Verflüssigung der Stärke durch α -Amylasen, sowie Verzuckerung durch β -Amylasen, und zweitens die Fermentation des Zuckers zu Alkohol, welcher dann noch durch Destillation bzw. Rektifikation konzentriert, und z.B. mittels Absorption absolutiert wird. Diese Variante entspricht den klassischen Produktionswegen. Daher kann auf bestehende Daten zurückgegriffen werden.

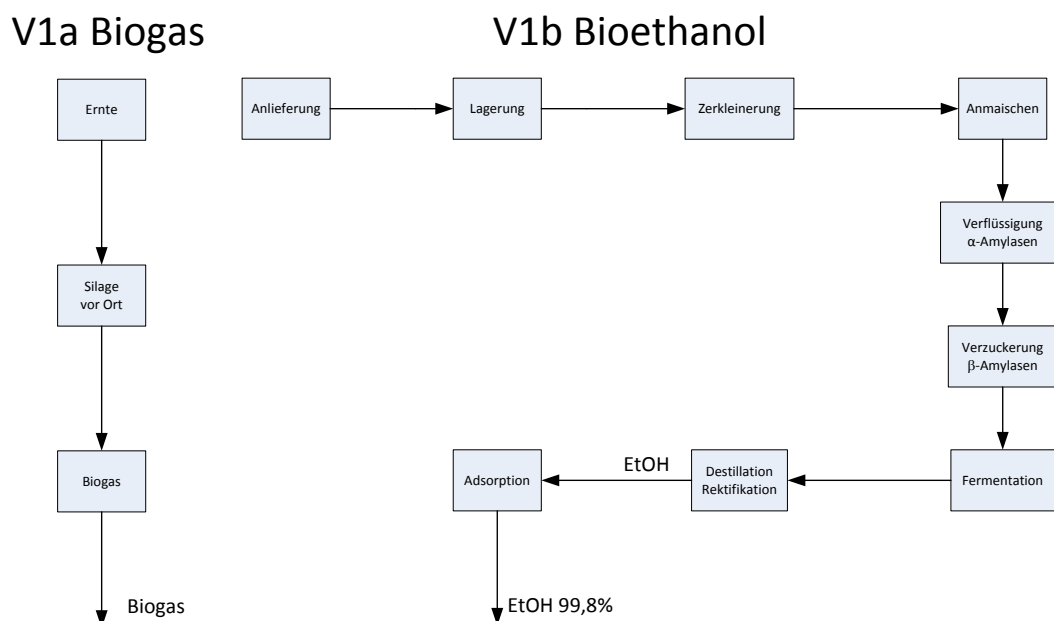


Abbildung 12: Schema der Prozessvariante 1 (Vergleichsprozesse-Ethanol aus Mais, Biogas aus Maissilage)

Für die Vergleichsvarianten mit Bioethanol- bzw. Biogasproduktion wurde eine Ernte von 10,8 t/ha Mais Korn, bzw. 48,1 t/ha Maissilage aus dem Statistik Austria Bericht zur Feldfruchternte 2011 übernommen (Bader und Kriesel, 2012). Die typischen Feuchtegehalte und -zusammensetzungen wurden aus der Literatur übernommen (für Mais Korn von Englert et al. (2012), für Maissilage von Amon et al. (2002). Mit der zur Verfügung stehenden Ackerfläche von 200 ha und 8000 Jahresproduktionsstunden ergibt sich ein Substratstrom von 270 kg/h frischem Mais Korn für die Bioethanolproduktion in V1. Für den Fall der Biogasproduktion ergibt sich aus den Ernteerträgen ein Input von 1203 t/ha feuchter Silage. Umgerechnet auf Trockensubstanz bedeutet das, dass 232,2 kg/h Mais Korn im Vergleichs-Bioethanolprozess, beziehungsweise 497,6 kg/h Silage im Vergleichs-Biogasprozess verarbeitet werden. Für Bioethanolprozesse ist eine breite Streuung der Ausbeute in der Literatur zu finden. Zum Beispiel gibt Dellweg (1987) eine Ausbeute von 1 bis 1.1 tonnen Ethanol pro Hektar und Jahr an. In jüngerer Literatur werden durchaus höhere Werte angegeben. Verwendet wurden die Werte aus Friedl (2012), wo eine Ausbeute von 325 kg Ethanol pro Tonne feuchtem (14 %) Korn

angegeben wird, nach Bezug der Ausbeute auf die eingebrachte Trockensubstanz (377,9 kg Ethanol pro Tonne TS). Für die Ausbeute an DDGS wurde dieselbe Quelle herangezogen. Der angegebene Wert von 321 kg/t ergibt nach Umrechnung auf die Trockensubstanz eine Ausbeute von 373,3 kg/t TS. Für die Biomethanausbeute des Vergleichsprozesses wurde eine Ausbeute von 337,5 LN/kg TS (240,9 kg/t TS) angenommen, was dem Mittel der Werte von Englert et al. (2009) entspricht (295 bis 380 LN per kg TS). Im Biogaspotential-Screening von Amon et al. (2002) wurden Ausbeuten in einem ähnlichen Bereich (247 bis 375 LN/kg TS) erreicht.

Die Ausbeuten von 377,9 kg Ethanol pro Tonne trockenem Maiskorn und 240,9 kg Methan pro Tonne trockener Silage führen zu spezifischen Energieproduktionen der Vergleichsvariante V1, nämlich 2,82 kWh/kg TS für die Ethanolvariante und 3,35 kWh/kg TS für die Biogasvariante (Berechnet als Heizwert der produzierten Biotreibstoffe). Über ein Jahr gerechnet beträgt damit die Gesamtproduktion 702,0 Tonnen Ethanol beziehungsweise 959,2 Tonnen Methan, was einer Energieproduktion von 5,24 GWh und 13,32 GWh pro Jahr entspricht. Zusätzlich werden im Bioethanolprozess noch 693,4 Tonnen DDGS pro Jahr produziert.

In Variante 2 (siehe Abbildung 21) wird Biogas- und Bioethanol in Synergie aus einer kornbildenden Zuckerhirseart („Chopper“) produziert. Dabei werden Stroh und Korn nach bzw. bei der Ernte getrennt und in separaten Prozessen verwendet. Das Korn wird zu einer zentralen Ethanolproduktionsanlage (mit einer Kapazität von 100.000 t/a Ethanol) transportiert, dort zerkleinert und wie beim konventionellen Bioethanolprozess zu Alkohol fermentiert, wobei die Destillationsrückstände zum Nebenprodukt DDGS weiterverarbeitet werden. Das Stroh wird zur Biogasproduktion herangezogen, um die Energieausbeute zu verbessern.

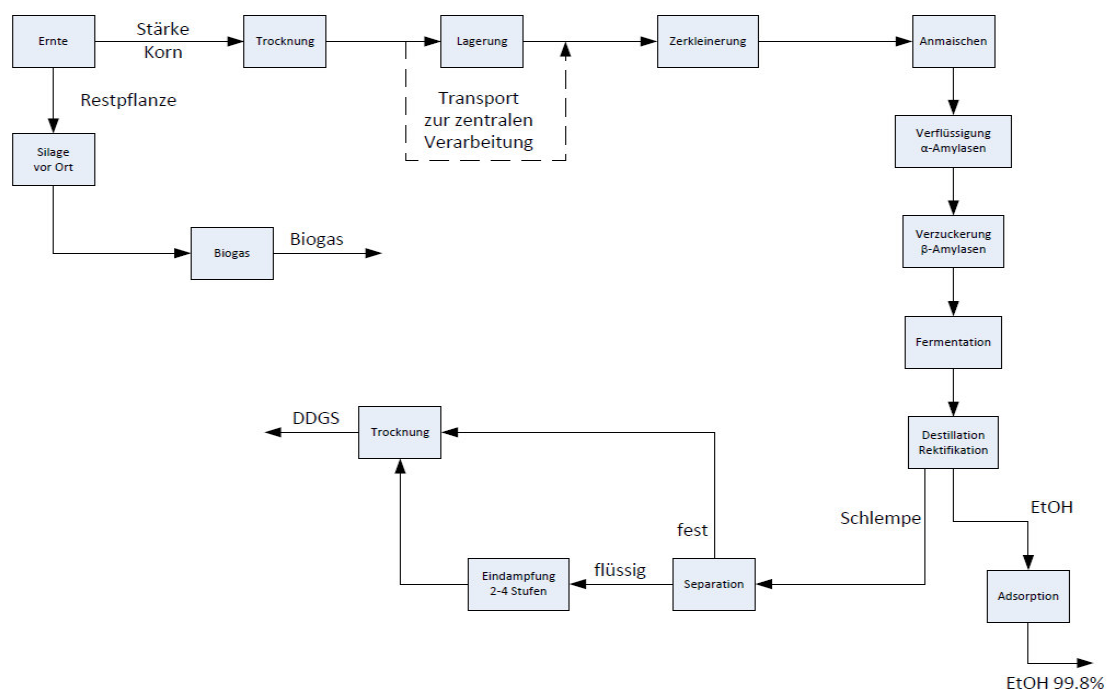


Abbildung 13: Schema der Prozessvariante 2 (Getrennte Nutzung von Korn und Stroh einer Körnerhirsesorte)

In der Simulation wurden die für die Zuckerhirse Sorte “Chopper” als Zwischen- bzw. Zweitfrucht erhobenen Daten verwendet. Korn und Stroh wurden bei der Versuchsernte 2011 einer Weender-Analyse unterzogen und der TUW von den Projektpartnern zur Verfügung gestellt (siehe Tabelle 10).

Tabelle 11: Weenderanalyse der Zuckerhirseernte 2011 (Vierter Erntetermin)

	Einheit	Chopper Zweitfrucht Korn	Chopper Zweitfrucht Stroh
Ertrag	t TM / ha	10,23	7,22
DM	% FM	68,26	23,2
Protein	% TS	6,5	3,4
Fett	% TS	3	1,9
Lignin	% TS	1,5	8,6
Zellulose	% TS	7,8	35,4
Hemizellulose	% TS	15,2	24
Asche	% TS	2,80	9,50
Stärke	% TS	63,7	2,2
Zucker	% TS	1,5	4,3

Da die Summe der Anteile, vor allem bei der Strohanalyse, von 100% verschieden war, wurde beschlossen, die Differenz den Kohlenhydraten zuzurechnen. Dementsprechend wurde der gesamte Kohlenhydratanteil für die Simulation um 10,7% (Stroh) erhöht. Im Fall des Kornes war eine Reduzierung aller Komponenten um 2% nötig, um die Summe auf 100% zu korrigieren.

Für die Simulation der Prozessvariante V2 wurde das Elektrolytmodell ELECNRTL verwendet. Die der Anlage zugeführten Stoffströme betragen 374,79 kg/h Korn (Wassergehalt 32 % FM) und 777,72 kg/h Stroh: (Wassergehalt 77 % FM). Es wurde des Weiteren angenommen, dass die Verluste während der Lagerung vernachlässigbar klein sind. Um das Korn lagerfähig zu machen, musste der Feuchtegehalt auf maximal 17% reduziert werden. Zur Trocknung wurde eine Flash-Einheit verwendet. Dabei wurde ein Energiebedarf von 1,52 kWh/kg verdampftem Wasser angenommen (C.A.R.M.E.N. e.V., 2013).

Der Zerkleinerungsschritt wurde als Black Box Modell simuliert, wozu die Daten zum Energieverbrauch aus der Literatur für Corn Stover herangezogen wurden (Gil et al.). Der gesamte Energiebedarf für den Prozessschritt beträgt 2,67 kW. Die Verluste im Zerkleinerungsschritt wurden als vernachlässigbar klein angenommen.

Ein detailliertes Schema der Stärkehydrolyse und Fermentation ist in (Abbildung 12, siehe Anhang) gegeben. Drei stöchiometrische Reaktoren wurden verwendet um die Einzelschritte der Umwandlung der Stärke zu Glukose und Alkohol abzubilden. Die Stärkehydrolyse wird in die Schritte Verflüssigung und Verzuckerung unterteilt. Um die Stärke zu Alkohol zu fermentieren, muss sie zuerst in Oligosaccharide heruntergebrochen werden, was in der Anwesenheit von Alpha-Amylasen durchgeführt wird (Verflüssigung). Dabei wird ein vollständiger Umsatz von Stärke zu Oligosacchariden angenommen. In ASPEN Plus wird folgende Reaktionsgleichung angewandt:

Stärke + Wasser → Oligoglukose

Nach der Verflüssigung erfolgt die Umwandlung der Oligomere zur leicht zu Ethanol fermentierbaren Glukose durch Beta-Amylasen.

Oligoglucose → Zucker

Zur Simulation der Alpha- und Beta-Amylasen wird in ASPEN Plus ein kommerziell erhältliches Enzympräparat herangezogen (in ASPEN als ZYMO bezeichnet). Die Zusammensetzung kommerzieller Enzympräparate ist in Tabelle 15: Zusammensetzung zweier Varianten von LE399 Alpha-Amylase, Liquozyme EX und und Liquozyme X) dargestellt. Entsprechend der Tabelle wird angenommen, dass für die Zusammensetzung der Alpha- und Beta-Amylasen Präparate als 52% Wasser und 48% ZYMO in der Simulation angenommen wird.

Tabelle 12: Zusammensetzung zweier Varianten von LE399 Alpha-Amylase, Liquozyme EX und und Liquozyme X

	Liquozyme EX	Liquozyme X
organische Trockensubstanz Total organic solids	ca. 4%	ca.. 8%
Wasser	ca. 52%	ca..%
Saccharose/Glukose	ca. 29%	ca. 25%
Speisesalz	ca. 15%	ca. 15%
Methionin	0.6%	0.6%

Entsprechend einschlägiger Literatur (Barcelos et al., 2011) wurde für die Alpha-Amylasen eine Konzentration von 2 Milligramm pro Gramm Korn und 4 Milligramm pro Gramm Korn Beta-Amylasen verwendet. Der Feststoffgehalt wurde mittels Wasserzugabe auf 25% eingestellt, was als optimaler Wert für die Enzyme beschrieben wird (Barcelos et al., 2011). Die Verflüssigung wurde bei einer Temperatur von 90°C, die Verzuckerung bei 60°C simuliert, der pH-Wert betrug bei beiden Prozessschritten 6.

Fermentation findet statt, nachdem die Stärke zu den Monomereinheiten – Glukose – hydrolisiert wurde. Dabei entstehen aus einem Glukosemolekül zwei Ethanol- und zwei CO₂-Moleküle entsprechend der folgenden Reaktionsgleichungen (in ASPEN Plus verwendete, bzw. chemische Reaktionsgleichung).



Entsprechend der Effizienz industrieller Anlagen wurde ein Umsatzgrad von 90% angewandt. Die Fermentation wird in der Simulation in einem stöchiometrischen Reaktor bei 35°C und einem Feststoffgehalt von 10% in der Maische, eingestellt durch Wasserzugabe, simuliert. Neben Ethanol und Kohlendioxid entsteht bei der Fermentation eine kleine Menge Zellmasse, welche bei der Simulation berücksichtigt wird. Die Ethanolkonzentration nach der Fermentation beträgt etwa 9%w.

Der Eingangsstrom in den Ethanolzweig beträgt 374,9 kg/h feuchtes, bzw. 255 kg/h trockenes Korn, welches zu 63,7% aus Stärke besteht (entspricht 155 kg/h). Weitere etwa 1,5% (3,6 kg/h) des Korns sind freie Zucker, die ebenfalls fermentiert werden. Die daraus produzierte Menge Ethanol beträgt 81 kg/h, was eine Jahresproduktion von 650 Tonnen ergibt. Bezogen auf die Anbaufläche sind das 3,25 t/ha.

Das ASPEN Simulationsmodell für die Ethanolanreicherung besteht aus zwei integrierten Kolonnen, einer Strip-Kolonne zur CO₂-Abtrennung, die Andere zur Ethanolanreicherung bis zum azeotropen Punkt (Abbildung 38, siehe Anhang). Am Kopf der Stripkolonne liegen neben CO₂ auch Wasser und Ethanol vor. Um Ethanolverluste gering zu halten, werden Wasser und Ethanol in einer Flashkolonne abgetrennt und zur Stripkolonne rückgeführt. Der angereicherte Ethanolstrom (45%) wird als Seitenstrom

abgezogen und in einer Rektifikationskolonne bis knapp unter den azeotropen Punkt angereichert (92 – 94%w. Die Ethanolkonzentration wird mittels Molekularsieben weiter auf 99,7% erhöht.

DDGS wird aus den Rückständen der Ethanolproduktion erzeugt. Das Simulationsmodell für DDGS wurde in ASPEN Plus, basierend auf verfügbare Daten und Erfahrungen (Monceaux und Kuehner, 2009) entwickelt. Der aus der Ethanolanreicherung kommende Sumpfstrom der beiden Kolonnen enthält etwa 11% Trockensubstanz und wird einem Dekanter zugeführt. Danach liegen ein Strom mit 5% TS und ein feststoffreicher Strom mit 25% TS vor. Der feststoffarme Strom wird so aufgeteilt, dass 50% einer dreistufigen Verdampfung zugeführt werden, wo er auf 32% TS eingedickt wird. Die mehrstufige Verdampfung wird als integrierter Prozess simuliert, in der nur für eine Stufe Energie zugeführt werden muss, und die Kondensationswärme für die nachfolgende Stufe genutzt werden kann. Die restlichen 50%, werden zur Stärkeverflüssigung zurückgeführt (Monceaux und Kuehner, 2009). Der feststoffreiche und der eingedickte Strom werden vermischt und einem Trockner zugeführt.

Das bei der Zuckerhirseernte anfallende Stroh wird zu Biogasproduktion herangezogen. Dafür wird in ASPEN Plus ein stöchiometrischer Reaktor bei einer Temperatur von 35°C und einem Druck von 1 bar verwendet. Durch die Einbringung von etwas Frischwasser wird die Substratkonsistenz im Reaktor auf 10% Trockensubstanz eingestellt. Entsprechend Theuretzbacher et al. (2013) wurden Umsätze von 0,7 für Fett und Proteine, sowie 0,85 für Kohlenhydrate verwendet.

777,72 kg/h feuchtes Stroh werden zur Biogasproduktion verwendet. Aus dem gesamten Eingangsstrom von 1601,2 kg/h, bestehend aus Stroh und zusätzlichem Frischwasser zur Einstellung des Trockensubstanzgehaltes auf 10%, wird eine Gesamtmenge von 138,4 kg/h feuchtes Biogas produziert. Die Zusammensetzung ist in Tabelle 12 angeführt.

Tabelle 13: Zusammensetzung des produzierten Biogases in Prozessvariante 2

	Wasser	CO ₂	CH ₄	NH ₃	H ₂ S
Stoffmengenanteil	5,73%	45,70%	48,54%	0,00%	0,03%

Der Anteil des Methans im Gesamtstrom von 138,4 kg/h produziertem Biogas macht 37,24 kg/h aus. Bei einer angenommenen Dichte des Methans von 0,72 kg/m³ und dem TS Gehalt aus Tabelle 6, ergibt das eine spezifische Methanproduktion von 299,5 L CH₄/kg TS.

Die simulierten Gaserträge sind etwas höher als die von Theuretzbacher et al. (2013) beschriebenen. Die Simulation in ASPEN Plus wurde darauf hin untersucht mit dem Schluss, dass die VDI 4630 Richtlinie zur Bestimmung des Biogasertrages die unterschiedlichen Strukturen von z.B. Zucker und Hemizellulose nicht berücksichtigt.

Die Variante 3 (V3, Ganzpflanzenfermentation, siehe Abbildung 22) beruht auf der Stabilisierung der Pflanze (Zuckerbildende Hirsesorte „Sugargraze 1“, Ernteanalyse siehe) unmittelbar nach der Ernte, um Zuckerverluste zu verhindern. Die zerkleinerten Pflanzen werden ohne weiteren Trennschritt in einen Fermenter eingebracht, wo der Zucker in einer sogenannten Solid-State-Fermentation (SSF) vergoren wird. Nach Abtrennung der Feststoffe kann aus diesen Biogas produziert werden. Die Alkoholanreicherung erfolgt bis ca. 85% vor Ort, darüber hinaus in einer zentralen Anlage.

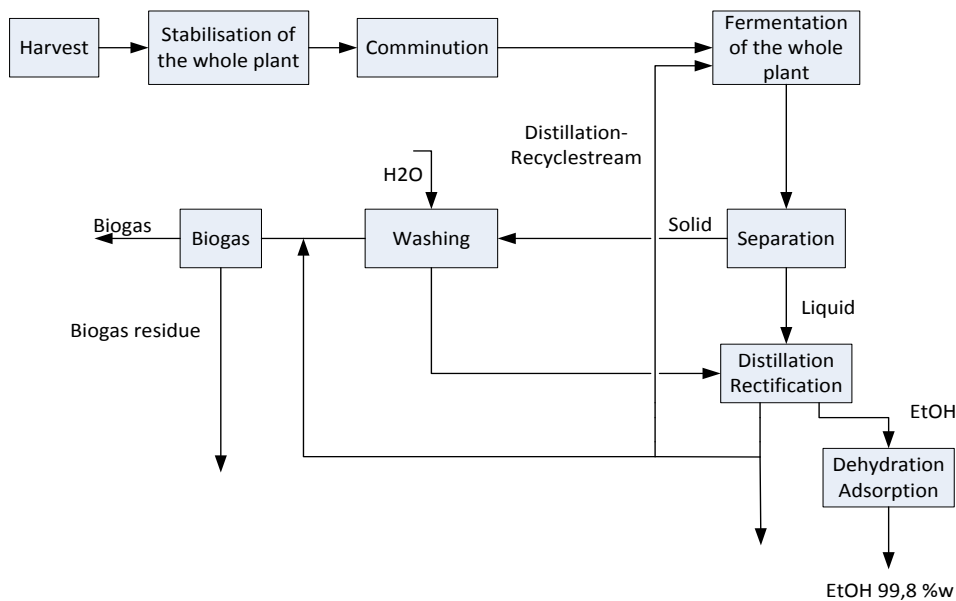


Abbildung 14: Schema der Prozessvariante 3 (Ganzpflanzenfermentation einer Zuckerhirsesorte)

Tabelle 14: Weender Analyse von Sugargraze I der Versuchsernte 2011 (Vierter Erntetermin)

	Einheit	Sugargraze I Catchcrop 4 H
Ertrag (t TS/ha)		17,08
Trockensubstanz	% FM	24,7
Protein	% TS	3,7
Fett	% TS	1,5
Lignin	% TS	7,6
Zellulose	% TS	28,5
Hemizellulose	% TS	18,8
Asche	% TS	6
Stärke	% TS	
Zucker	% TS	21,43
Organischer Rest	% TS	13,8

Zur Simulation in ASPEN Plus wurden die gleichen Voraussetzungen wie bei Variante 2 getroffen. Dasselbe Elektrolytmodell (ELECRTL), und die selbe Komponentenliste wurden verwendet.

Nach der Ernte der Zuckerhirse müssen die Pflanzen stabilisiert werden um Zuckerverlusten, die in der Literatur erwähnt wurden (Schmidt et al. 1997) vorzubeugen. In der Simulation wird 20%ige Ameisensäure zu der Frischmasse gemischt, sodass die Konzentration der Ameisensäure 1%w beträgt. In Stabilisierungsversuchen wurde kein Verlust von Zuckern über eine Dauer von drei Monaten festgestellt, und daher auch in der Simulation vernachlässigt.

Vor der SSF wird die stabilisierte Pflanze zerkleinert. Dabei wurde angenommen, dass die Verluste vernachlässigbar klein sind. Die Zerkleinerungsenergie wurde entsprechend der Literatur (Gil et al.) mit 32 KJ/kg angenommen. Im SSF Reaktor wird die zerkleinerte Pflanze zusammen mit 4 Gramm Hefeextrakt pro Kilogramm Frischmaterial (Rohowsky et al., 2011) eingebracht. Auf Frischwasser wird dabei verzichtet. Das Substrat im Fermenter hat damit einen Feststoffgehalt von ca. 18%. Da Ameisensäure im Stabilisierungsschritt eingebracht wurde, ist der pH Wert sehr niedrig, welcher durch

Zugebe von etwas NaOH auf einen für die Fermentation günstigen Wert von ca. 4 eingestellt wird. Die Fermentation wird bei 30°C betrieben, dabei werden 90% des Zuckers zu Ethanol umgewandelt, der Rest dient der Produktion von Zellmasse und Glycerin (Li et al., 2013). Die Ethanolkonzentration in der Lösung nach der Fermentation liegt bei 2,9%w.

Nach der Fermentation müssen die unzersetzten Feststoffe von der flüssigen Phase abgetrennt werden. Die Trennung wird mittels eines Separators simuliert, wobei alle Feststoffe in einen Strom mit 50% Feststoffanteil abgeschieden werden. Die Feststoffe werden in einem Gegenstrom-Verdrängungswäscher gewaschen um Ethanolverluste zu minimieren.

Da die Ethanolproduktion bei der Prozessvariante V3 gering ausfällt, wird vorgeschlagen, die Destillation bis zum azeotropen Punkt vor Ort durchzuführen, und das Destillat zu einer Großanlage zur Dehydrierung zu befördern. Dementsprechend müssen in der LCA zusätzliche Transportkosten und Treibhausgase berücksichtigt werden. Der Destillationsblock wurde wie in der Prozessvariante 2 aus zwei integrierten Kolonnen aufgebaut. Da der Feed aus der Fermentation eine Ethanolkonzentration von 2,9%w, also etwas niedriger als in V2, hat, muss das Modell etwas angepasst werden. Im Vergleich zu V2 ist der Gesamtenergiebedarf wegen der kleineren Anlagengröße und dem kleineren Feedstrom hier niedriger. Der spezifische Energiebedarf pro kg Ethanol ist jedoch viel höher, was auf die geringere Ethanolkonzentration von 2,9%w (gegenüber 9%w) zurückzuführen ist.

In V3 werden die Prozessrückstände (abgetrennte Feststoffe nach der Fermentation und Destillationsschlempe) nach der Ethanolproduktion für die Erzeugung von Biogas herangezogen. Das Modell der Prozessvariante 2 wurde wieder herangezogen. Aus 3245,4 kg/h Substrat (die beiden Rückstände und zusätzliches Frischwasser) wurde eine Gesamtmenge 269,7 kg/h feuchtem Biogas mit der aus Tabelle 18 ersichtlichen Zusammensetzung gewonnen.

Tabelle 15: Zusammensetzung des in Variante 3 produzierten Biogases

	Wasser	CO ₂	CH ₄	NH ₃	H ₂ S
Stoffmengenanteil	5,71 %	45,86 %	48,39 %	0,00 %	0,04 %

Im Gesamtbiogasstrom sind demnach etwa 72,2 kg/h Methan enthalten. Mit einer angenommenen Dichte von 0,72 kg/m³ und dem Trockensubstanzgehalt aus Tabelle 11 erhält man eine spezifische Methanproduktion von 234,9 L/kg TS.

Die Überlegungen zu der Variante 4 (Abbildung 23) ergaben, dass das Abpressen der gesamten Ernte und das Aufkonzentrieren der Zuckerlösung kurz nach der Ernte abgeschlossen werden muss um den Zuckerverlust zu minimieren. Dies erfordert jedoch hohe Abpresskapazitäten und für das Abdampfen einen hohen Energieeinsatz, welcher mit der Restwärme der Biogasanlage nur zu einem sehr geringen Anteil abgedeckt ist, um einen lagerfähigen Saft (70% aufkonzentriert) zu erhalten. Aufgrund der hohen kapitalgebundenen Kosten sowie den zusätzlichen Einsatz an Energie zum Abdampfen ist eine wirtschaftliche Betriebsweise unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht machbar. Daher wurde die Variante 4 für den Praxisbetrieb ausgeschlossen.

Diese vierte Variante beinhaltet in weiterer Folge die Zerkleinerung und Auspressen der Pflanzen. Der Pressrückstand wird gewaschen und zur Produktion von Biogas verwendet. Der Presssaft wird mit der Waschflüssigkeit vereint und wieder einer Alkoholfermentation zugeführt. Der Destillationsrückstand wird

ebenfalls zur Biogasproduktion zugeführt. Wie in Variante 3 wird die Ethanolanreicherung aufgrund der kleineren Anlagengröße in einen Destillationsblock vor Ort und die weitere Anreicherung in der Großanlage aufgeteilt.

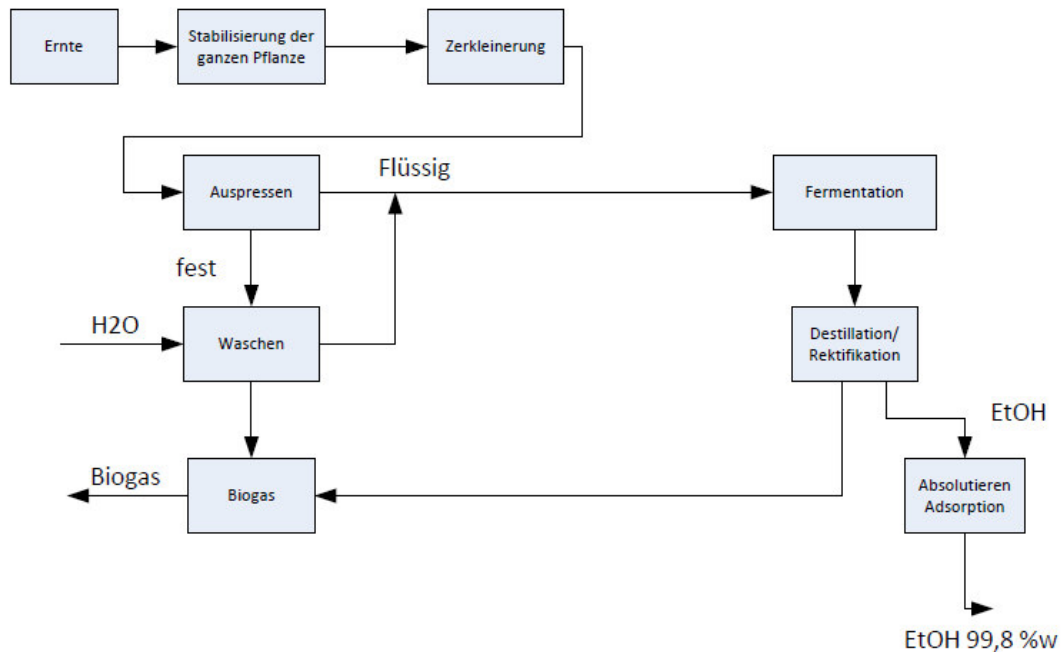


Abbildung 15: Schema der Prozessvariante 4 (Getrennte Verarbeitung von Zuckersaft und Restpflanze)

Als Basis für die Simulation dienen die Ernteerträge und die Zusammensetzung der Zuckerhirsesorte Sugargraze I, welche schon bei der Prozessvariante 3 beschrieben wurden. Zur Simulation in ASPEN Plus wurden die gleichen Voraussetzungen wie bei Variante 2 getroffen. Nach der Ernte der Zuckerhirse müssen die Pflanzen stabilisiert werden um Zuckerverlusten, die in der Literatur erwähnt wurden (Schmidt et al. 1997) vorzubeugen. In der Simulation wird 20 %ige Ameisensäure zu der Frischmasse gemischt, sodass die Konzentration der Ameisensäure 1%w beträgt. In Stabilisierungsversuchen wurde kein Verlust von Zuckern über eine Dauer von drei Monaten festgestellt, und daher auch in der Simulation vernachlässigt.

Vor der Fermentation wird die stabilisierte Pflanze zerkleinert. Dabei wurde angenommen, dass die Verluste vernachlässigbar klein sind. Die Zerkleinerungsenergie wurde entsprechend der Literatur (Gil et al.) mit 32 KJ/kg angenommen. Die Extraktion des Zuckersaftes wurde entsprechend dem von Dias et al. (2009) beschriebenen Prozess simuliert. Es werden Mühlen verwendet, in welchen Wasser im Ausmaß von ca. 30% der gesamten Zuckerhirsemenge zugeführt wird. Dabei können 96% des gesamten Zuckers extrahiert werden und stehen für die Alkoholproduktion zur Verfügung. Die mit dem Pflanzenrest verbliebenen Zucker sind aber nicht verloren, sondern können in der Biogasproduktion abgebaut werden.

In der Simulation wird der Zerkleinerungs- und Waschschrift mit einem Separator modelliert, in dem ein Frischwasserstrom entsprechen 30% des gesamten Zuckerhirsestroms zugeführt wird. Der Feststoff

wird dann vollständig in einem Strom mit 50% Trockensubstanzgehalt abgetrennt. Der Zuckersaft wird einem Fermentationsblock zugeführt. Die Fermentation wird mittels eines stöchiometrischen Reaktors simuliert, in welchem 90% des Zuckers zu Ethanol, 1,4% zu Zellmasse, 2,7% zu Glyzerin, und die restlichen Zucker zu Essigsäure umgewandelt werden (Dias et al., 2009). Die Temperatur wurde auf 34°C eingestellt, der pH Wert wird durch Zugabe von NaOH reguliert. Die Ethanolkonzentration nach der Fermentation beträgt 2,4%w. Der Produktstrom aus der Fermentation wird direkt dem Anreicherungsblock zugeführt, da im Gegensatz zu Variante 3 keine Feststoffe abgeschieden werden müssen.

Da die Ethanolkonzentration nur wenig von dem Wert in Variante 3 verschieden ist, wurde das dort verwendete Modell zur Ethanolanreicherung wiederverwertet, welches ähnliche Ergebnisse zum Energiebedarf lieferte. Da es sich wiederum um eine kleine Anlage handelt, sollte die weitere Anreicherung des Alkohols in einer Großanlage erfolgen, um deren Effizienz auszunutzen. Dementsprechend müssen in der LCA zusätzliche Transportkosten und Treibhausgasemissionen berücksichtigt werden.

Biogas wird in V4 aus dem Feststoff aus der Zuckerextraktion und aus bei der Destillation anfallender Schlempe erzeugt. Es konnte dasselbe Modell wie in Prozessvariante 3 verwendet werden. Der Gesamte Eingangsstrom des Bioreaktors beträgt 3480 kg/h, woraus ein Biogasstrom von 276 kg/h entsteht, welcher 73,8 kg/h Methan enthält (Tabelle 15).

Tabelle 16: Zusammensetzung des Biogases in Prozessvariante 4.

	Wasser	CO ₂	CH ₄	NH ₃	H ₂ S
Stoffmengenanteil	5,71%	45,89%	48,36%	0,00%	0,03%

Mit einer Dichte des Methans von 0,72 kg/m³ ergibt sich ein spezifischer Methanertrag von 243,2 L/kg TS. In Prozessvariante 4 wird demnach eine etwas größere Menge Biogas als in V3 erzeugt, was darauf zurückzuführen ist, dass die bei der Zuckerextraktion nicht extrahierten Zucker für die Biogasproduktion zur Verfügung stehen.

2.2.8 Ökologische Bewertung der kaskadischen Nutzung der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse

Die Treibhausgasemissionen und der Primärenergiebedarf werden für die zuvor beschriebenen Varianten mit dem Rohstoff Zuckerhirse bestimmt.

Die Varianten unterscheiden sich

- in der Zuckerhirsesorte (stärkehaltig, zuckerhaltig) und
- im Prozess zur Produktion von Bioethanol und Biomethan.

Dadurch ergeben sich für die Varianten verschiedene Mengen für die bereitgestellten Hauptprodukte (Bioethanol und Biomethan) und verschiedene Arten von Nebenprodukten (Futtermittel, Kohlendioxid, Dünger).

Tabelle 16 gibt einen Überblick über die untersuchten Varianten mit Zuckerhirse:

- Variante 2 - separate Nutzung von Korn und Stroh
- Variante 2a - separate Nutzung von Korn und Stroh (inkl. CO₂-Nutzung)
- Variante 3 - Ganzpflanzenfermentation
- Variante 4 - Zuckersaftfermentation

Die Variante 1 ist in Tabelle 16 nicht dargestellt. Unter der Variante 1 werden konventionelle Vergleichsprozesse mit klassischen Produktionswegen für Bioethanol und Biomethan (Abbildung 20) verstanden, für die im Rahmen des Projektes keine eigenen Lebenszyklusanalysen durchgeführt wurden.

Die vier untersuchten Varianten mit Zuckerhirse werden folgenden Referenzsystemen gegenübergestellt:

1. fossile Referenzsystem: Benzin und Erdgas
2. andere erneuerbare Referenzsysteme: Bioethanol aus Weizen, Bioethanol aus Mais, Biogas aus Mais

Für Referenzsysteme werden keine eigenen Berechnungen durchgeführt. Es wird auf bestehende Literaturdaten und Standardwerte aus der EU-Richtlinie zurückgegriffen.

Tabelle 17: Übersicht der Varianten mit Zuckerhirse als Rohstoffe

Systemvariante	Variante 2 <i>Separate Nutzung von Korn und Stroh</i>	Variante 2a <i>Separate Nutzung von Korn und Stroh (inkl. CO₂-Nutzung)</i>	Variante 3 <i>Ganzpflanzenfermentation</i>	Variante 4 <i>Zuckersafffermentation</i>
Zuckerhirsesorte	Chopper (stärkehaltig)	Chopper (stärkehaltig)	Sugargraze I (zuckerhaltig)	Sugargraze I (zuckerhaltig)
Vegitationsperiode	Ende Mai - Ende September 2011	Ende Mai - Ende September 2011	Ende Mai - Mitte September 2011	Ende Mai - Mitte September 2011
Zuckerhirsbeertrag	46 [t FM/(ha*a)]	46 [t FM/(ha*a)]	69 [t FM/(ha*a)]	69 [t FM/(ha*a)]
Anbaufläche¹⁾	200 [ha/a]	200 [ha/a]	200 [ha/a]	200 [ha/a]
Verarbeitung	Trennung von Korn & Stroh; Korn: konventioneller Bioethanolprozess in zentraler Anlage; Stroh: Biogasproduktion und Aufbereitung zu Biomethan	Trennung von Korn & Stroh; Korn: konventioneller Bioethanolprozess mit CO ₂ -Verflüssigung in zentraler Anlage; Stroh: Biogasproduktion und Aufbereitung zu Biomethan	Stabilisierung der Pflanze mittels Ameisensäure; Zerkleinerung und dezentraler Ganzpflanzenfermentation; Absolutierung in zentraler Anlage Nutzung von Reststoffen für Biogasprozess und Aufbereitung zu Biomethan	Stabilisierung der Pflanze mittels Ameisensäure; Zerkleinerung und Auspressen der Ganzpflanze; dezentrale Fermentation des Presssafts; Absolutierung in zentraler Anlage Nutzung von Reststoffen für Biogasprozess und Aufbereitung zu Biomethan
Hauptprodukte absolut / Energieanteil in % pro MJ Biotreibstoff	Bioethanol: 650 [t/a] / 64% Biomethan: 283.000 [Nm³/a] / 36%	Bioethanol: 650 [t/a] / 64% Biomethan: 283.000 [Nm³/a] / 36%	Bioethanol: 330 [t/a] / 25% Biomethan: 747.000 [Nm³/a] / 75%	Bioethanol: 320 [t/a] / 25% Biomethan: 734.000 [Nm³/a] / 75%
Nebenprodukte	DDGS ²⁾ : 940 [t/a] Gärrest als Dünger ³⁾ : 11.700 [t/a]	DDGS ²⁾ : 940 [t/a] Gärrest als Dünger ³⁾ : 11.700 [t/a] CO ₂ : 270 [t/a]	Gärrest als Dünger ³⁾ : 23.800 [t/a]	Gärrest als Dünger ³⁾ : 25.560 [t/a]

¹⁾ Ausgangsbasis für die Dimensionierung der Systemvarianten

²⁾ Dried Distillers Grains with Solubles - Futtermittel

³⁾ Kreislaufführung: Verwendung als Dünger für Zuckerhirse

2.2.8.1 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit ist die Bezugsgröße, auf die sich die gesamten betrachteten Umweltwirkungen z.B. Treibhausgasemissionen beziehen. In der EU-Richtlinie wird zur funktionellen Einheit Folgendes festgehalten:

„Die durch Kraftstoffe verursachten Treibhausgasemissionen (E) werden in g CO_{2eq}/MJ (Gramm CO₂-Äquivalent pro Megajoule Kraftstoff) angegeben (RL 2009/28/EG, Anhang V, 2).“

Die durch die Verwendung von Biokraftstoffen und anderen flüssigen Biobrennstoffen erzielten Einsparungen bei den Treibhausgasemissionen werden wie folgt berechnet (RL 2009/28/EG, Anhang V,4):

$$EINSPARUNGEN = (E_F - E_B) / E_F * 100.$$

Dabei sind:

E_B = Gesamtemissionen bei der Verwendung von Biokraftstoff in [g CO₂-Äq./MJ]

E_F = Gesamtemissionen des Komparators für Fossilbrennstoffe in [g CO₂-Äq./MJ]

2.2.8.2 Berücksichtigung von Nebenprodukten und zwei Hauptprodukten

In Abbildung 16 bis Abbildung 19 sind die Prozessschemata für die Varianten mit Zuckerhirse als Rohstoff im Vergleich zum Referenzsystem mit Benzin und Erdgas dargestellt.

Bei der Variante 2 werden das Stroh und die Körner der Zuckerhirse getrennt. Das Korn wird zu einer zentralen Bioethanolproduktion transportiert. Es wird zerkleinert und wie beim konventionellen Bioethanolprozess zu Ethanol fermentiert, wobei die Destillationsrückstände zum Nebenprodukt DDGS (Dried distillers grain solubles - Futtermittel) weiterverarbeitet werden.

Zur Berücksichtigung von Nebenprodukten bzw. Nebenerzeugnissen wird entsprechend der EU-Richtlinie die Methode der Energieallokation angewandt. D.h. die bis zu diesem Prozessschritt anfallenden Treibhausgasemissionen werden zwischen dem Kraftstoff oder dessen Zwischenerzeugnis und den Nebenerzeugnissen nach Maßgabe ihres Energiegehalts (der bei anderen Nebenerzeugnissen als Elektrizität durch den unteren Heizwert bestimmt wird) aufgeteilt.

Bei der Variante 2a wird zusätzlich CO₂ abgeschieden und verflüssigt. Hier sieht die EU-Richtlinie (RL 2009/28/EG) folgendes vor:

„Die Emissionseinsparung durch CO₂-Abscheidung und -ersetzung (e_{ccr}) wird begrenzt auf die Abscheidung von CO₂ vermiedenen Emissionen, wobei der Kohlenstoff aus Biomasse stammt und anstelle des auf fossile Brennstoffe zurückgehenden Kohlendioxids für gewerbliche Erzeugnisse und Dienstleistungen verwendet wird.“

Durch die Nutzung der Zuckerhirseganzpflanze werden in allen Varianten mit Biomethan und Bioethanol zwei Biokraftstoffe gemeinsam bereitgestellt. Um die Treibhausgasemissionen getrennt für Biomethan und Bioethanol auszuweisen, wird auch hier die Methode der Energieallokation angewandt. D.h. die Treibhausgasemissionen, die bis zur Produktion von Biomethan und Bioethanol anfallen (e_{ec} - Emissionen beim Anbau der Rohstoffe, e_p - Emissionen bei der Verarbeitung und Teile von e_{td} - Emissionen bei Transport und Vertrieb) werden nach dem Energieinhalt von Biomethan und Bioethanol aufgeteilt.

Zur Berechnung der Einsparung von Treibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen wird die entsprechende Mischung aus Biomethan und Bioethanol der gleichen Mischung aus Erdgas und Benzin gegenübergestellt, z.B.: g CO₂-Äq./((0,36 MJ Biomethan + 0,64 MJ Bioethanol) versus g CO₂-Äq./((0,36 MJ Erdgas + 0,64 MJ Benzin).

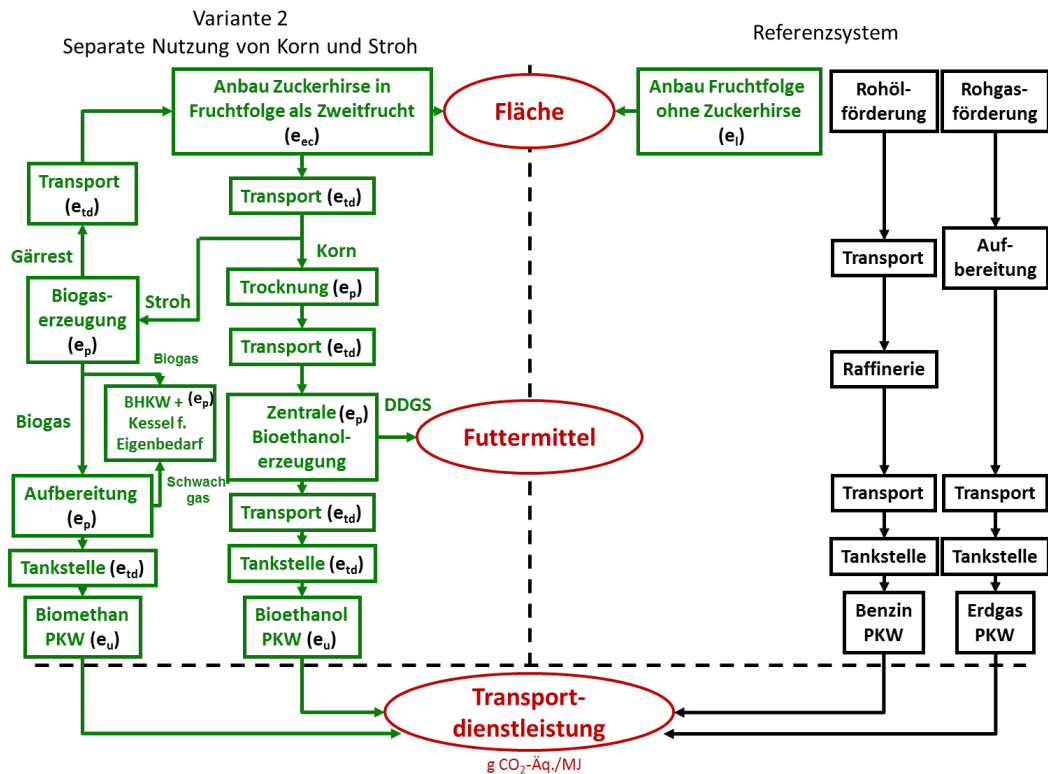


Abbildung 16: Prozessschema für „Variante 2 – Separate Nutzung von Korn und Stroh“ für Biomethan und Bioethanol im Vergleich zum fossilen Referenzsystem mit Benzin und Erdgas

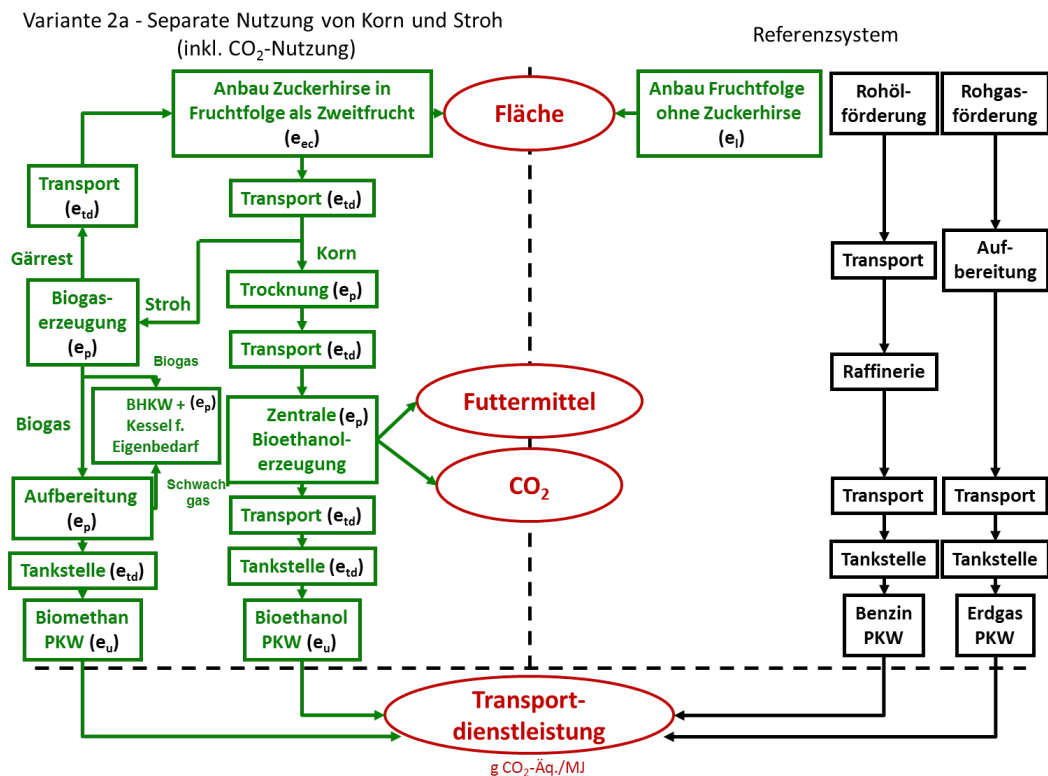


Abbildung 17: Prozessschema für „Variante 2a – Separate Nutzung von Korn und Stroh (inkl. CO_2 -Nutzung)“ für Biomethan und Bioethanol im Vergleich zum fossilen Referenzsystem mit Benzin und Erdgas

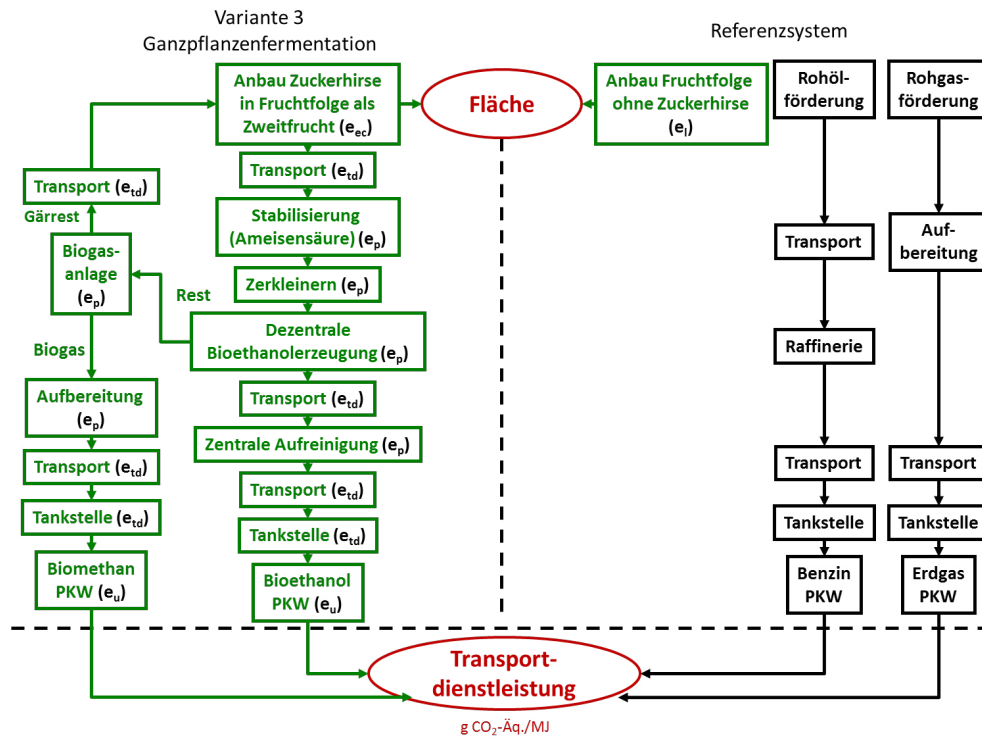


Abbildung 18: Prozessschema für „Variante 3 – Ganzpflanzenfermentation“ für Biomethan und Bioethanol im Vergleich zum fossilen Referenzsystem mit Benzin und Erdgas

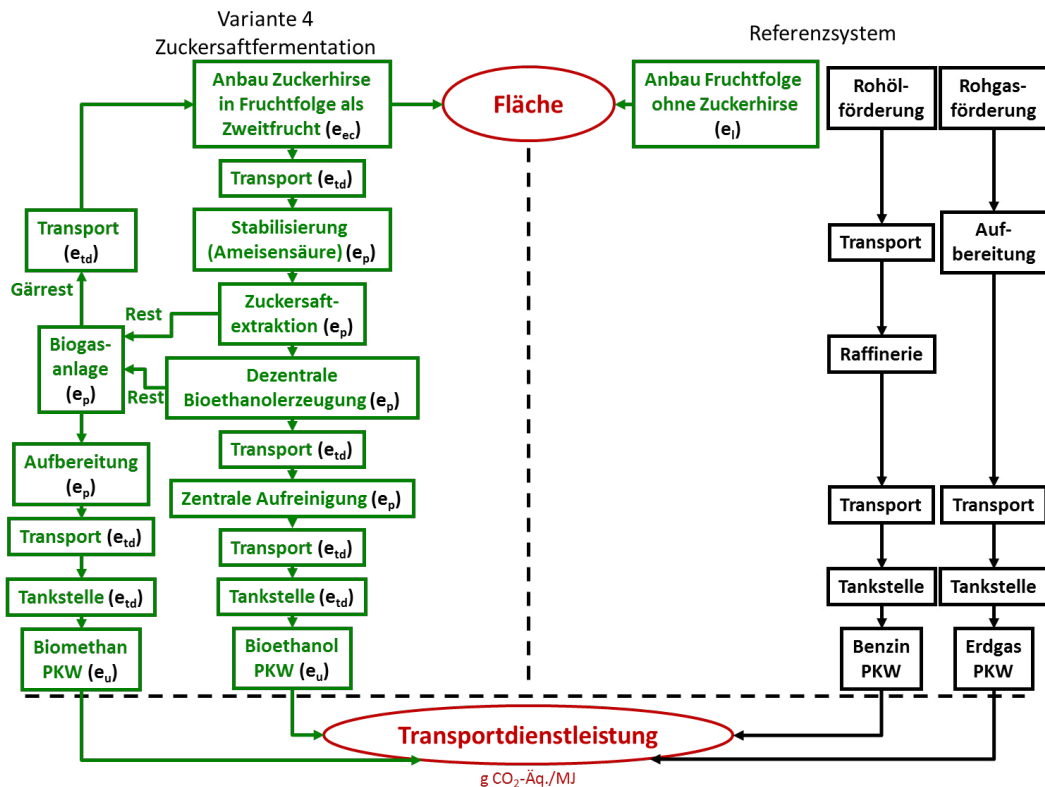


Abbildung 19: Prozessschema für „Variante 4 – Zuckersafffermentation“ für Biomethan und Bioethanol im Vergleich zum Referenzsystem mit Benzin und Erdgas

2.2.8.3 Untersuchte Umweltwirkungen

Für die ökologische Bewertung werden die Treibhausgasemissionen und der kumulierte Primärenergiebedarf untersucht.

Treibhausgasemissionen

Entsprechend den Vorgaben der EU-Richtlinie (RL 2009/28/EG) werden die Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffmonoxid/Lachgas (N₂O) berücksichtigt. Zur Berechnung des Treibhauspotentials werden lt. EU-Richtlinie folgende Äquivalenzfaktoren angewandt²:

- 1 kg CO₂ = 1 kg CO₂-Äq.
- 1 kg N₂O = 296 kg CO₂-Äq.
- 1 kg CH₄ = 23 kg CO₂-Äq.

Kumulierter Primärenergiebedarf

Der kumulierte Primärenergiebedarf umfasst alle Energieeinsätze, die mit der Bereitstellung der Kraftstoffe in den untersuchten Varianten verbunden sind. Der kumulierte Primärenergiebedarf wird differenziert ausgewiesen in

- erneuerbare (Sonne, Wind, Wasser, Biomasse)
- nicht erneuerbare (Rohöl, Steinkohle, Braunkohle, Erdgas) und
- sonstige Energieträger (Kernenergie, Abfall).

Für die Bestimmung des Primärenergiebedarfs, der nicht Teil der EU-Richtlinie (RL 2009/28/EG) ist, wird die Methodik der EU-Richtlinie zur Berechnung der Treibhausgasemissionen analog angewandt.

2.2.8.4 Grunddaten

Die Grunddaten für die Ermittlung von Treibhausgasemissionen und Primärenergiebedarf für die Varianten mit Zuckerhirse setzen sich aus

- projektspezifischen Daten,
- Daten aus LCA-Datenbanken und
- Literaturwerten

zusammen.

In der Folge werden die wichtigsten Grunddaten für den Anbau der Zuckerhirse und die Verarbeitung zu Bioethanol und Biomethan dargestellt.

² Die in der EU-Richtlinie angewandten Äquivalenzfaktoren unterscheiden sich von den durch das International Panel on Climate Change (IPCC, 2007) bestimmten Äquivalenzfaktoren für das Treibhausgaspotential für den Zeitraum von 100 Jahren (GWP 100 – Global Warming Potential 100). Äquivalenzfaktoren lt. IPCC: CO₂: 1, CH₄: 25 und N₂O: 298.

2.2.8.4.1 Anbau der Zuckerhirse

Die in Tabelle 17 dargestellten Daten für den Anbau der Zuckerhirse beziehen sich auf das Versuchsjahr 2011 und wurden im Rahmen des Projektes erhoben.

Tabelle 18: Grunddaten zum Anbau der Zuckerhirse für das Versuchsjahr 2011

Systemvariante	Sorten (Anbau als Zweitfrucht in einer Fruchtfolge)	Wasser- gehalt [%]	Ertrag [t _{FM} /(ha*a)]	Dieselvebrauch Kultivierung ¹⁾ [l/(ha*a)]	Biozide [kg/(ha*a)]	Saatgut [kg/(ha*a)]	Diesel- verbrauch Transport ²⁾ [l/(t _{FM} *km)]	Transport- distanz [km]
Variante 2 und 2a	Chopper	62%	46	75	1,2	10	0,09	6,4
Variante 3 und 4	Sugargraze I	75%	69	75	1,2	10	0,09	6,4

¹⁾ Verbrauchsdaten auf Basis von Richtwerten der ÖKL (ÖKL, 2013)

²⁾ Ermittelt auf Basis der benötigten Anbaufläche und dem Einzugsgebiet für die Biogasanlage

Die Düngung der Zuckerhirse erfolgt mit den Gärresten, die bei der Biomethanerzeugung anfallen. N₂O-Emissionen beim Anbau der Zuckerhirse wurden analog zu Umweltbundesamt (2010) nach IPCC (2006) in Abhängigkeit von der aufgetragenen Stickstoffmenge (N) berechnet. Es wurden nur die direkten N₂O-Emissionen (0,0125 kg N₂O-N/kg N) berücksichtigt.

Bei der Erstellung der Stickstoff-Bilanz für den Anbau der Zuckerhirse und die Düngung mit Gärresten aus der Biogasproduktion mit Zuckerhirsestroh bzw. Reststoffen der Bioethanolproduktion wurden folgende Punkte berücksichtigt:

- Variante 2 und 2a: Bei der Nutzung der Zuckerhirsekörner in einer zentralen Bioethanolanlage steht der Stickstoff in den Körnern für die Düngung der Zuckerhirse nicht mehr zur Verfügung.
- Bei der Biomethanproduktion wurden keine Stickstoffverluste berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Stickstoffmenge in den Gärresten der Stickstoffmenge, die durch das Zuckerhirsestroh und die Reststoffe der Bioethanolproduktion eingebracht wurden, entspricht.
- Zur Bestimmung des feldfallenden Stickstoffs wurden neben den oben beschriebenen Stickstoffverlusten in Form von N₂O auch Stickstoffverluste in Form von Ammoniakemissionen (NH₃) berücksichtigt. Die NH₃-Emissionen wurden mit 28,6% - 34,1% (Durchschnitt: 31,4%) des TAN angenommen (Pucker et al. 2010 basierend auf Amon et al. 2006, Clemens et al. 2006, Edelmann et al. 2001, Sommer and Hutschings 2001, Wulf et al. 2002). Für die Aufbringung mittels Schlepplauch wurde ein Reduktionsfaktor in der Höhe von 0,6 im Vergleich zur Ausbringung mittel Prallteller berücksichtigt (Döhler 2001, Edelmann et al. 2001, Sommer und Hutschings 2001, UNECE 1999, Wulf 2005).
- Weiters wurde nach Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz (2007) eine Jahreswirksamkeit der Gärreste von 70% bis 85% (Durchschnitt 80%) berücksichtigt.

Auf Grund der beschriebenen Stickstoffverluste werden in den Berechnungen die in Tabelle 13 dargestellten mineralischen Stickstoffdüngermengen berücksichtigt. Die Nährstoffe Phosphor, Kalium und Calcium werden zu 100% mit den Gärresten gedeckt.

Tabelle 19: Mineralischer Stickstoffbedarf

Systemvariante	Stickstoffinput Biogasanlage [kg/(ha*a)]	Mineralischer Dünger		
		Min [kg/(ha*a)]	Durchschnitt [kg/(ha*a)]	Max [kg/(ha*a)]
Variante 2 und 2a	40 ¹⁾	81,8	82,0	82,2
Variante 3 und 4	113 ²⁾	24,7	30,5	41,4

¹⁾ Zuckerhirsestroh

²⁾ Zuckerhirsegranzpflanze

Die Methan-Emissionen bei der Ausbringung wurden mit einem Methan-Emissionsfaktor von 3,26 ($\pm 2,77$) g/t berechnet (Pucker et al. 2010 basierend auf Amon et al. 2006, Clemens et al. 2006).

Nach Umweltbundesamt (2010) werden Emissionen aufgrund von Kohlenstoffbestandsänderungen infolge von Landnutzungsänderungen (e_l) für Österreich nicht berücksichtigt und mit Null angenommen. Akkumulation von Kohlenstoff im Boden infolge besserer landwirtschaftlicher Bewirtschaftungspraktiken (e_{sca}) wird wegen fehlender Grunddaten für Zuckerhirse als Zweitfrucht im Rahmen einer Fruchtfolge nicht berücksichtigt.

2.2.8.5 Verarbeitung zu Bioethanol und Biomethan

Für die Verarbeitung der Zuckerhirse zu Bioethanol und Biomethan wurden verfahrenstechnische Untersuchungen und Prozesssimulation durchgeführt (siehe Abschnitt 2.2.7). Ein Ergebnis dieser Arbeiten waren Massen- und Energiebilanzen, auf die die ökologische Bewertung aufbaut.

Sowohl für die Verarbeitung der Zuckerhirse zu Bioethanol als auch zu Biogas bzw. Biomethan wird elektrische und thermische Hilfsenergie benötigt.

Bei der Bereitstellung der elektrischen und thermischen Hilfsenergie erfolgt in den untersuchten Varianten wie folgt:

- Variante 2 und Variante 2a:

Bei diesen Varianten wird aus den Zuckerhirsekörnern das Bioethanol in einer zentralen Anlage produziert. Die dafür benötigte thermische Hilfsenergie wird mit einem Erdgaskessel (Tabelle 14) bereitgestellt. Die elektrische Hilfsenergie wird aus dem Stromnetz bezogen. Für die Stromerzeugung wurde der österreichische Strommix angenommen (Tabelle 15).

Aus dem Zuckerhirsestroh wird in einer Biogasanlage Biomethan gewonnen. Auch die Rohstoffaufbereitung erfolgt am Standort der Biogasanlage. Die am Standort der Biogasanlage benötigte thermische und elektrische Hilfsenergie wird mit einem BHKW in Kombination mit einem Schwachgasbrenner bereitgestellt. Dafür wird ein Teil des produzierten Biogases eingesetzt.

- Variante 3 und Variante 4:

Hier erfolgt die Bioethanolerzeugung am selben Standort wie die Biogas/Biomethanherzeugung. Abwärme aus dem Bioethanolerzeugungsprozess kann zur Wärmeversorgung der Biogasanlage genutzt

werden. Zur Bioethanolerzeugung wird thermische Hilfsenergie auf einem Temperaturniveau von ca. 140°C benötigt. Da dieses Temperaturniveau nicht mit einem BHKW bereitgestellt werden kann, wird für die Wärmeversorgung ein Erdgaskessel eingesetzt und die gesamte elektrische Hilfsenergie aus dem Stromnetz bezogen.

Bei keiner der Varianten fällt überschüssige Elektrizität aus Kraft-Wärme-Kopplung an, d.h. die Emissionseinsparung durch überschüssige Elektrizität aus Kraft-Wärme-Kopplung (e_{ee}) ist null. Auch die Emissionseinsparung durch Abscheidung und geologische Speicherung von Kohlendioxid (e_{ccs}) ist null, da keine geologische Speicherung von Kohlendioxid in den betrachteten Varianten durchgeführt wird.

Tabelle 20: Nutzungsgrad und Emissionswerte von Gaskessel, BHKW und Schwachgasbrenner (GEMIS 4.8 und Gemis-Datensatz Österreich, IINIAS 2013 und Umweltbundesamt 2009)

Technologie	Nutzungsgrad [%]	CH ₄ [mg/Nm ³ Abgas]	N ₂ O [mg/Nm ³ Abgas]
Gaskessel	85%	9	3,6
BHKW	Elektrisch: 31% Thermisch: 52% ²⁾	580 ¹⁾	5
Schwachgasbrenner	80% ²⁾	4	1

¹⁾ Berechnet mit Methanschlupf von 1%

²⁾ Produktbeschreibung MAN

³⁾ Produktbeschreibung eflox

Tabelle 21: Zusammensetzung Österreichischer Strommix 2007, davon 69% Stromaufbringung Österreich und 31% Stromimport (Beermann et al., 2010)

Anteile Stromerzeugung für Stromverbrauch in Österreich	
Österreich-Mix	69,20%
ENTSOE-Mix	30,80%
Wasserkraft	45,40%
Kohle	16,50%
Erdgas	15,60%
Kernenergie	9,00%
Müllverbrennung	0,60%
Biogene Brennstoffe	5,40%
Erdöl	4,10%
Wind	3,40%

2.2.9 Darstellung der Zukunftssicherheit der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse unter dem Aspekt des Klimawandels

Da Zuckerhirse in Österreich nicht heimisch ist, sondern aus subtropischen Regionen stammt, ist es notwendig zu wissen, ob hinreichende klimatische Bedingungen für einen erfolgreichen Anbau in Österreich gegeben sind. Um mögliche Anbauggebiete für Zuckerhirse auszuweisen wurden aus der Literatur klimatische Mindestanforderungen abgeleitet und deren räumliche Verteilung analysiert. Es wurde gemäß der Anbauversuche von einem Anbautermin im Juni und einem Erntetermin im Oktober ausgegangen. Die Kriterien sind in Tabelle 16 aufgelistet.

Tabelle 22: klimatische Mindestanforderungen von Zuckerhirse

Kriterium	Zeitraum	Anmerkung
$T_{\text{Boden}} > 12^{\circ}\text{C}$	Juni	Bodentiefe 10 cm, die Keimtemperatur beträgt mind. 12°C (EURALIS Saaten, 2013)
Summe der Gradtage $> 2500^{\circ}\text{C}$	Juni - Oktober	Summe aller Tagesmitteltemperaturen $> 0^{\circ}\text{C}$, entspricht einer mittleren Temperatur von $\sim 16^{\circ}\text{C}$, (FNR, 2007)
$T_{\text{min}} > 4^{\circ}\text{C}$	Juni - September	Zuckerhirse ist kälteempfindlich, niedrige Temperaturen sind nach Ausbildung der Körner kein Problem mehr
monatl. Niederschlag ≥ 50 mm	Juni, Juli	erforderlicher Niederschlag bis zur Ausbildung tiefreichenden Wurzeln
> 5 Tage/Monat mit Niederschlag ≥ 1 mm	Juni, Juli	Niederschlag sollte verteilt fallen
Gesamtniederschlag ≥ 200 mm	Juni - Oktober	erforderlicher Niederschlag in der gesamten Wachstumsperiode, (Farre, 2006)

Die Analyse des gegenwärtigen Anbaupotentials wurde mittels des Datensatzes INCA durchgeführt. Das zukünftige Anbaupotential wurde mittels 3 verschiedener regionaler Klimamodelle (RCMs) (Aladin, REMO, RegCM3) berechnet. Die räumliche Auflösung liegt jeweils bei 1 km x 1 km. INCA liegt für den Zeitraum von 2003 – 2012 vor, die Klimaszenarien von 1951 bis 2100. Um systematische Fehler bei den RCMs zu minimieren, wurden diese mittels Quantilemapping fehlerkorrigiert. Um die relativ grobe räumliche Auflösung der RCMs zu erhöhen, wurde eine Lokalisierung mittels INCA Daten durchgeführt. Da keine flächigen Informationen zur Bodentemperatur vorliegen, wurde eine Regressionsbeziehung zwischen minimaler Bodentemperatur und mittlerer Lufttemperatur auf Tagesbasis hergestellt und so die minimale Bodentemperatur geschätzt.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

3.1 Ergebnis Vergleich Ertragspotenzial Hauptfrucht und Nebenfrucht mit Überprüfung auf Eignung zur Bioethanolrohstoffproduktion

Die Daten aus dem Anbauversuch zeigen, dass Zuckerhirse hinsichtlich der für die Ethanolherstellung relevanten Erträge durchaus mit Mais vergleichbar ist. Als aussichtsreicher haben sich Zuckerhirsevarianten herausgestellt, welche Körner bzw. Stärke produzieren. Trotz einer kürzeren Vegetationsperiode konnten im Jahr 2011 höhere Stärkeerträge pro Hektar als bei Mais erzielt werden.

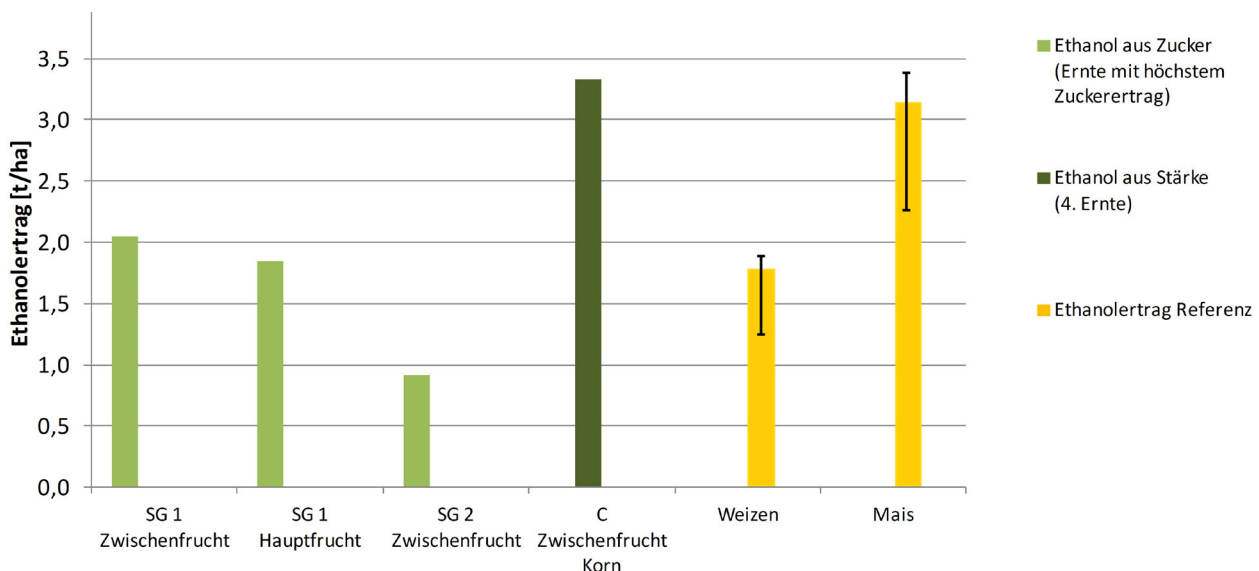


Abbildung 20: Ethanolertrag von Zuckerhirse und den Referenzrohstoffen Weizen und Mais.

Aus den Anbauversuchen sowie den Ethanolertragsergebnissen ist klar ersichtlich (Abbildung 28), dass die Zuckerhirsesorten, welche im Jahr 2011 auf den Versuchsflächen angepflanzt wurden, durchaus Potenzial haben, in der Ethanolproduktion Weizen und Mais Konkurrenz zu machen.

3.2 Ergebnis Ertragsoptimierung durch angepasste Anbau-, Logistik- und Lagerungsverfahren

Die Ergebnisse aus dem ersten Versuchsjahr zeigen, dass die kombinierte Produktion von Bioethanol und Biogas aus der Kulturpflanze Zuckerhirse eine interessante Alternative zu Mais als Ausgangsmaterial ist. Es wurden sowohl Varianten, die freie Zucker bilden, als auch Varianten, die Stärke bilden untersucht, wobei die stärkeproduzierenden Zuckerhirsehybriden das größere Ertragspotential aufweisen. Der Anbauzeitpunkt der Zuckerhirsevarianten im ersten Versuchsjahr lag nur etwa 2-3 Wochen nach dem üblichen Anbautermin einer Hauptfrucht, daher konnte aus diesen Versuchen noch keine Eignung als Zwischen-/Zweitfrucht abgeleitet werden. Die Versuche aus dem

zweiten und dritten Versuchsjahr wurden daher hinsichtlich des Anbautermins angepasst. Im zweiten Jahr fand der Anbau Mitte Juni statt, im dritten Jahr wurden 2 Anbautermine Ende Juni bzw. Anfang Juli gewählt.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit späterem Anbautermin die Biomasse, sowie die für die Ethanolherzeugung wesentlichen Zucker- und Stärkeerträge, erheblich abnehmen. Speziell im dritten Versuchsjahr konnte beobachtet werden, dass eine Kombination aus unzureichender Jugendentwicklung und Trockenheit zu erheblichen Ertragseinbußen führt. Damit Zuckerhirse seinen Vorteil hinsichtlich der Trockenheitsresistenz wirklich nutzen kann, ist es notwendig, dass das Wurzelsystem bereits weitgehend ausgebildet ist. Ist dies aufgrund eines späten Anbautermins nicht der Fall, so treten dieselben Probleme wie bei der Kultivierung von z.B. Mais auf.

Hinsichtlich der Ernte- und Transportprozesse können etablierte Verfahren verwendet werden. Bei den zuckerbildenden Zuckerhirsevarianten sind dies Feldhäcksler zusammen mit Abschiebewägen bzw. Kipper. Bei den Zuckerhirsevarianten, die Körner bilden, können Mähdrescher mit Kippen eingesetzt werden. Für die Ernte des anfallenden Stroh gibt es noch keine am Markt etablierten Verfahren, jedoch kann angenommen werden, dass Maschinen, welche zur Ernte von Maisstroh entwickelt werden, auch für die Ernte von Zuckerhirsestroh geeignet sind. Die Konservierung von zuckerhaltiger Biomasse gestaltet sich schwierig, da ab dem Zeitpunkt der Ernte mikrobiologische Prozesse beginnen, welche die Zucker in organische Säuren und andere Produkte umwandeln. Die Zugabe von Ameisensäure gleich nach der Ernte stellt eine Möglichkeit dar, die Zucker zu konservieren. In den durchgeführten Versuchen musste jedoch eine relativ große Menge Ameisensäure (1% bezogen auf die Frischmasse) zugesetzt werden um eine Zuckerkonservierung zu bewerkstelligen. Die Lagerung der Körner von stärkebildenden Zuckerhirsevarianten ist hingegen relativ einfach zu bewerkstelligen, da hier wiederum etablierte Technologien (speziell Verfahren zur Körnertrocknung) verwendet werden können.

3.3 Ergebnisse des Monitorings

Im Verlauf des Monitorings wurden insgesamt sieben stapelbare Einsatzstoffe sowie Gülle eingesetzt.

Tabelle 23: während des Monitorings eingesetzte Stoffe und deren Trockenmasse bzw. organische Trockenmassegehalt

Einsatzstoff	TM	SD TM	oTM	Anmerkungen
	[%FM]	[%FM]	[%TM]	
Gras (Silage)	41,6	11,5	90,0	TM Anlieferung / oTM Literatur
Hirse (Silage)	24,0	-	94,6	Analysiert
Rübenhausgrün (frisch)	16,5	-	88,6	Analysiert
GSR (Silage)	41,2	3,5	95,0	TM Anlieferung / oTM Literatur
Luzerne (Silage)	40,2	10,9	90,0	TM Anlieferung / oTM alte Analyse
Maisstroh (Silage)	50,0	-	91,7	Analysiert
Pferdemist	45,2	-	71,8	Analysiert
Gülle	5	-	80,0	Literatur

TM: Trockenmasse; SD: Standardabweichung

Die Höhe der Standardabweichung deutet auf große Unterschiede hinsichtlich der Qualität der angelieferten Biomassetypen hin. Diese hängt z.B. von Anbau- und Erntezeitpunkt und Bodenqualität ab.

Mengenanteile der verwendeten Einbringstoffe während des Monitorings [in % der TM]

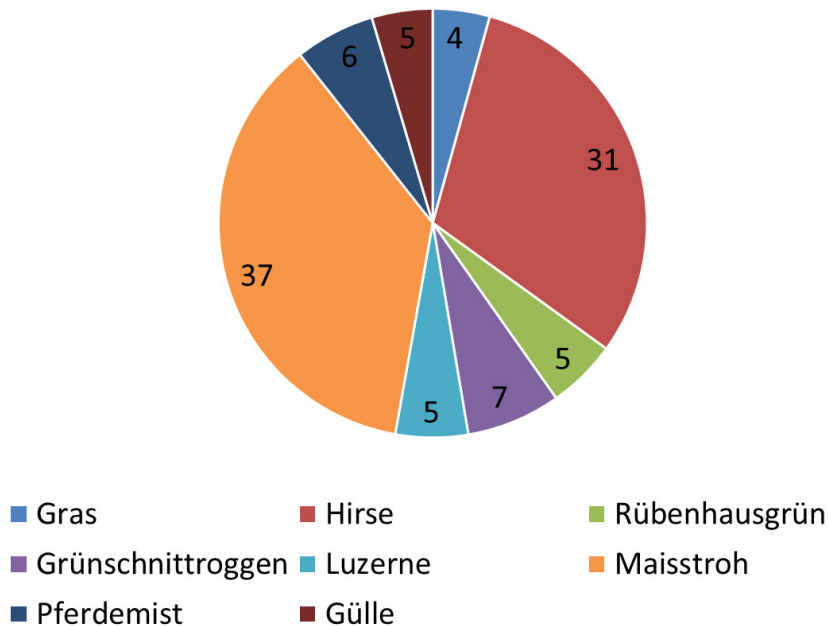


Abbildung 21: Anteile der eingesetzten Einsatzstoffe während der Monitoringphase

a keine Information hinsichtlich der jeweiligen Menge, aus der die Proben gezogen wurden, verfügbar ist, wurde für die weitere Berechnung eine gleichmäßige Verteilung angenommen. Aus diesen Informationen sowie aus der Kenntnis der gefütterten Mengen an Frischmasse ergibt sich die Verteilung der gefütterten Menge an Trockenmasse während des Monitorings (Abbildung 21 und Abbildung 22).

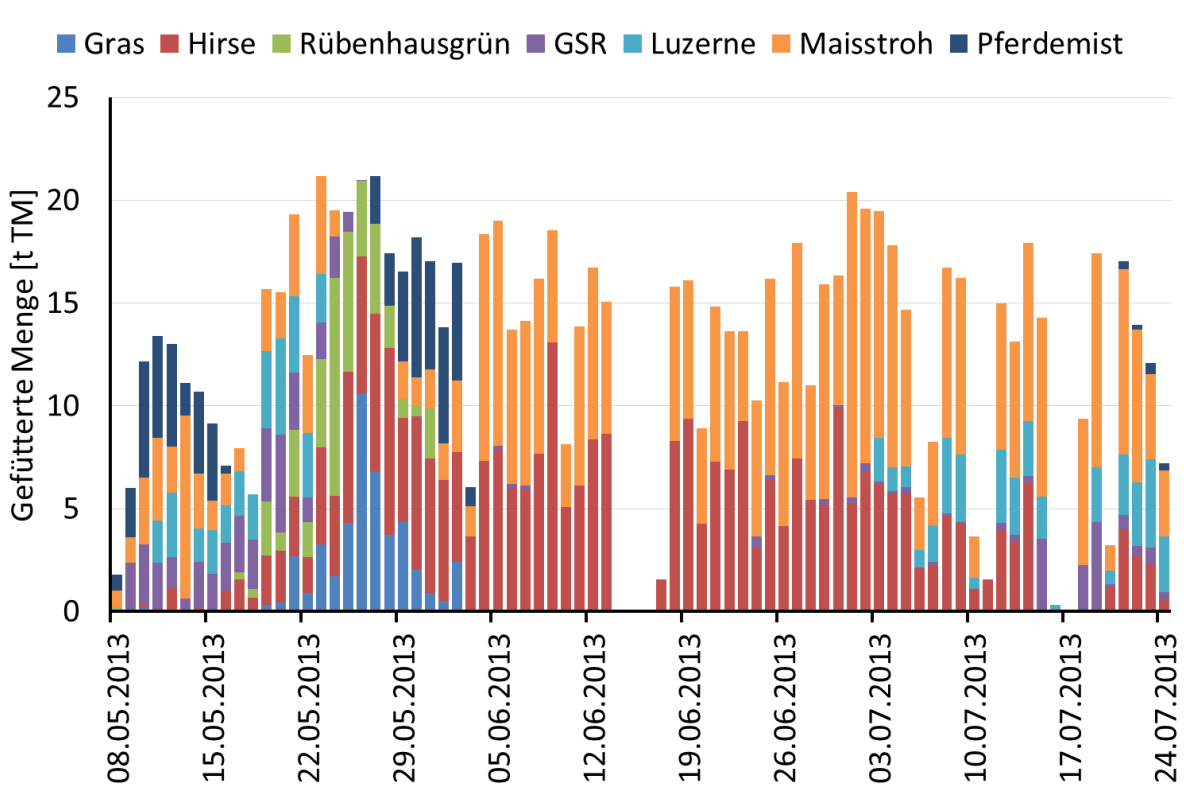


Abbildung 22: Verteilung der Einsatzstoffe über den Monitoringzeitraum

Die Lücke vom 14.06.2013 bis zum 16.06.2013 ist auf einen technischen Defekt zurückzuführen. Aus der Abbildung 13 ist ersichtlich, dass das Fütterungsmanagement während des Monitorings sehr unregelmäßig ausfiel. Neben den unterschiedlichen Biomassetypen wurden vor allem unterschiedliche Mengen in die Fermenter eingebracht. Dies hatte zum Teil seinen Grund in Störungen bei der Biomasseaufbereitung (Biokonverter) bzw. die Inbetriebnahme des zweiten Hauptfermenters. Aufgrund dieser Unregelmäßigkeiten kam es auch zu größeren Unterschieden bei der Raumbelastung (Abbildung 23). Die mittlere Raumbelastung betrug $4,3 \text{ kg oTM m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ wobei die Standardabweichung mit $1,8 \text{ kg oTM m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ausgesprochen hoch ist. Die höchste während des Monitorings ermittelte Raumbelastung lag bei 10,9, die niedrigste bei $0,1 \text{ kg oTM m}^{-3} \text{ d}^{-1}$.

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

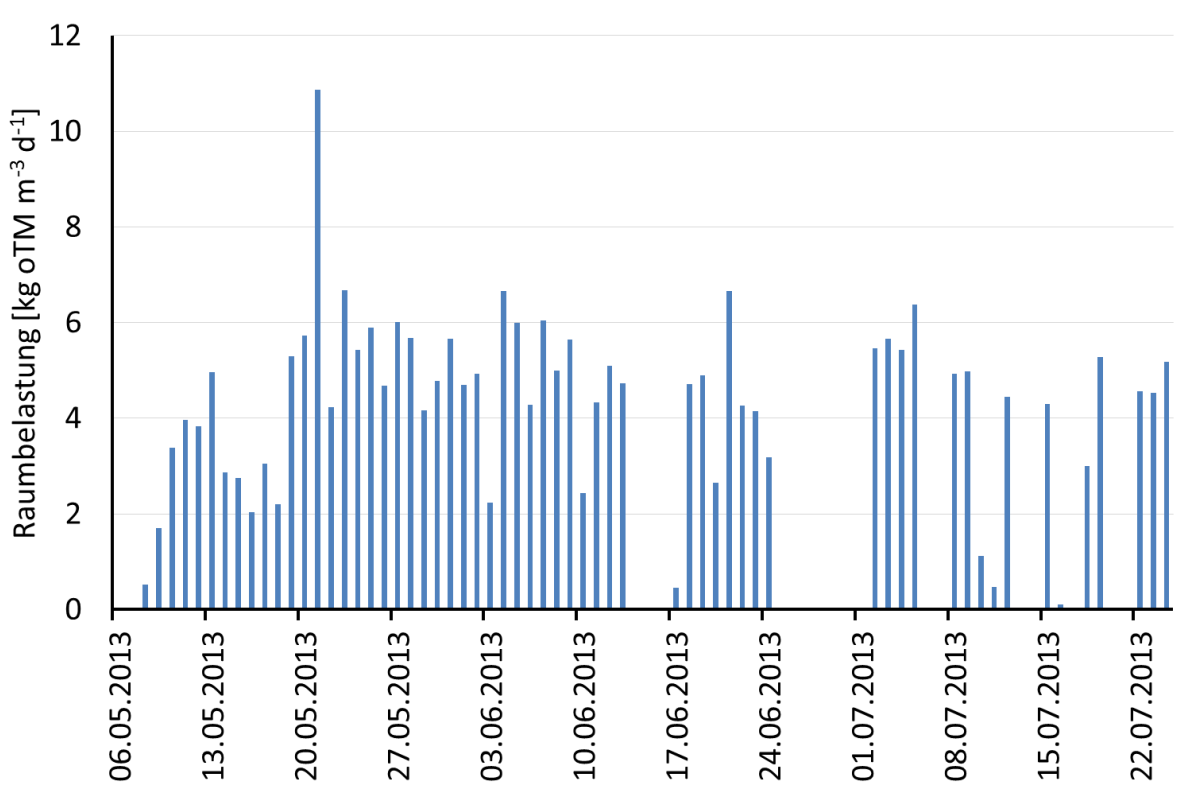


Abbildung 23: Raumbelastung in den Hauptfermentern (kombiniert) während des Monitorings der BGA

Der über den Monitoringzeitraum gemittelte Methangehalt betrug 52,1% bei einer Standardabweichung von 1,7%. Die höchste gemessene Konzentration betrug 55,1%, die niedrigste 47,5%. Die Lücken am 06. und 07.07.2013 sowie am 13. und 14.07.2013 ergeben sich aus einem Defekt der Gasqualitätsmessung.

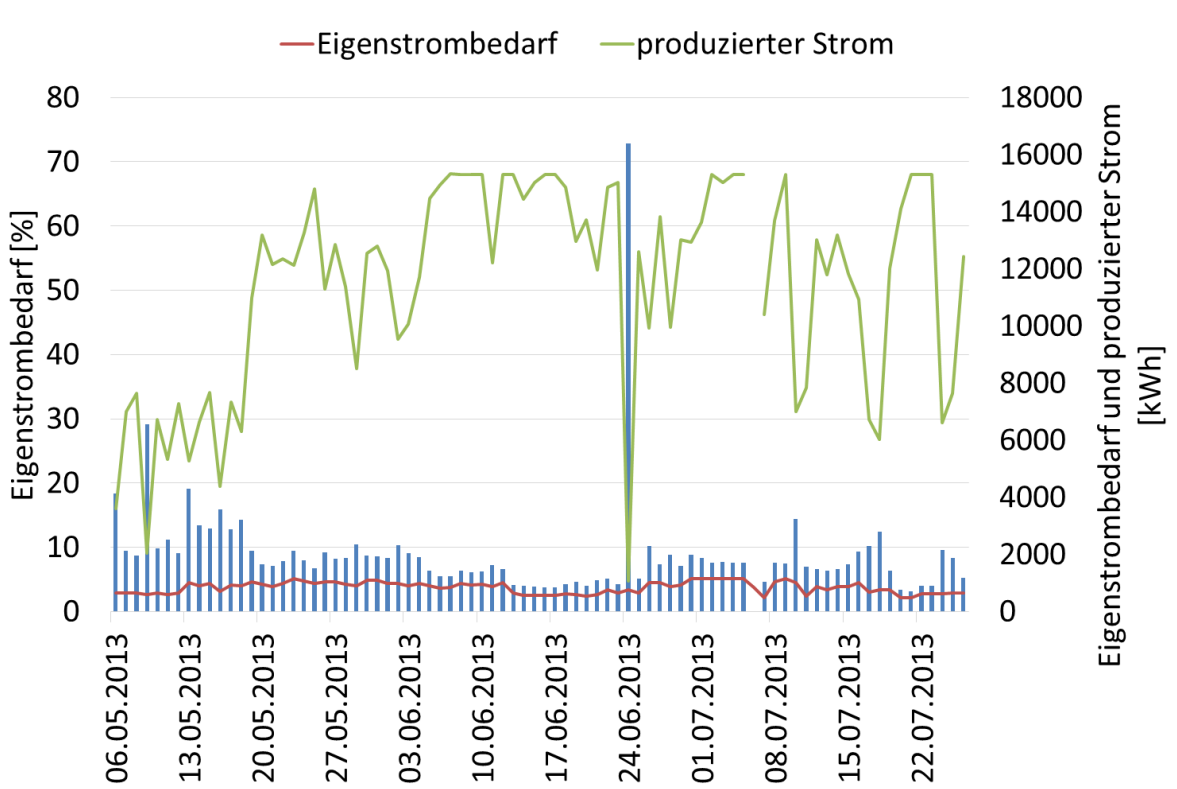


Abbildung 24: produzierter Strom, verbrauchter Strom und daraus abgeleiteter Eigenstrombedarf der BGA im Verlauf des Monitorings

In der Abbildung 25 ist der Stromverbrauch der untersuchten Aggregate dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Biomassevorbehandlung einen relativ großen Bedarf an elektrischer Energie hat. Dieser Verbrauch kann jedoch nicht als repräsentativ angesehen werden, da das an der Anlage verbaute Aggregat zur Biomasseaufbereitung ein Prototyp war, an dem noch keine Optimierung hinsichtlich des Energieeinsatzes bzw. der Materialqualität des Outputs stattgefunden hat (der Biokonverter wurde Ende 2013 gegen ein Nachfolgemodell mit geringerem Strombedarf ausgetauscht). Es ist daher davon auszugehen, dass dieser Anteil am Eigenstrombedarf in der Praxis niedriger ausfallen würde. Aus der Abbildung ist außerdem ersichtlich, dass die Biomasseaufbereitung während der Monitoringphase nicht durchgehend in Betrieb war. Dies kann zum einen auf das Versuchsstadium der Anlage zurückgeführt werden und zum anderen auch auf die Abstimmung der Biomasse, welche gefüttert wird und der Notwendigkeit diese aufzubereiten abgeleitet werden. Während bei Pferdemist oder bei Maisstroh eine Vorbehandlung zwingend erforderlich ist, ist beim Einsatz von z.B. Rübenhausgrün kein Aufschluss notwendig.

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

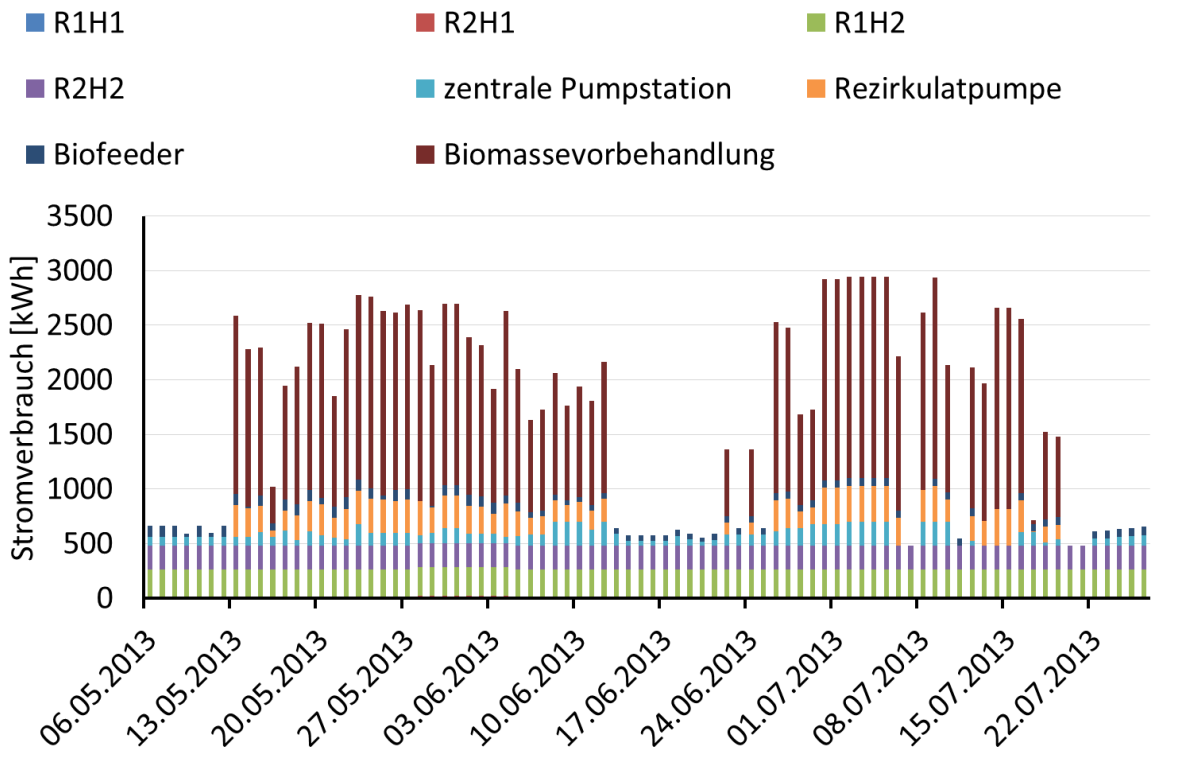


Abbildung 25: absoluter Stromverbrauch während des Monitoring aufgeteilt auf die einzelnen Aggregate

In Abbildung 26 sind sowohl die Temperatur, als auch der Füllstand des untersuchten Fermenters abgebildet. Temperaturschwankungen sind auf Änderungen der Umgebungstemperatur bzw. geänderte mikrobiologische Aktivität zurückzuführen, da während der Monitoringphase keine aktive Temperierung des Fermenterinhalt vorgenommen wurde. Änderungen im Füllstand sind durch variierende Fütterung sowie Überführung von Fermenterinhalt vom Haupt- in den Nachfermenter erklärbar.

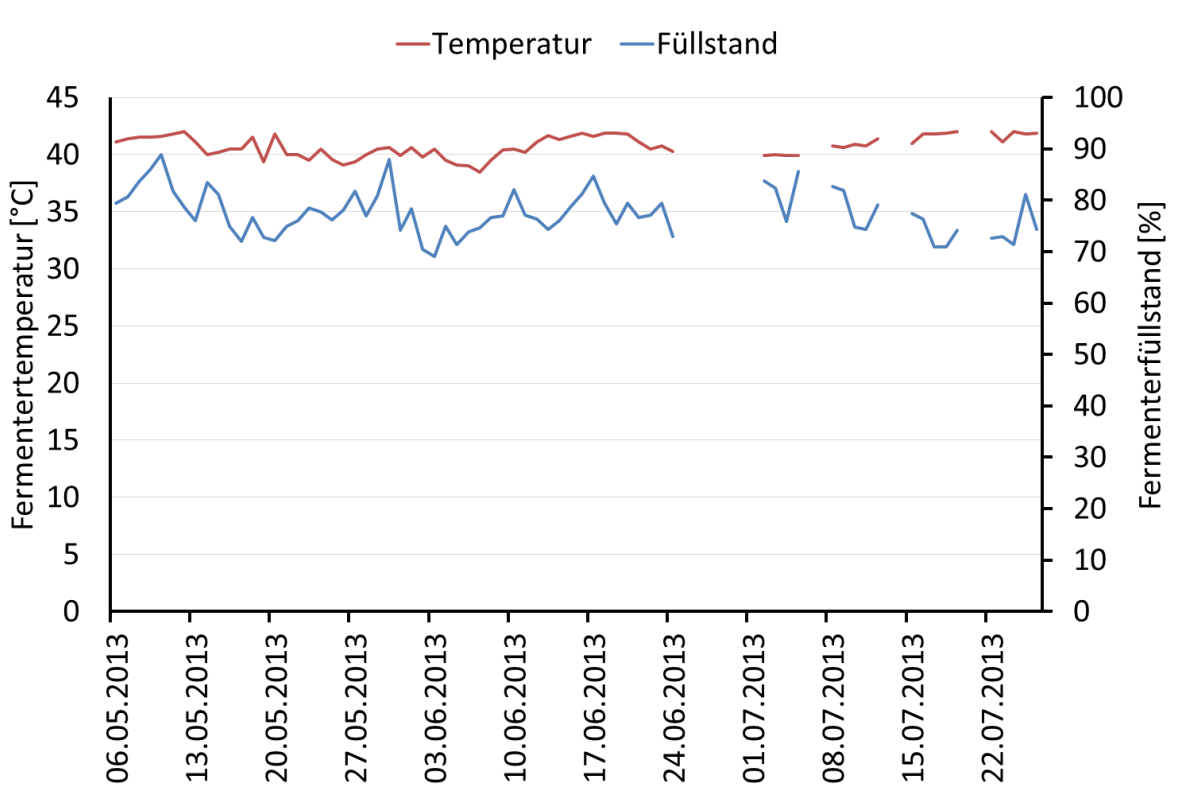


Abbildung 26: Temperatur und Füllstände der Hauptfermenter im Verlauf des BGA Monitorings

In Abbildung 27 und Abbildung 28 sind die Absolutwerte für die flüchtigen organischen Säuren (FOS) als auch jene für die Pufferfähigkeit (TAC) bzw. deren Verhältnis zueinander dargestellt. In beiden Hauptfermentern nimmt das FOS/TAC Verhältnis zu. Aus dem Anstieg des FOS/TAC Verhältnisses kann geschlossen werden, dass die biologische Aktivität zu Beginn des Monitorings relativ gering war; der Fermenter war also nicht voll ausgelastet. Durch die Erhöhung der gefütterten Menge bzw. durch eine bessere Verfügbarkeit der Biomasse aufgrund des vorhergehenden Aufschlusses, kommt es zunächst zu einem Anstieg der flüchtigen organischen Säuren. Gleichzeitig wird der Einsatz von Pferdemist erhöht, was wiederum die Menge an Puffersubstanzen im Fermenter erhöht. Eine genaue Aussage hinsichtlich der Prozessstabilität der verwendeten Biomasse Mischung kann erst nach einem längeren Monitoring (mindestens drei Verweilzeiten) getätigt werden. Jedoch deuten die gewonnenen Daten darauf hin, dass das System, aus biologischer Hinsicht, noch ungenutzte Kapazitäten birgt, welche bei einer Erhöhung der Raumbelastung genutzt werden könnten.

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

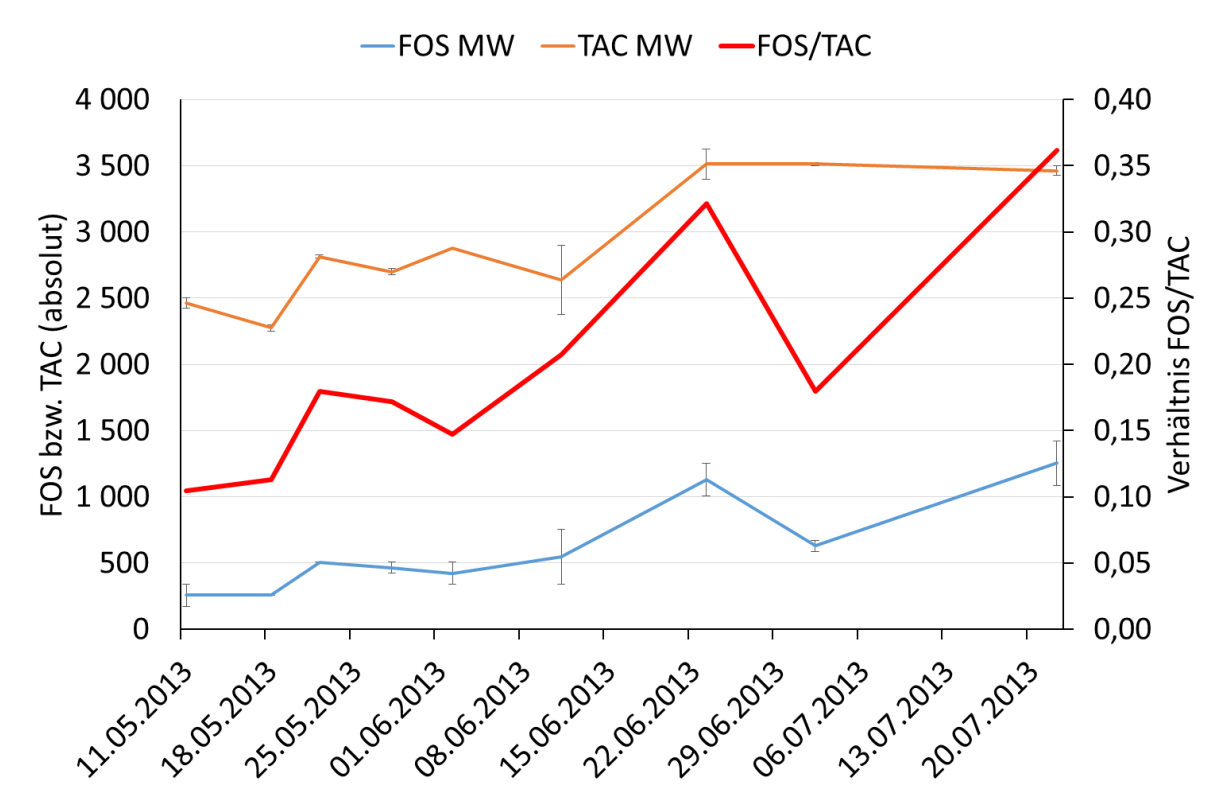


Abbildung 27: FOS und TAC Werte bzw. deren Verhältnis zueinander im ersten Hauptfermenter

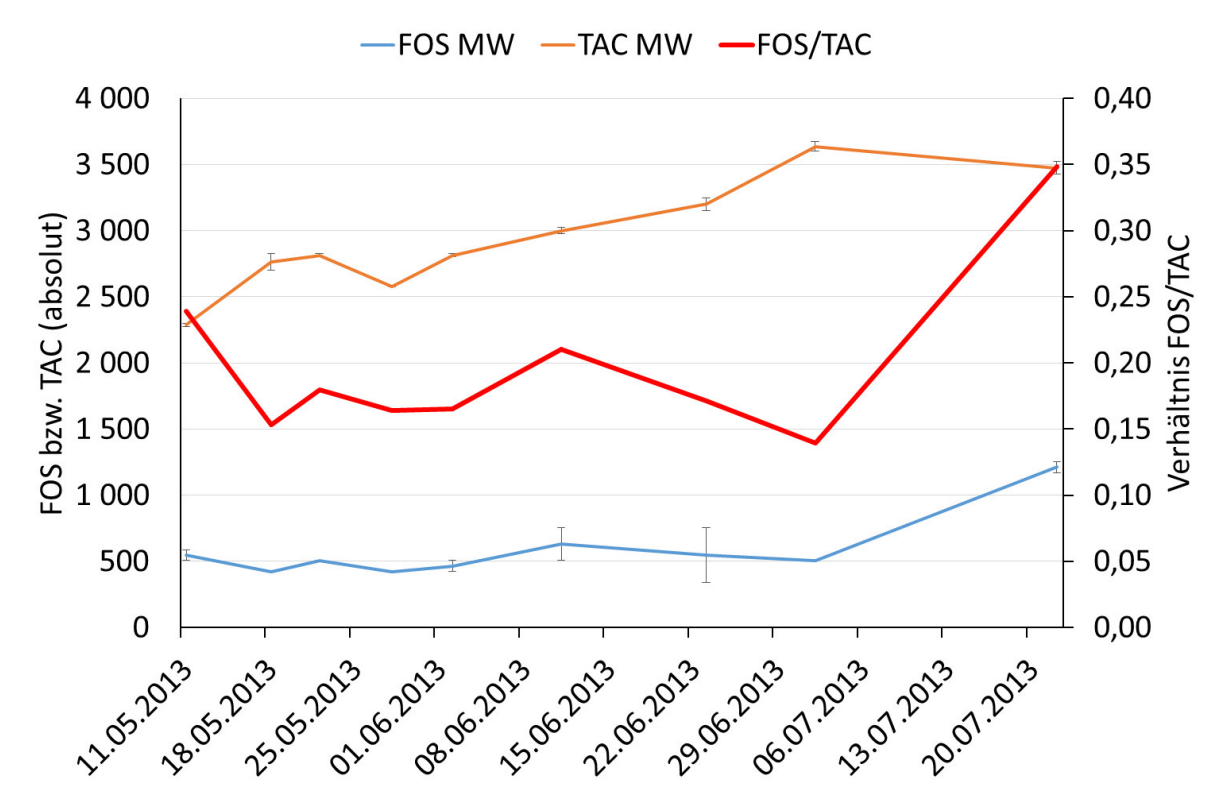


Abbildung 28: FOS und TAC Werte bzw. deren Verhältnis zueinander im zweiten Hauptfermenter

Die Massenbilanz für die Anlage wurde auf Basis der erfassten Daten für die Substrateinbringung, die abgegebene Methanmenge an der Tankstelle, sowie die Gasvolumenstrommessung vor dem BHKW. Da keine Messstelle nach dem BHKW vorhanden war, wurde für die Massenbilanz auf die Betrachtung des BHKW verzichtet.

Um die Massenbilanz zu schließen, ist daher nur noch die Gärrestmenge, welche nicht in die Fermenter zurückgeführt wird von Nöten. Die ausgetragene Menge an festem und flüssigem Gärrest sollte ursprünglich über Separatorbetrieb und Rezirkulatmenge bestimmt werden. Da der Separator während des Monitorings nicht in Betrieb war, musste auf die getrennte Bestimmung des festen und flüssigen Gärrestaustages verzichtet werden. Da dadurch auch kein Rückschluss auf die Gärrestmenge möglich war, musste der Gärrest auf alternativem Weg bestimmt werden. Dies wurde bewerkstelligt, indem unter Verwendung der experimentell bestimmten Gasausbeuten der einzelnen Substrate der Verbrauch an organischer Trockensubstanz ermittelt wurde.

Die gefütterten Mengen Frischmasse, die an der Tankstelle abgegebenen Gasmengen, sowie die gemessenen Biogasströme wurden über den Monitoringzeitraum gemittelt, und für die Massenbilanz als konstant betrachtet. Für den Gasstrom zum BHKW wurde eine Temperatur von 30°C angenommen. Bei der Schätzung des Gärrestaustages wurde angenommen, dass kein Wasser zur Bildung des Biogases verbraucht wurde. Der Wassergehalt des Biogases wird dem Gärrest hinzugerechnet, da dieser nicht messtechnisch erfasst und ohnehin vor dem BHKW kondensiert wird. Dadurch ergibt sich folgende Bilanz in kg/h:

Tabelle 24: Gesamtmassenbilanz

	Eintritt (kg/h)	Austritt (kg/h)
Substrateinbringung	2425,5	
Biogas zu BHKW		353,5
Methanabgabe an Tankstelle		1,2
Gärrestaustag und Kondenswasser		2014,3
Summe	2425,5	2369,0
Differenz		56,5

Die Differenz zwischen Eintritt und Austritt von 56,5 kg/h entsprechen 2,3% der eingesetzten Substratmenge. Darin enthalten sind Gasverluste, nicht kondensiertes Wasser im verbrannten Biogas, sonstige Verluste, sowie sämtliche Mess- und Rundungsfehler.

Für die Energiebilanz wurde hingegen das BHKW mit einbezogen, da der elektrische Strom und Wärme wesentliche Produkte der Anlage darstellen. Der Gasverbrauch, die Gaszusammensetzung und die elektrische Leistung des BHKW wurden während des Monitorings bestimmt und von der EVM zur Auswertung an BOKU und TUW übermittelt. Aus den Biogasdaten ergibt sich eine Leistungszufuhr zum BHKW von 1584,5 kW, woraus eine elektrische Leistung von 478,5 kW gewonnen wurde. Für die nutzbare thermische Leistung waren keine Messdaten verfügbar, als Abhilfe wurde zur Abschätzung das

Verhältnis von thermischer und elektrischer Leistung aus dem Datenblatt herangezogen. Die Verbrennungsluft lieferte keinen Beitrag zur Leistungszufuhr, da angenommen wurde, dass die Luft bei der Bezugstemperatur der Heizwerte (20°C) angesaugt wird. Die mit dem Abgas abgeführte Wärme wurde über eine Verbrennungsrechnung und Abkühlung des Abgases auf 180°C abgeschätzt. Damit ergibt sich nach Abzug der abzuführenden Niedertemperaturwärme ein restlicher Wärmeverlust von 422 kW. Die mittleren elektrischen und thermischen Wirkungsgrade lagen während der Monitoringphase damit etwa bei 30%, ein Viertel unter den im Datenblatt angegebenen Wirkungsgraden bei Volllast (etwa 40%). Gleichzeitig entspricht jedoch die dem BHKW zugeführte Leistung (in Form von Biogas) der vom Datenblatt extrapolierten nötigen Leistung um 630 kW elektrisch zu erzeugen. Entweder wird also das Potential der Biogasanlage dementsprechend nicht optimal genutzt, oder die Leistungsmessung des BHKW mit Fehlern behaftet.

Tabelle 25: Energiebilanz um das BHKW

	Leistungszufuhr (kW)	Leistungsabgabe (kW)
Biogas Hu	1584.5	
Pel mittel BHKW		478.5
Ptherm mittel BHKW		507.2
NT Wärme		24.0
Luft BHKW	n.b.	
Abgas BHKW		152.8
Summe	1584.5	1162.5
Differenz		422

Die in der Gesamtenergiebilanz zugeführte Energie setzt sich aus der Summe der Heizwerte der durchschnittlich zugeführten Substrate, der durchschnittlichen Leistungsaufnahme der elektrischen Verbraucher, sowie dem Heizwert des für Spitzenlastabdeckung verwendeten Diesels zusammen. Die abgeführte Energiemenge setzt sich aus erzeugtem elektrischen Strom und abgegebener nutzbarer und nicht nutzbarer Wärme des BHKW, Abgasverlusten und dem Heizwert des abgegebenen Biomethans zusammen.

Tabelle 26: Gesamtenergiebilanz

	Leistungszufuhr (kW)	Leistungsabgabe (kW)
Substrate LHV	3002.8	
Summe Verbraucher	71.3	
Pel mittel BHKW		478.5
Ptherm mittel BHKW		507.2
NT Wärme		24.0
Luft BHKW	n.b.	
Abgas BHKW		152.8
Hu Biomethan Tankstelle		16.8
Hu Gärrest		n.b.
Abwärme Biogas		2.63
Abwärme Gärrest		33.82
Diesel LHV	2.5	
Summe	3076.6	1,215.73
Differenz		1860.8

Der Heizwert der Substrate ergibt sich durch die getrennte Abschätzung der Heizwerte der einzelnen Substrate Gras, Hirse, Rübenhausgrün, GSR, Luzerne, Maisstroh und Pferdemist. Für die Gülle ergibt sich durch den hohen Wassergehalt kein Beitrag zur zugeführten Leistung. Der Großteil der Differenz zwischen zugeführter Energie in Form des Heizwerts der Substrate und der abgeführten Energiemenge in Form des Heizwerts des Biogases und Biomethans ist auf den üblichen unvollständigen Abbau der Biomasse (Lignin), sowie dem bei der Vergärung in etwa dem gleichen Ausmaß wie Methan entstehenden Kohlendioxid, welches keinen Beitrag zum Heizwert liefert, zurückzuführen.

Die Summe der elektrischen Verbraucher setzt sich entsprechend folgender Tabelle zusammen:

Tabelle 27: Stromaufnahme der el. Verbraucher

Aggregat	Leistungsaufnahme (kW)
Fermenter 1 Rührwerk 1	0.045
Fermenter 1 Rührwerk 2	0.037
Fermenter 2 Rührwerk 1	11.0
Fermenter 2 Rührwerk 2	9.1
zentrale Pumpstation	4.2
Rezirkulatpumpe	6.7
Biofeeder	2.6
Biomasseaufbereitung	37.5
Summe	71.3

Aus den Messwerten der einzelnen Aggregate ergaben sich die oben aufgelisteten mittleren Leistungsaufnahmen. Der niedrige Wert für die Rührer des Fermenter 1 ist auf den Umbau des Fermenters bzw. der Rührer und damit zusammenhängende Stillstandsphasen zurückzuführen.

3.4 Ergebnis Verfahrenstechnische Optimierung zur stofflichen und energetischen Nutzung der Zuckerhirse

Aufgrund mancher Schwierigkeiten während der Durchführung des Monitorings im Frühjahr/Sommer 2013, können nur eingeschränkte Aussagen aus den gewonnenen Daten gezogen werden. Nach den ersten Untersuchungen konnten jedoch keine störenden Effekte des Einsatzes von größeren Mengen Zuckerhirsebiomasse bzw. Mischungen mit größeren Mengen Maisstroh gefunden werden. Wesentlich für den erfolgreichen Einsatz in der Biogasanlage ist jedoch eine ausreichende Zerkleinerung um den Abbauprozess zu beschleunigen und die Durchmischung des Fermenters zu gewährleisten.

Durch Simulationsarbeiten wurde gezeigt, dass sowohl mit stärke- als auch zuckerbildenden Zuckerhirsesorten gute Methan, Ethanol, und Energiegewinne möglich sind. Die auf die eingesetzten Stoffe (Trockensubstanz) bezogenen Erträge sowie die Jahreserträge von Ethanol, Methan und Energie (ausgedrückt als Heizwert der Energieträger) aller Prozessvarianten sind in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 28: Zusammenfassung der Ergebnisse der Prozessvarianten

		Vergleichsprozess V1		Zuckerhirseprozesse		
		Bioethanol	Biogas	V2	V3	V4
Energiebedarf elektrisch (MWh/a)				21,38	126,1	232,7
Energiebedarf thermisch (MWh/a)				3046,4	708,2	667,2
spezifischer Output						
Ethanol (kg/t TS)		377,91		317,07	97,22	93,83
CH ₄ (kg/t TS)			240,93	206,32	168,88	172,66
DDGS (kg/t TS)		373,26		362,97		
Energie gesamt (kWh/kg TS)		2,82	3,35	2,57	3,07	3,10
Jahreserträge						
Ethanol (t/a)		702,00		648,72	332,64	321,04
CH ₄ (t/a)			959,17	297,92	577,85	590,78
DDGS (t/a)		693,36		742,64		
Energie gesamt (GWh/a)		5,24	13,32	8,98	10,51	10,60

Der Jahres-Ethanolertrag ist bei Verwendung der stärkereichen Zuckerhirsesorten mehr als doppelt so groß als bei Verwendung der zuckerbildenden Sorte. Der Methanertrag verhält sich genau umgekehrt. Ein weiterer Vorteil der Variante 2 ist, dass die Rohstoffe sowohl bei der Ethanol, als auch bei der Methanproduktion effizienter genutzt werden. Entsprechend den Stärkeerträgen für die jeweiligen Sorten kann mit der im Jahr 2011 untersuchten Sorte „Chopper“ ein deutlich höherer Ethanolertrag erzielt werden. Die Höhe des Ethanolertrags mit der Sorte „Chopper“ ist mit dem eines konventionellen, maisgefütterten Ethanolprozesses vergleichbar, mit den anderen Sorthumssorten kann ein Ertrag in der Größenordnung eines weizengefütterten Prozesses (etwa 1,8 t/ha,) erzielt werden. In Abbildung 29:

Vergleich von Ethanolpotential und Simulationsergebnissen ist dieser Sachverhalt nochmals dargestellt. Zusätzlich sind auf der rechten Seite die simulierten Jahresproduktionen von Ethanol, Methan und DDGS der Prozessvarianten 1-4 dargestellt. Aufgrund der verschiedenen Datenquellen für die Mais-Vergleichsprozesse liegen der Ertrag rechts etwas über dem Ethanolpotential von Mais. Der simulierte Ethanolertrag der Variante 2 liegt erwartungsgemäß etwas unter dem Potential, was auf unvermeidbare Zuckerverluste zurückzuführen ist. Die Ethanolerträge der Prozessvarianten 3 und 4 betragen, wie zuvor erwähnt, etwa 50 % des Wertes von V2 bzw. dem Vergleichsprozess.

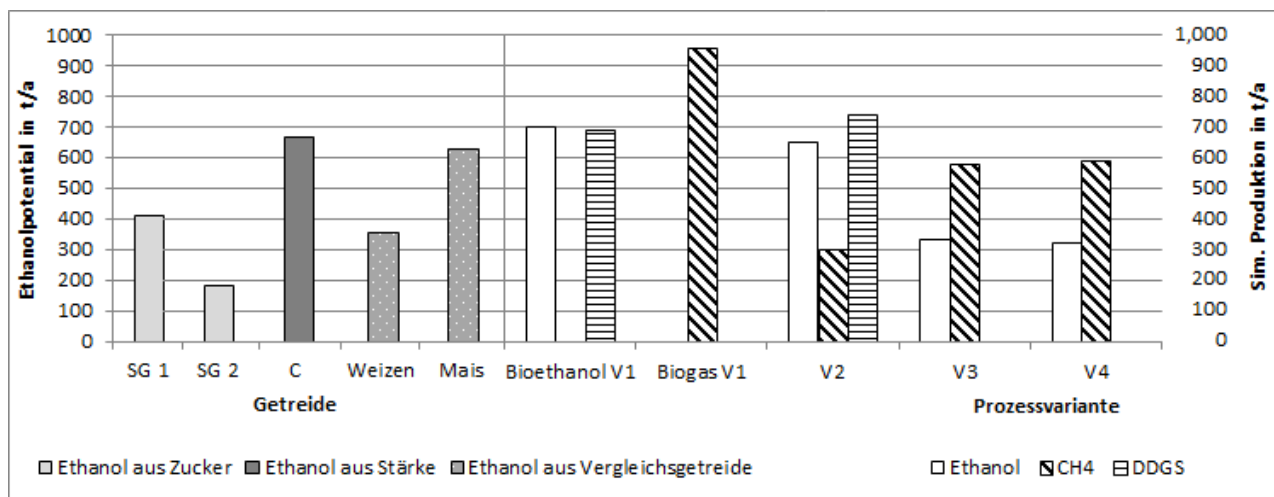


Abbildung 29: Vergleich von Ethanolpotential und Simulationsergebnissen

Zusätzlich fällt bei der Stärkevariante noch DDGS als Nebenprodukt an, und es kann auf die Verwendung einer zusätzlichen Chemikalie zur Stabilisierung des Substrates (Ameisensäure) eingesetzt werden, was in ökonomischer Hinsicht ebenfalls für die Prozessvariante 2 spricht. Aus agrartechnischer Sicht gestaltet sich V2 ebenfalls einfacher, da die Erntetechnologie für die Körnerhirse ähnlich jener von Mais ist, und daher leicht realisiert werden kann. Im Gegensatz dazu ist die Erntetechnologie der zuckerbildenden Sorten noch nicht in einem für die Prozessvarianten 3 und 4 ausreichenden Entwicklungsstadium verfügbar. Zuckerhirse wird zwar auch jetzt schon im großen Maßstab, z.B. in den USA geerntet, kann jedoch im Hinblick auf den Verwendungszweck – Herstellung eines lebensmitteltauglichen Dicksaftes – nicht auf das Projekt BISUNFUEL umgelegt werden. Die Möglichkeit der unmittelbaren Stabilisierung des Pflanzensafts nach der Ernte wurde zwar in Prinzipversuchen bestätigt, jedoch wurde die technische Umsetzung noch nicht realisiert und bedarf weiterer Entwicklungsarbeit. Der Energiebedarf der Prozessvarianten variiert stark in Abhängigkeit von der produzierten Ethanolmenge sowie der zu zerkleinernden Pflanzenmasse und der eingesetzten Zerkleinerungstechnologie. So werden in V2 insgesamt über 3 GWh/a thermisch benötigt, für V2 und V3 jedoch nur etwa 700 MWh/a. Jedoch benötigen die beiden Zuckerhirseprozesse die 5 bis 10-fache elektrische, und damit hochwertigste, Energie zur Zerkleinerung des gesamten Pflanzenmaterials.

Die höheren Energieausbeuten sprechen zwar für die Umsetzung der Prozessvariante 3 bzw. 4, jedoch muss festgehalten werden, dass die erwähnten Vorteile der Körnerhirse - kein Bedarf an zusätzlichen

Chemikalien, ausgereifte (Ernte-)technologie, zusätzliches Nebenprodukt DDGS - starke Argumente für Prozessvariante 2 und damit stärkebildende Zuckerhirsesorten darstellen.

3.5 Ergebnis Ökologische Bewertung der kaskadischen Nutzung der Zweitfrucht Zuckerhirse

3.5.1 Treibhausgasemissionen

Die Ergebnisse der Berechnung der Treibhausgasemissionen von Biomethan und Bioethanol aus Zuckerhirse nach der Methodik der EU-Richtlinie (RL 2009/28/EG) sind in Abbildung 6 bis Abbildung 9 dargestellt.

Abbildung 28 zeigt die Gesamtemissionen in g CO₂-Äq./MJ getrennt ausgewiesen für Biomethan aus Zuckerhirse und Bioethanol aus Zuckerhirse unterteilt in die Beiträge der Treibhausgase CO₂, CH₄ und N₂O. Die Gesamtemissionen für die Varianten ohne CO₂-Nutzung (Variante 2, Variante 3 und Variante 4) betragen zwischen 32 bis 39 g CO₂-Äq./MJ. Bei Variante 2a, bei der die Emissionseinsparung durch Abscheidung und Ersetzung von CO₂ berücksichtigt wird, reduzieren sich die Gesamtemissionen von 32 auf 20 g CO₂-Äq./MJ. Bei allen untersuchten Varianten mit Zuckerhirse ist CO₂ mit 64 bis 80% der gesamten Treibhausgasemissionen das Treibhausgas mit dem größten Anteil. Zum Großteil ist es auf den Einsatz von fossilen Energieträgern beim Anbau der Zuckerhirse (z.B. Kraftstoff für landwirtschaftliche Maschinen), bei der Verarbeitung (z.B. Bereitstellung von Prozesswärme) und bei Transport und Vertrieb (z.B. Kraftstoff) zurückzuführen. Den zweitgrößten Beitrag hat N₂O mit ca. 20%. Der Großteil der N₂O-Emissionen ist mit dem Anbau der Zuckerhirse, durch Stickstoffverluste bei der Aufbringung von Gärresten und mineralischem Dünger und bei der Produktion von mineralischem Stickstoffdünger, verbunden.

In Abbildung 7 sind die Gesamtemissionen von Biomethan aus Zuckerhirse unterteilt in einzelne Prozessschritte dargestellt. Weiters sind zum Vergleich die Treibhausgasemissionen für Erdgas (Werte für Österreich) und Biomethan aus Mais dargestellt. Die Treibhausgasemissionen für Biomethan aus Mais wurden im Rahmen des EU-Projektes „Green Gas Grids“ (Green Gas Grids, 2013) erhoben und stellen eine Bandbreite von optimalen („Best Practice“) bis zu schlechten („Worst Practice“) Anbau- und Produktionsbedingungen dar. Die untersuchten Varianten für Biomethan aus Zuckerhirse weisen Gesamtemissionen in der Höhe des in Green Gas Grids (2013) angeführten „Standard-Werts“ für Biomethan aus Mais auf. Die Emissionen beim Anbau der Zuckerhirse sind in etwa gleich hoch wie die „Best-Practice-Emissionen“ für den Anbau von Mais.

Abbildung 30 zeigt die Treibhausgasemissionen von Bioethanol aus Zuckerhirse unterteilt in einzelne Prozessschritte. Zum Vergleich sind hier die Treibhausgasemissionen für Benzin (Wert für Österreich und Standardwerte der EU-Richtlinie) und Bioethanol aus Weizen und Mais angeführt. Die angeführten Treibhausgasemissionen für Bioethanol aus Weizen und Mais entsprechen den Standardwerten der EU-Richtlinie. Für Bioethanol aus Weizen sind zwei Varianten für die Prozesswärmebereitstellung dargestellt: Mit einer Kraft-Wärme-Kopplung mit Erdgas (KWK) und mit einem Dampfkessel mit Erdgas. Auch hier fällt auf, dass die Anbau-Emissionen der Zuckerhirse (7 bis 9 g CO₂-Äq./MJ) deutlich geringer sind als die Anbau-Emissionen für Weizen und Mais (20 bis 23 g CO₂-Äq./MJ) entsprechend den Standardwerten der EU-Richtlinie.

Die Einsparung von Treibhausgasemissionen durch Bioethanol und Biomethan aus Zuckerhirse im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffen Benzin und Erdgas ist in Abbildung 31 dargestellt. Zur Bestimmung der Einsparung bei der kombinierten Erzeugung von Biomethan und Bioethanol aus Zuckerhirse werden Biomethan und Bioethanol den entsprechenden Anteilen aus Erdgas und Benzin gegenübergestellt. Zum Beispiel in Variante 2 setzt sich ein MJ Biokraftstoff aus 0,36 MJ Biomethan und 0,64 MJ Bioethanol zusammen. Für die kombinierte Bereitstellung betragen die Gesamtemissionen 32 g CO₂-Äq./((0,36 MJ Biomethan + 0,64 MJ Bioethanol). Im Vergleich zu einer Mischung aus 0,36 MJ Erdgas und 0,64 MJ Benzin beträgt die Einsparung 65%.

Die höchste Einsparung hat die Variante 2a – separate Nutzung von Korn und Stroh (inkl. CO₂-Nutzung) mit 80%. Die geringste Einsparung hat die Variante 3 – Ganzpflanzenfermentation mit 50%.

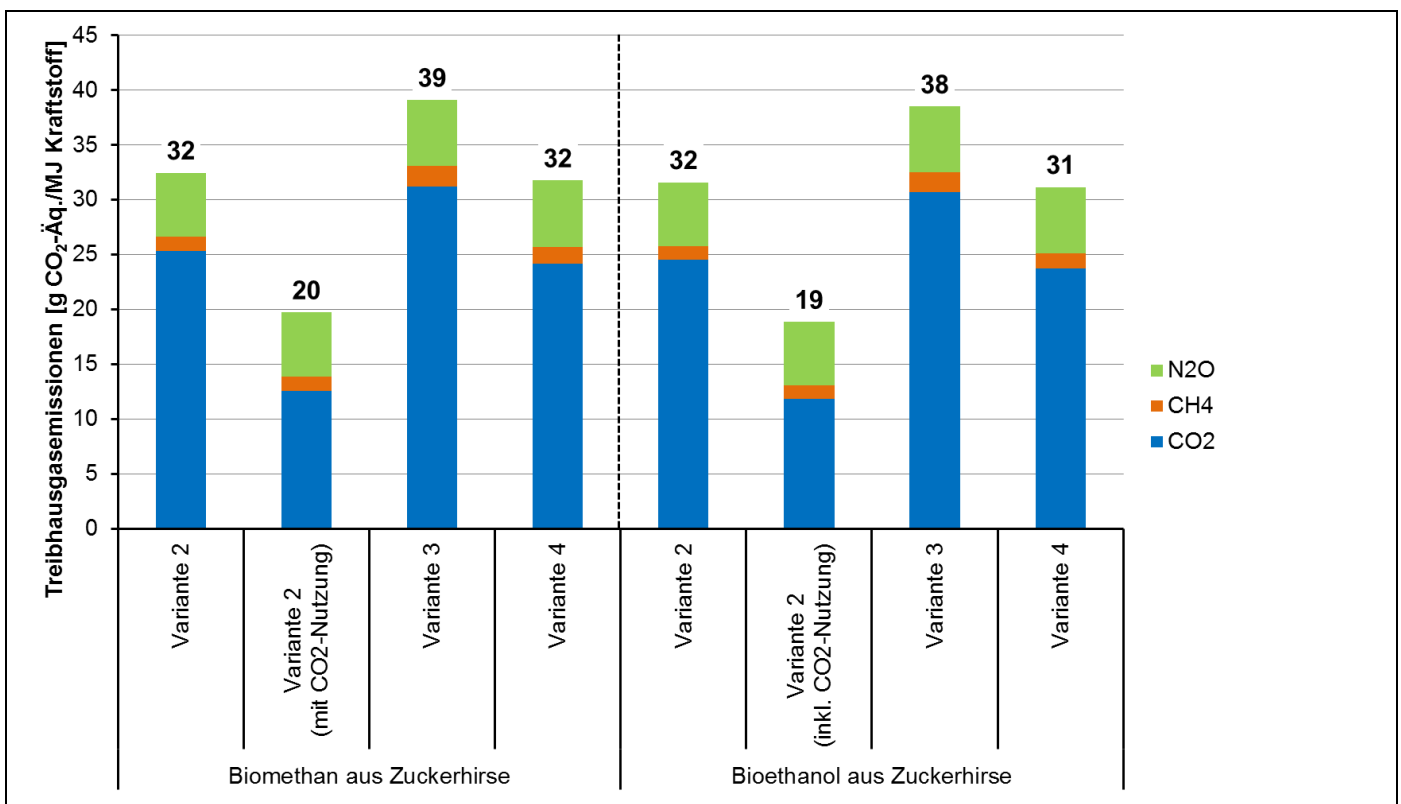


Abbildung 30: Treibhausgasemissionen von Biomethan und Bioethanol aus Zuckerhirse nach Art des Treibhausgases

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

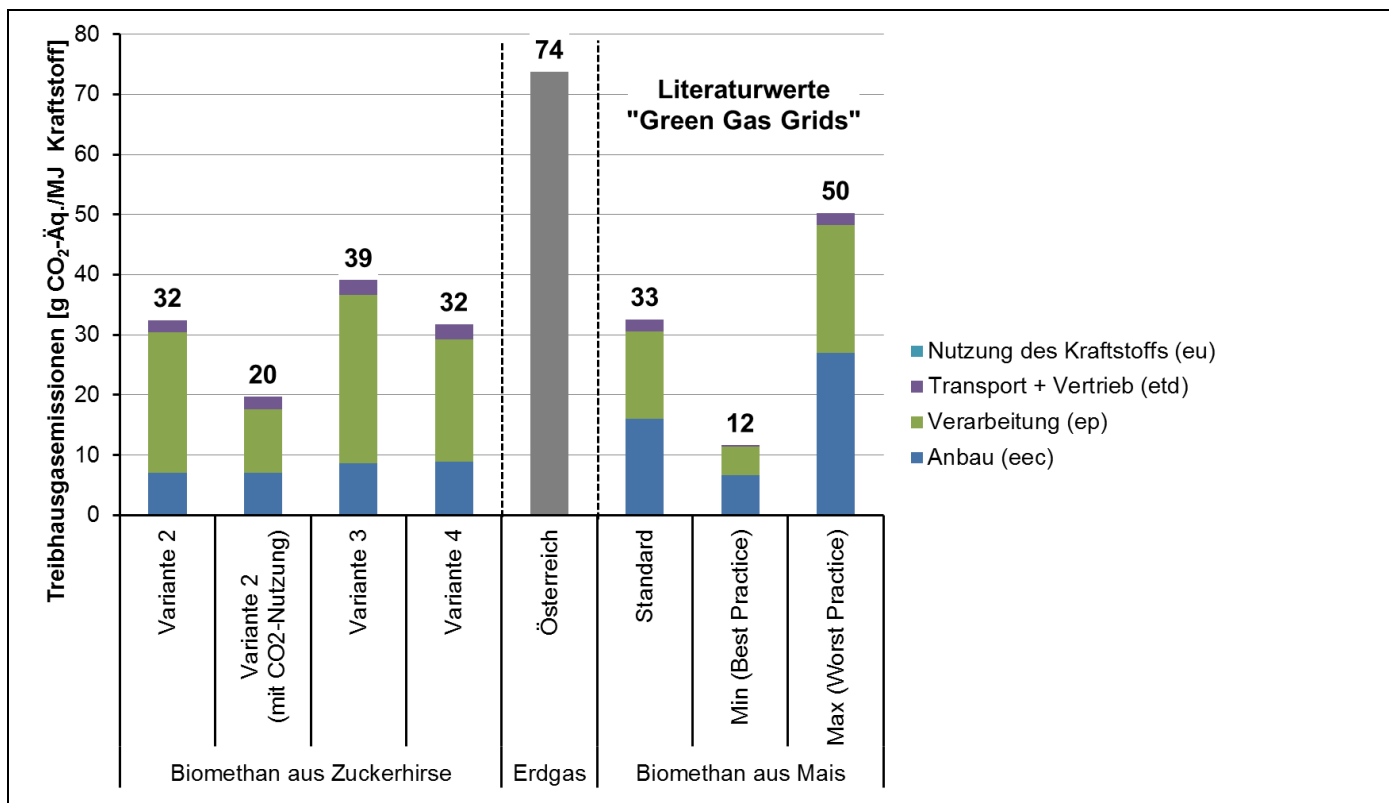


Abbildung 31: Treibhausgasemissionen von Biomethan aus Zuckerhirse im Vergleich zu Erdgas und Biomethan aus Mais unterteilt in Prozessschritte

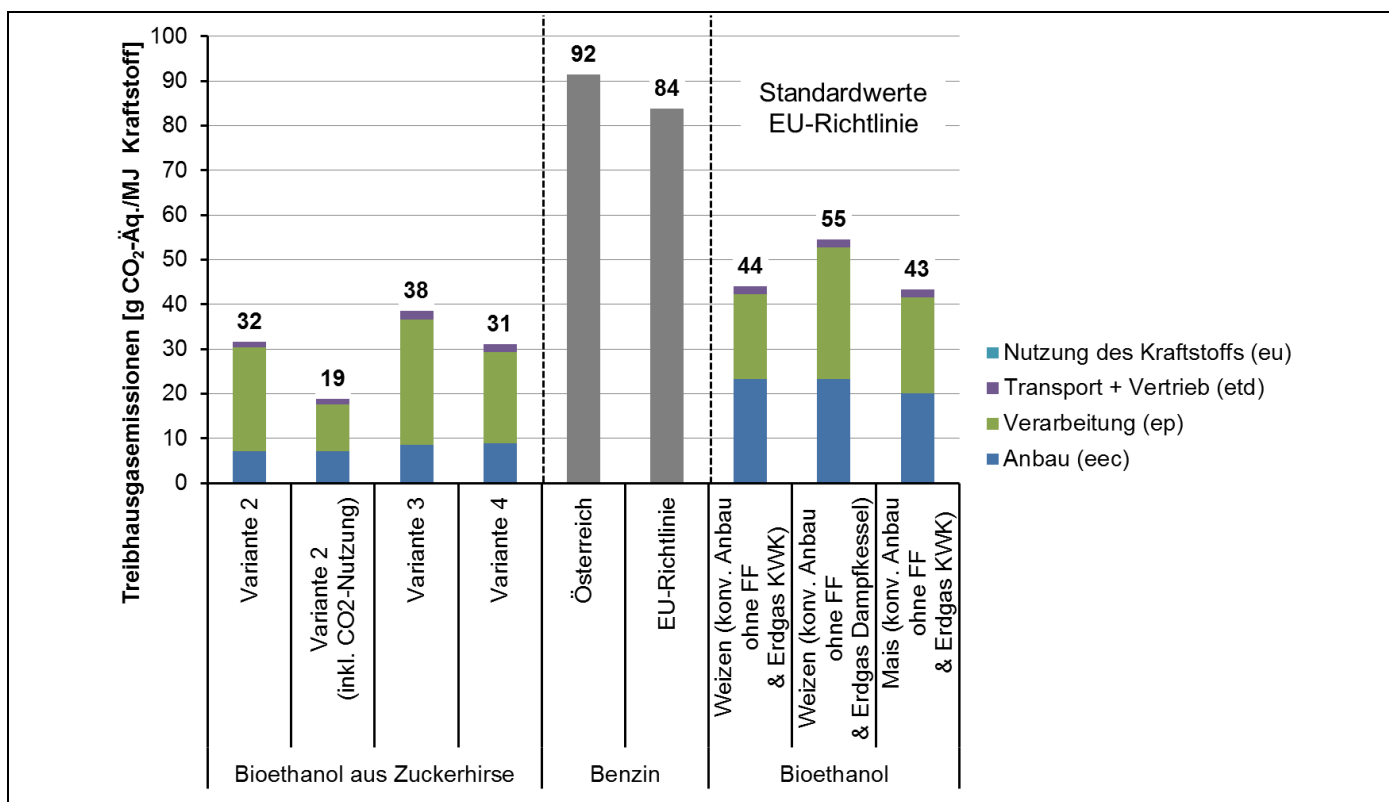


Abbildung 32: Treibhausgasemissionen von Bioethanol aus Zuckerhirse im Vergleich zu Benzin und Bioethanol aus Weizen und Mais

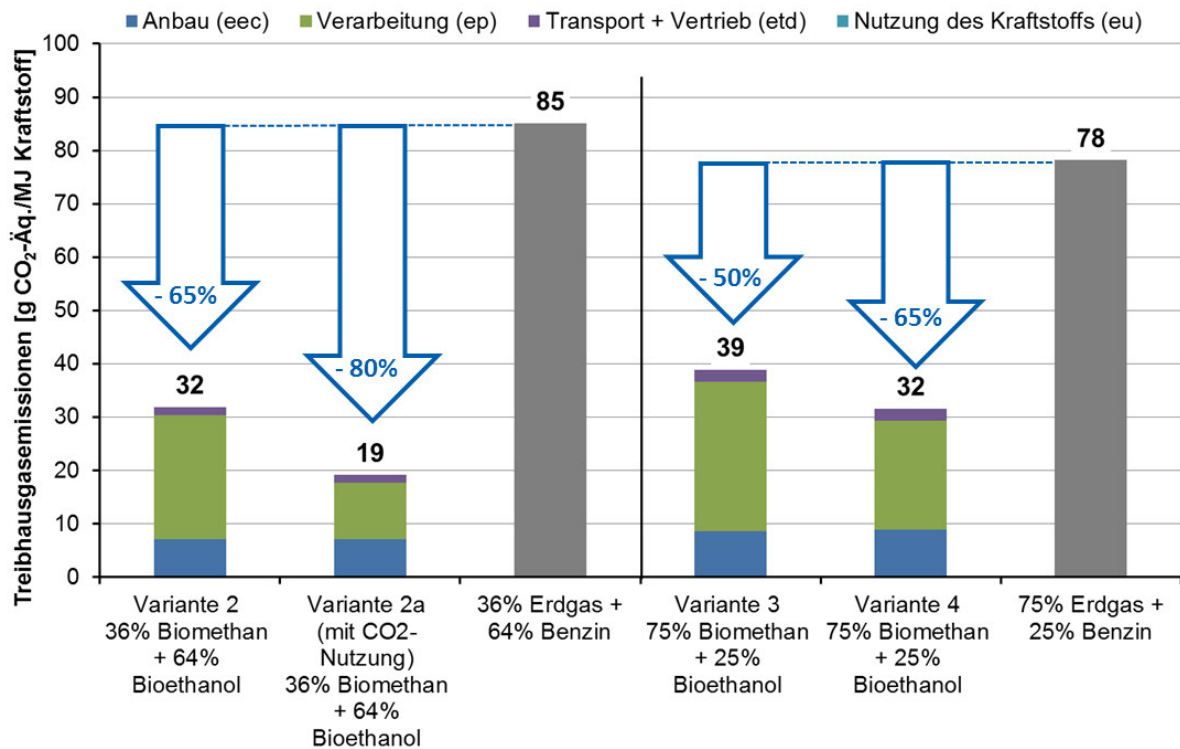


Abbildung 33: Treibhausgasemissionen und Einsparung von Treibhausgasemissionen von Biomethan und Bioethanol aus Zuckerhirse im Vergleich zu Benzin und Erdgas

3.5.2 Primärenergiebedarf

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen die Ergebnisse für den Primärenergiebedarf unterteilt in erneuerbare, nicht erneuerbare und andere Anteile. Der Primärenergiebedarf ist bei den Varianten mit Zuckerhirse etwas höher (0,2 bis 0,3 MJ/MJ Kraftstoff) als bei den fossilen Referenzsystemen mit Erdgas und Benzin. Für den nicht erneuerbare Primärenergiebedarf weisen die Varianten mit Zuckerhirse eine Reduktion von 50 bis 70% auf.

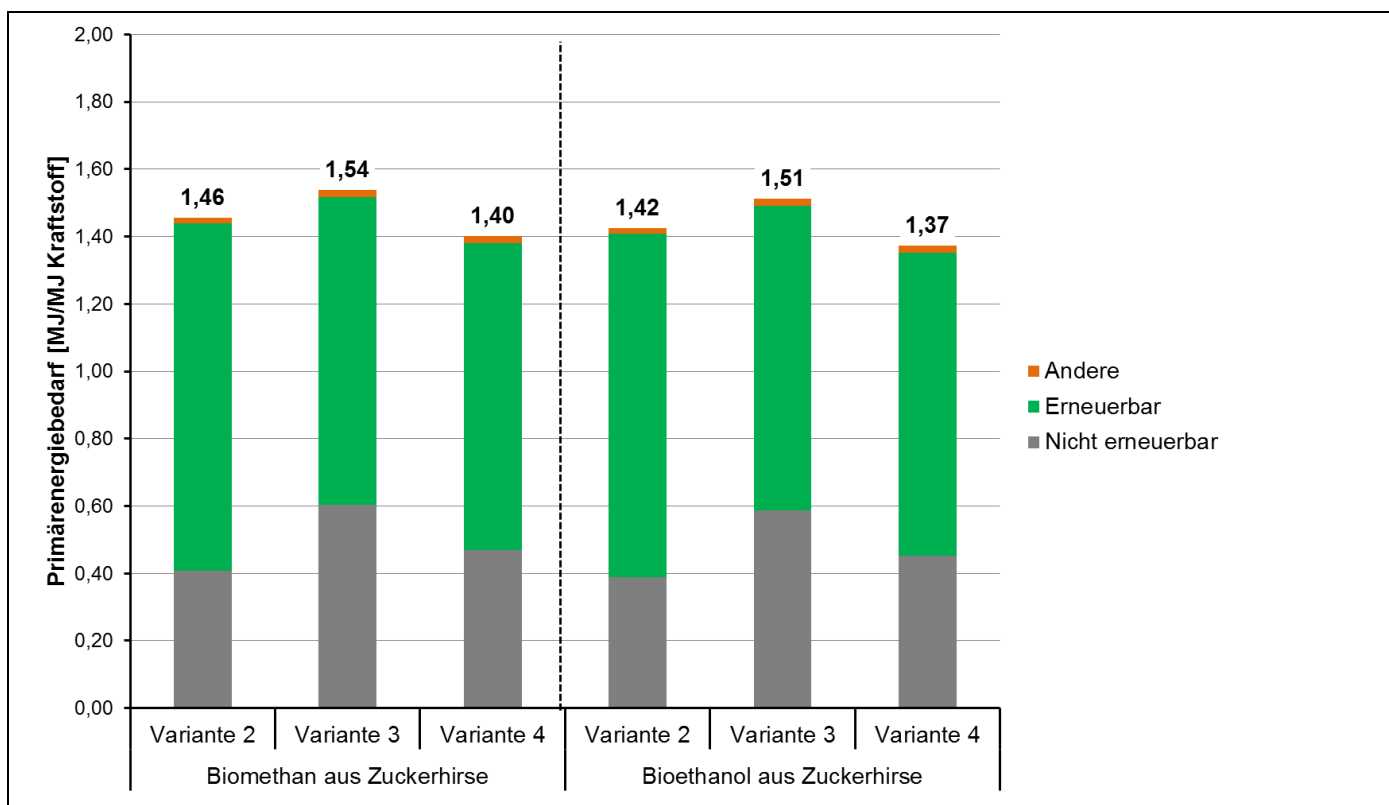


Abbildung 34: Primärenergiebedarf von Biomethan und Bioethanol aus Zuckerhirse unterteilt in nicht erneuerbare, erneuerbare und andere Anteile

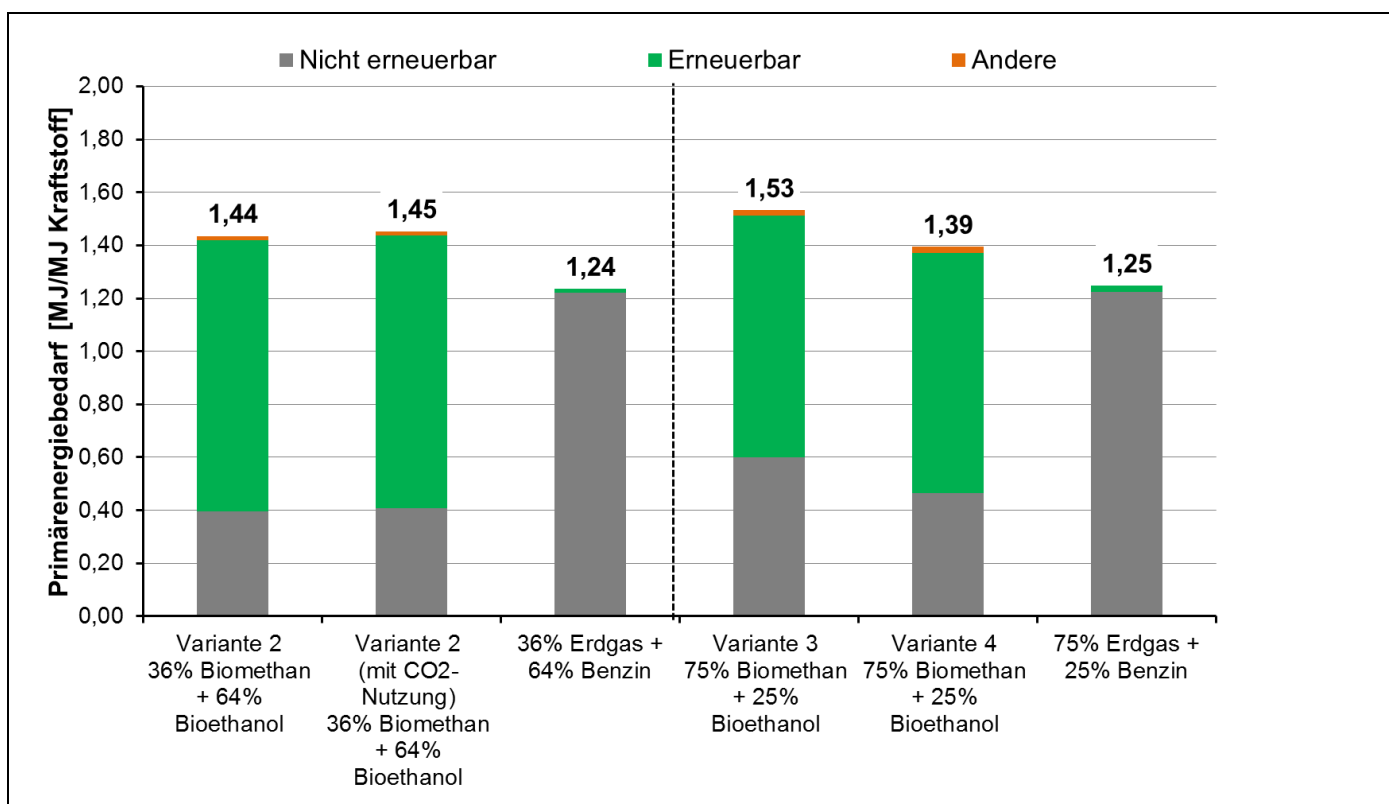


Abbildung 35: Primärenergiebedarf von Biomethan und Bioethanol aus Zuckerhirse im Vergleich zu Erdgas und Benzin unterteilt in nicht erneuerbar, erneuerbare und andere Energieträger

3.5.3 Einflussfaktoren

Die zuvor dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die im Projekt ermittelte Datenbasis. Bei der Ergebnisinterpretation sind speziell für den Zuckerhirseanbau folgende Punkte zu beachten:

Die Emissionen beim Anbau der untersuchten Varianten für Zuckerhirse (7 bis 9 g CO₂-Äq./MJ) sind im Vergleich zu Standardwerten der EU für z.B. Bioethanol aus Weizen oder Mais (20 bis 23 g CO₂-Äq./MJ) sehr niedrig. Das ist u.a. auf den projektspezifischen Anbau von Zuckerhirse als Zweitfrucht zurückzuführen, auf den sich die Grunddaten für den Zuckerhirseanbau beziehen (Nutzung der Gärreste für die Düngung der Zuckerhirse und dadurch Vermeidung der Produktion von mineralischen Düngern, Anbau der Zuckerhirse als Zweitfrucht im Rahmen eines Fruchtfolgesystems, geringerer Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Vergleich zu anderen Rohstoffen). Den stärkeren Einfluss auf die niedrigen Emissionen beim Anbau hat aber der Rohstoff- bzw. Biokraftstoffertrag. Das wird deutlich, wenn man die absoluten Treibhausgasemissionen für den Anbau der Zuckerhirse mit Emissionen beim Anbau anderer Rohstoffe und Literaturwerten für Zuckerhirse vergleicht (Tabelle 17). Bei den absoluten Emissionen beim Anbau liegt die Zuckerhirse auf Basis der im Projekt erhobenen Daten etwas unter Weizen und im selben Bereich wie Mais. Der Rohstoff- bzw. Biokraftstoffertrag ist jedoch deutlich höher, wobei zu berücksichtigen ist, dass sich bei Zuckerhirse die Werte auf die Ganzpflanze und bei Weizen und Mais nur auf die Körner beziehen. Berücksichtigt man bei Zuckerhirse bei der Sorte Chopper nur die Körner, ist aber auch hier der Wert mit 161 GJ/(ha*a) deutlich höher als die Standardwerte für Weizen- und Maiskörner nach BioGrace (2014). Die in Tabelle 5 angeführten Rohstoff- bzw. Biokraftstofferträge für Zuckerhirse aus dem Projekt BISUNFUEL wurden bei Anbauversuchen im Jahr 2011 erhoben. Sie konnten jedoch in den folgenden beiden Versuchsjahren 2012 und 2013 vor allem auf Grund der ungünstigen Witterungsbedingungen nicht mehr erreicht werden (siehe Berichtsteil Anbauversuche 2012 und 2013).

Tabelle 29: Treibhausgasemissionen beim Anbau von Rohstoffen in [t CO₂-Äq./ha*a]

Rohstoff	Zuckerhirse f. Bioethanol & Biomethan	Zuckerhirse f. Bioethanol	Weizen f. Bioethanol	Mais f. Bioethanol
Anbau- emissionen [t CO ₂ - Äq./ha*a]	1,2 - 1,4	1,7	1,6	1,2
Rohstoff-Ertrag [GJ/ha*a]	Chopper: 219 ¹⁾ Sugargraze I: 148 ¹⁾	-	77 ²⁾	61 ²⁾
Quelle	BISUNFUEL	Köppen (2009)	BioGrace (2014)	BioGrace (2014)

¹⁾ Ganzpflanze; Rohstoff-Ertrag für Körner bei Chopper: 161 GJ/ha*a)

²⁾ Körner

Laut der EU-Richtlinie (RL 2009/28/EG) müssen derzeit Biokraftstoffe eine Mindesteinsparung von Treibhausgasemissionen in der Höhe von 35% erreichen. Ab 1.1.2017 muss die Einsparung 50% betragen und ab 1.1.2018 muss die Einsparung, bei Anlagen die ihre Produktion im Jahr 2017 oder später gestartet haben, 60% betragen.

Durch die Nutzung der Zuckerhirse ganzpflanze kann sowohl Biomethan als auch Bioethanol erzeugt werden. Im Rahmen des Projekts wurden die Treibhausgasemissionen nach der Methodik der EU-Richtlinie (RL 2009/28/EG) für vier verschiedene Varianten zur Produktion von Biomethan und Bioethanol aus Zuckerhirse bestimmt. Der Primärenergiebedarf wurde mit derselben Methodik bestimmt.

Basierend auf den im Versuchsjahr 2011 erhobenen Zuckerhirseerträgen ergeben sich folgende Gesamtemissionen und Einsparungen für die untersuchten Varianten:

- Variante 2 – separate Nutzung von Korn und Stroh:
Gesamtemissionen: $32 \text{ g CO}_2\text{-Äq.}/(0,36 \text{ MJ}_{\text{Biomethan}} + 0,64 \text{ MJ}_{\text{Bioethanol}})$
Einsparung: -65% im Vergleich zu $0,36 \text{ MJ}_{\text{Erdgas}} + 0,64 \text{ MJ}_{\text{Benzin}}$
- Variante 2a – separate Nutzung von Korn und Stroh (inkl. CO₂-Nutzung):
Gesamtemissionen: $19 \text{ g CO}_2\text{-Äq.}/(0,36 \text{ MJ}_{\text{Biomethan}} + 0,64 \text{ MJ}_{\text{Bioethanol}})$
Einsparung: -80% im Vergleich zu $0,36 \text{ MJ}_{\text{Erdgas}} + 0,64 \text{ MJ}_{\text{Benzin}}$
- Variante 3 – Ganzpflanzenfermentation:
Gesamtemissionen: $39 \text{ g CO}_2\text{-Äq.}/(0,75 \text{ MJ}_{\text{Biomethan}} + 0,25 \text{ MJ}_{\text{Bioethanol}})$
Einsparung: -50% im Vergleich zu $0,75 \text{ MJ}_{\text{Erdgas}} + 0,25 \text{ MJ}_{\text{Benzin}}$
- Variante 4 – Zuckersafffermentation:
Gesamtemissionen: $32 \text{ g CO}_2\text{-Äq.}/(0,75 \text{ MJ}_{\text{Biomethan}} + 0,25 \text{ MJ}_{\text{Bioethanol}})$
Einsparung: -65% im Vergleich zu $0,75 \text{ MJ}_{\text{Erdgas}} + 0,25 \text{ MJ}_{\text{Benzin}}$

Diese Ergebnisse zeigen, dass drei der vier untersuchten Varianten die für das Jahr 2018 geforderte Treibhausgaseinsparung in der Mindesthöhe von 60% erreichen.

3.6 Ergebnis Darstellung der Zukunftssicherheit der Zwischen-/Zweitfrucht Zuckerhirse unter dem Aspekt des Klimawandels

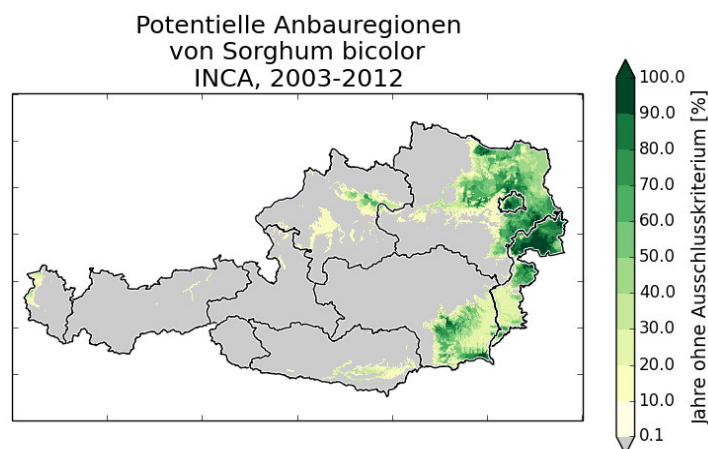


Abbildung 36: Anteil der Jahre, in denen alle klimatischen Mindestanforderungen erfüllt werden; INCA, 2003 - 2012

Unter den gegenwärtigen klimatischen Bedingungen ist ein Anbau von Zuckerhirse lediglich in den Ackerbaugebieten von Ostösterreich (Wiener Becken, Seewinkel und Grazer Becken) zuverlässig möglich (siehe Abbildung 36). Im Weinviertel treten Probleme durch niedrige Minimumtemperaturen auf, sodass lediglich weniger als die Hälfte der Jahre genutzt werden kann. In den Hügellagen und den Alpen sind die Temperaturen derzeit generell zu tief. Limitierungen durch Niederschlagsmangel waren nur im Raum Wien zu beobachten.

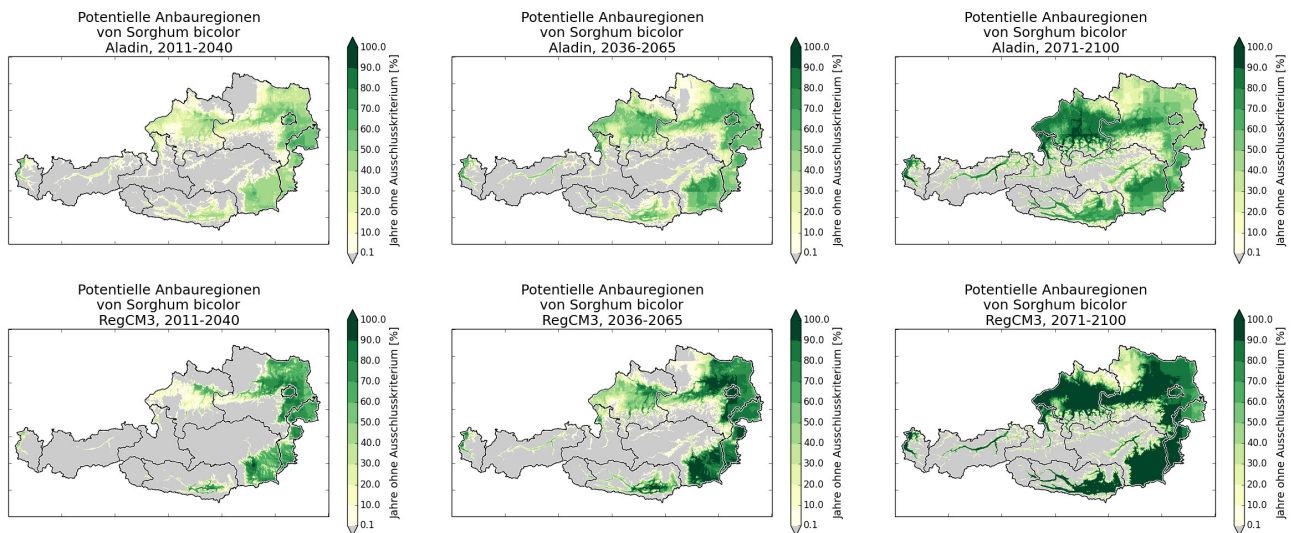


Abbildung 37: Zukünftige Entwicklung (2011 - 2040 links, 2036 - 2065 mitte, 2071 - 2100 rechts) der potentiellen Anbauregionen; Aladin oben, RegCM3 unten

Betrachtet man die Auswertungen anhand der RCMs, so zeichnet sich eine Ausweitung potentieller Anbauflächen ab (Abbildung 37). Tieflagen sind weiterhin begünstigt, aber auch in angrenzenden Hügellagen könnte der Anbau von Zuckerhirse durch das zunehmend höhere Temperaturniveau profitieren. Für die kommenden 30 Jahren kann anhand der Simulation von RegCM3 und REMO (beide durch das Globale Klimamodell Echam5 angetrieben) davon ausgegangen werden, dass der Anbau im östlichen und südlichen Flachland mit relativ geringer Ausfallswahrscheinlichkeit aufgrund klimatischer Faktoren möglich sein wird. Aladin, das eine stärkere Temperaturentwicklung hat und im Osten deutlich trockener ist, zeigt zwar ähnliche Muster, aber der Anteil der Jahre, in denen ein Anbau möglich ist, liegt nur bei etwa 50 Prozent. Mitte des Jahrhunderts zeigen alle RCMs, dass die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Anbaus weiterhin steigt. Ende des Jahrhunderts verlagern sich die besonders begünstigten Gebiete weiter nach Westen, da der Osten des Landes zunehmend zu trocken wird. Allerdings wäre dann auch der Anbau im Klagenfurter Becken und sogar im Inntal und Rheintal möglich.

3.7 Schlussfolgerung:

Am Markt sind Zuckerhirsesorten verfügbar, welche sich für die Nutzung für die Rohstoffbereitstellung für die Bioethanol- und Biogasproduktion eignen und auch als Zischen-/Zweitfrucht bei gegebenen Klimaverhältnissen großes Ertragspotential aufweisen. Unter diesen finden sich Zuckerhirsesorten wie Chopper und Nutrigain, die sich durch ihre großen Fruchtkörner (vergleichbare Größe wie Weizen) und

den Stärkeertrag pro Hektar besonders für die Rohstoffbereitstellung für die Ethanolproduktion eignen. Auch der Anbau ist mit vorhandenen maschinellen Ausrüstungen der landwirtschaftlichen Betriebe durchführbar, sodass keine wesentlichen Investitionskosten auf die Produzenten zukommen. Die Produktionskosten liegen ähnlich zu den Produktionskosten von Mais. Auch die Lagerhaltung von stärkeproduzierenden Sorten ist einfach. Mittels Trocknung wie bei Mais oder Getreide können die Körner haltbar gemacht werden.

Bei den Zuckerhirsearten, die Zucker in den Zellen einlagern, ist die Lagerung nicht so einfach. Vor allem die hohen Investitionskosten für die Stabilisierung des Zuckers und die dezentrale Weiterverarbeitung des Zuckers zu Ethanol (Lagerung der Ganzpflanze mit Ameisensäure, sowie Investition in Kleinethanolanlage, bzw. Abpressen des Zuckersaftes und Eindicken im Kampagnenbetrieb) lassen einen wirtschaftlichen Betrieb unter den jetzigen ökonomischen Rahmenbedingungen nicht zu.

Der Reststoff der Zuckerhirsepflanze stellt einen Rohstoff dar, welcher bei Biogasanlagen seine Anwendung finden kann, wobei gesagt werden muss, dass bei besonders ausgereiften Fürchten eine Vorbereitung des Materials zum besseren Aufschluss im Fermenter vorangestellt sowie die Eintragungseinrichtung und Rührwerke auf die neue Rohstoffsituation adaptiert werden müssen. Dies erlaubt aber den Biogasbetreibern weitere strohartige Nebenprodukte der Landwirtschaft, wie diverse strohhaltige Wirtschaftsdünger aus Pferde- oder Rinderhaltung sowie Getreide- und Maisstroh für die Biogasproduktion, einzusetzen.

Betrachtet man die ökologische Eignung der Zuckerhirse aus der Zwischen-/Zweitfruchtproduktion so wird ersichtlich, dass die Mindesteinsparungen der Treibhausgasemissionen (35%) welche laut EU-Richtlinie (RL 2009/28/EG) vorgeschrieben ist eingehalten werden kann. Auch die Vorgaben für 01.01.2017 (50% Einsparung) und 01.01.2018 (60% Einsparung) können bei der Produktion von Bioethanol und Biomethan eingehalten werden, wobei die separate Nutzung von Korn in einer zentralen Bioethanolanlage und Stroh bei einer Biogasanlage mit Minimum 65% Emissionseinsparungen für Bioethanol und Biomethan die Vorgabe der Richtlinie erfüllt.

Die Analyse der derzeitigen Klimabedingungen zeigt, dass ein erfolgreicher Anbau von Zuckerhirse als Zwischen-/Zweitfrucht gegenwärtig lediglich in den tief gelegenen östlichen Ackerbaugebieten Österreichs möglich ist. Sehr hohe Wahrscheinlichkeit von Anbauerfolg (>90%) ist lediglich im Seewinkel zu erwarten. Die Auswertung anhand der Klimaszenarien ergibt, dass sich potentielle Anbauggebiete weiter nach Westen bzw. in Hügellagen ausweiten wobei speziell das RCM Aladin eine Verringerung des Niederschlags im Osten prognostiziert und damit eine Reduktion der Wahrscheinlichkeit des Anbauerfolges verbunden ist. REMO und RegCM3 sehen bis Ende des Jahrhunderts in weiten Gebieten des Flach- und Hügellandes nahezu sichere klimatische Bedingungen für den Anbau von Zuckerhirse.

4 Ausblick und Empfehlungen

Die Zuckerhirse als Zwischen-/Zweitfrucht stellt besonders bei stärkeproduzierenden Arten eine Möglichkeit dar als zusätzliche Feldfrucht in die Fruchtfolge aufgenommen zu werden und für die stärkeverarbeitende Industrie, welche vor allem auf Mais und Weizen als Rohstoffgrundlage aufbaut, eine zusätzliche stärkebildende Körnerart bereitzustellen. Aufgrund der Körnergröße und des Stärkegehalts diverser Zuckerhirsesorten kann angenommen werden, dass sich diese in den Produktionskreislauf der Industrie integrieren lassen kann.

Auch hinsichtlich der Diskussion eines möglichen Verbots des mehrmaligen Anbaus von Mais ohne Kulturwechsel kann die Zuckerhirse als Lösungsansatz dienen. Besonders der durch die fortlaufende Nutzung nur einer Kulturart aufgebaute Schädlingsdruck könnte durch die Nutzung von Zuckerhirse, bei gleichzeitig ähnlichem Stärkeertrag, durchbrochen werden.

Vor allem der Klimawandel macht es notwendig, sich in der landwirtschaftlichen Produktion zur Sicherung der benötigten Rohstoffe Fruchtfolgestrategien zu überlegen, welche die Versorgung der Bioethanolproduktion sowie sonstiger stärkeverarbeitender Industrie langfristig auf dem jetzigen Niveau sicherstellen kann.

Hierbei zeigt sich, dass sich das Anbaugebiet, welches für die Zuckerhirse als Zwischen-/Zweitfrucht momentan nur auf den äußersten Osten beschränkt ist, durch den Klimawandel in den nächsten Jahrzehnten mit hoher Wahrscheinlichkeit nach Westen hin ausbreiten wird, sodass bis Mitte dieses Jahrhunderts wesentliche Anbauflächen in Niederösterreich, Burgenland, Steiermark und Kärnten und teilweise auch in Oberösterreich dazukommen können.

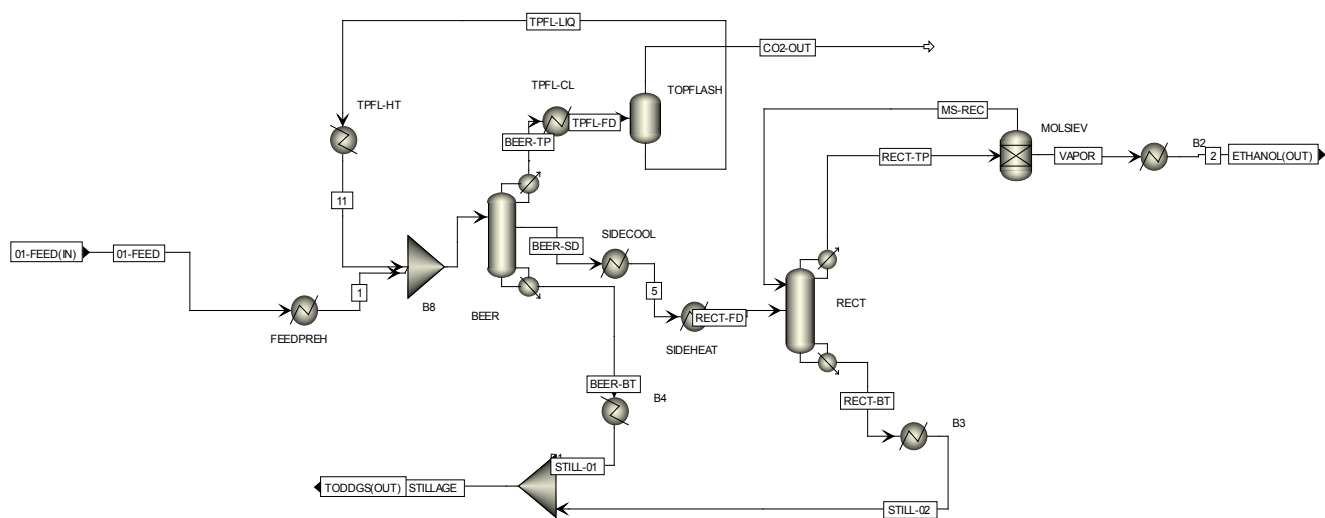
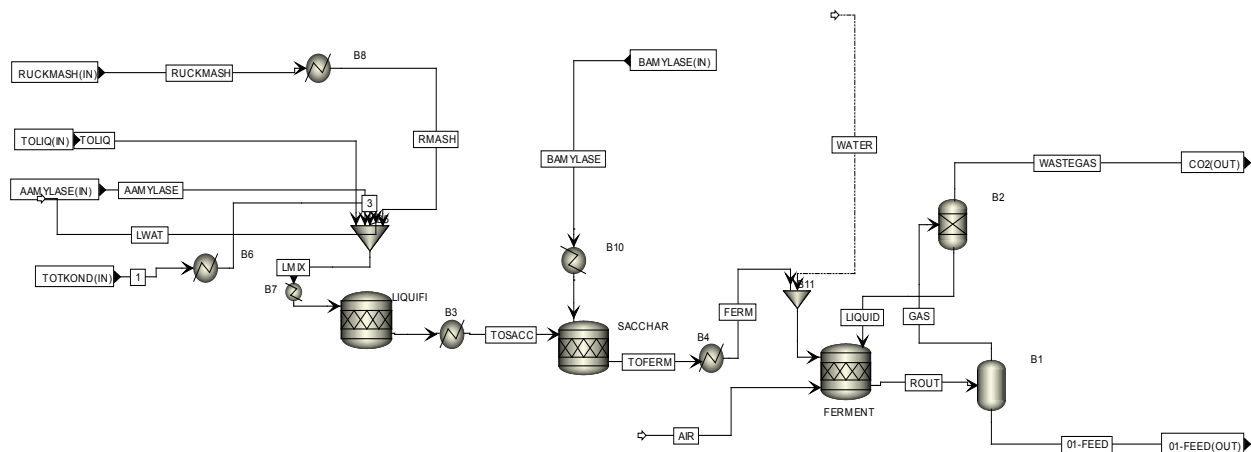
Dass stärkebildende Zuckerhirse durchaus auch als Zwischen/Zweitfrucht geeignet ist in der zukünftigen Produktion von Bioethanol und Biomethan eine Rolle zu spielen, konnte mittels dem Klima Aktiv Projekt Neue Energien 2020 BISUNFUEL dargestellt werden. In einem nächsten Schritt sollte nun erhoben werden, inwieweit weitere stärkeverarbeitende Industrien, welche hauptsächlich Mais und Weizen als Rohstoffgrundlage einsetzen, Zuckerhirse in ihren Produktionsprozess integrieren können, oder welche Züchtungen notwendig sind um diese einsetzen zu können.

5 Literaturverzeichnis

- Amaducci, S., A. Monti, and G. Venturi, Non-structural carbohydrates and fibre components in sweet and fibre sorghum as affected by low and normal input techniques: Industrial Crops and Products, v. 20, p. 111-118., 2004.
- Amon, B., Kyvoruchko, V., Amon, T., und Zechmeister-Boltenstern, S.: Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. Agriculture, Ecosystems & Environment 112: 153-162, 2006.
- Amon, T., Kryvoruchko V., Amon B., Moitzi G., Lyson D., Hackl E., Jeremic D., Zollitsch W., Pötsch E., Mayer K., Plank J., Methanbildungsvermögen von Mais – Einfluss der Sorte, der Konservierung und des Erntezeitpunktes. Endbericht Oktober 2002. Im Auftrag von Pioneer Saaten Ges.m.b.H. Parndorf, 2002.
- Bader R., Kriesel M, Feldfruchternte 2011 Schnellbericht, online www.statistik.at/web_de/Redirect/index.htm?dDocName=060525, letzter Zugriff am 27.02.2014, Statistik Austria, Wien, 2012.
- Barcelos, C. A., Maeda, R. N., Betancur, G. J. V., Pereira, N., Ethanol production from sorghum grains [sorghum bicolor (L.) Moench]: evaluation of the enzymatic hydrolysis and the hydrolysate fermentability. Brazilian Journal of Chemical Engineering 28: 597-604, 2011.
- Beermann, M., Jungmeier, G., Wenzel, A., Spitzer, J., Canella, L., Engel, A., Schmuck, M., und Koller, S.: Quo Vadis Elektroauto? Grundlagen einer Road Map für die Einführung von Elektro-Fahrzeugen in Österreich. Projektbericht im Rahmen des Programms IV2Splus., Graz, 2010.
- BioGrace (2014): BioGrace GHG calculation tool – GHG calculation tool for biofuels and bioliquids approved by the European Commission to verify compliance with the emission saving requirements of the European Union. BioGrace Excel tool - version 4c.xls <http://www.biograce.net/content/ghgcalculationtools/recognisedtool/>, abgerufen am 02.04.2014
- C.A.R.M.E.N (Centrales- Agrar-Rohstoff-Marketing- und Energie-Netzwerk) e.V., http://www.carmenev.de/files/informationen/externe_Veranstaltungen/trocknung.pdf, 2013.
- Clemens, J., Trimborn, M., Weiland, P., und Amon, B: Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. Agriculture, Ecosystems and Environment 112: 171-177. 2006.
- Dellweg, H., Biotechnologie, WILEY-VCH, Weinheim, 1987.
- Dias, M. O. S., Ensinas, A. V., Nebra, S. A., Filho, R.M., Rossell, C. E. V., Maciel, M. R. W., Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process, Chemical Engineering Research and Design 87(9): 1206-1216, 2009.
- Döhler, H., Eurich-Menden, B., und Grimm, E: Ammoniak-Emissionen bei der Ausbringung von Fest- und Flüssigmist sowie Minderungsmaßnahmen, . Kurzfassung der Tagungsbeiträge. 45|03, 20-21. 2001. Kloster Banz, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt. Emissionen der Tierhaltung - Kurzfassung der Tagungsbeiträge, 2001.
- Edelmann, W., Schleiss, K., Engeli, H., und Baier, U.: Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas, Arbeitsgemeinschaft Bioenergie (arbi), 2001.
- Englert H., Lewandowski I., Böhmel C., Vetter A., Hartmann H., Angebaute Biomasse, In Energie aus Biomasse, Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H. (Ed.), Springer Berlin Heidelberg, 75-134, 2009.
- EURALIS Saaten, Sorghum bicolor – Anbauanleitung, http://www.euralis.de/fileadmin/user_upload/3-Produkte/Sorghum/Sorghum-Anbauanleitung.pdf, 2013.
- Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz beim Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umweltschutz und Wasserwirtschaft: Der Sachgerechte Einsatz von Biogasgülle und Gärrückständen im Acker- und Grünland, Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und

- Bodenschutz beim Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umweltschutz und Wasserwirtschaft, 2. Auflage, Wien, AUT, 2007.
- Farrahi-Ashtiani, K, Komplexe Saatzeit-, Schnittzeit-, Stickstoffdüngungsversuche zum Studium der Entwicklung und Futterleistung von Sorghum saccharatum, Gießen., 1964.
- Farré, I., and J. M. Faci, Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment: *Agricultural Water Management*, v. 83, p. 135-143, 2006.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.), Zuckerhirse, eine Form der Mohrenhirse (*Sorghum bicolor*) aus der Gattung *Sorghum* aus der Familie der Süßgräser (*Poaceae*), http://www.fnr.de/fileadmin/fnr/images/aktuelles/medien/Energiepflanzen/PDF/PortraetZuckerhirse_print.pdf, 2007
- Friedl, A., Bioethanol from Starch, In: *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Meyers R. A. (Ed.), Vol. 1, Springer, New York, 987-1001, 2012.
- Gil, M., Gonzalez, A., Gil, A. Evaluation of milling energy requirements of biomass residues in a semi-industrial pilot plant for co-firing, CIRCE, Centre of Research for Energy Resources and Consumption, 2008.
- Green Gas Grids (2013): Greening your Biomethane Production Chain. A best practice guide for reducing greenhouse gas emissions. Discussion Paper Sustainability. <http://www.greengasgrids.eu/activities/sustainability.html>, abgerufen am 02.04.2014
- Geng, S., F. J. Hills, S. S. Johnson, and R. N. Sah, Potential Yields and On-Farm Ethanol Production Cost of Corn, Sweet Sorghum, Fodderbeet, and Sugarbeet: *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 162, p. 21-29., 1989.
- IINIAS – Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien: GEMIS – Globales Emissions-Modell integrierter Systeme, Version 4.8, <http://www.iinas.org/gemis-de.html>, 2013.
- IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, 2007.
- Kresovich, S, Sweet sorghum: *sorghum bicolor* (saccharatum group), in BocaRaton, ed., *CRC Handbook of Biosolar Resources* 2, p. 147-155, 1982
- Köppen, S., Reinhardt, G., und Gärtner, S.: Assessment of energy and greenhouse gas inventories of Sweet Sorghum for first and second generation bioethanol. *FAO Environmental and Natural Resources Service Series*, No. 30 – FAO, Rome, IT, 2009.
- Leible, L., and G. Kahnt, Untersuchungen zum Einfluß von Standort, Saatstärke, N-Düngung, Sorte und Erntezeitpunkt auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe von Zuckerhirse: *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 166, p. 10, 1991.
- Li, S., Li, G., Zhang, L., Zhou, Z., Han, B., Hou, W., Wang, J., Li, T., A demonstration study of ethanol production from sweet sorghum stems with advanced solid state fermentation technology, *Applied Energy* 102(0): 260-265, 2013.
- Lipinsky, E. S., and S. Kresovich, Sorghum as energy crop: *Bio-Energy World Congress and Exposition*, p. 91-93, 1980.
- Monceaux, D. A., Kuehner, D. Dryhouse technologies and DDGS production. *The Alcohol Textbook*, Nottingham University Press, 2009.
- ÖKL (2013): Kraftstoffverbrauch in der Land- und Forstwirtschaft, ÖKL-Richtwerte 2013 – Kraftstoffverbrauch, <http://oekl.at/wp-content/uploads/2010/11/%C3%96KL-RW-2013-Kraftstoffverbrauch.pdf>, abgerufen am 04.04.2014
- Pucker, J., Jungmeier, G., Siegl, S., Pötsch, E.M., Stuhlbacher, A., Ebner-Ornig, F.J., Kirchmayr, R., und Bochman, G.: *Ökobilanz Biogas – Erfolgsfaktoren zur nachhaltigen Nutzung der Biogastechnologie am Beispiel ausgewählter Biogasanlagen. Projektendbericht des Programms „Energie der Zukunft“*, Graz, AUT, 2010.
- RL 2009/28/EG: Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG

- Rohowsky, B., Witzelsperger, J., Remmele, E., Faulstich, M. Preservation of Sweet Sorghum under Anaerobic Conditions by Using Formic Acid as an Additive. 19th European Biomass Conference and Exhibition. Berlin, Germany: 191 – 194, 2011
- Roller, A., D. Bloch, E. Stickse, and M. Fritz, Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff - Sortenscreening und Anbauszenarien (Abschlussbericht des Technologie- und Förderzentrums im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe), Berichte aus dem TFZ, Straubing, Deutschland, Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, p. 139, 2012.
- Schmidt, J., Sipocz, J., Kaszás, I., Szakács, G., Gyepes, A., Tengerdy, R. P., Preservation of sugar content in ensiled sweet sorghum. Bioresource Technology 60(1): 9-13, 1997.
- Sommer, S.G. und Hutchings, N.J.: Ammonia emission from field applied manure and its reduction-- invited paper. European Journal of Agronomy 15, 2001.
- Schuster, W., Versuche über die Anbaueignung von Neuzüchtungen der Morenhirse als Grünfütterpflanze im gemäßigten Klima: Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau, v. 121, 1964.
- Umweltbundesamt: GEMIS-Österreich – Globales Emissions Modell Integrierter System für Österreich, Österreich Datensatz für Version 4.5., Wien, 2009.
- Umweltbundesamt (Winter, R., Pölz, W., Süssenbacher, E, Spanischberger, A., und Bach, H.): Typical Greenhouse Gas Emissions from Cultivation of Agricultural Raw Materials for Use as Biofuel and Bioliquid Data from the Republic of Austria in accordance with Article 19(2) of Directive 2009/28/EC, Umweltbundesamt, Wien, AUT, 2010.
- Theuretzbacher F., B. A., Lizasoain J., Becker M., Rosenau T., Potthast A., Friedl A., Piringer G., Gronauer A., Potential of different Sorghum bicolor (L. moench) varieties for combined ethanol and biogas production in the Pannonian climate of Austria." Energy 55: 107-113, 2013.
- Wulf, S., Jager, P., und Döhler, H.: Balancing of greenhouse gas emissions and economic efficiency for biogas-production through anaerobic co-fermentation of slurry with organic waste. Agriculture, Ecosystems & Environment 112: 178-185, 2005.
- Wulf, S., Maeting, M., und Clemens, J. (2002): Application Technique and Slurry Co-Fermentation Effects on Ammonia, Nitrous Oxide, and Methane Emissions after Spreading: I. Ammonia Volatilization. J Environ Qual 31: 1789-1794, 2002.
- Zegada-Lizarazu, W., and A. Monti, Are we ready to cultivate sweet sorghum as a bioenergy feedstock? A review on field management practices: Biomass and Bioenergy, v. 40, p. 1-12, 2012.



7 Kontaktdaten

DI Mag. Manfred Kirtz

AGRAR PLUS GmbH

Grenzgasse 12, 3100 St. Pölten, Tel.: +43 (0)2742/352234, Fax. +43 (0)2742/352234-4, e-mail;
manfred.kirtz@agrارplus.at, Webpage, www.agrarplus.at, www.bisunfuel.at

Auflistung der weiteren Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen Name / Institut oder Unternehmen

IMPRESSUM

Verfasser

EVM Margarethen am Moos GmbH

Lukas Wannasek
Energiesstraße 9
2433 Margarethen am Moos
Tel: +43 (0)720 316 135
E-Mail: office@evm.at
Web: www.bisunfuel.at

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH