



Universität für Bodenkultur Wien

Department für Nachhaltige Agrarsysteme  
Institut für Landtechnik

## **Optimierung der Biogasherstellung aus Energiepflanzen und landwirtschaftlichen Reststoffen**

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
an der Universität für Bodenkultur Wien

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Alexander Bauer

betreut von  
Ao.Univ.Prof. Dr. Amon Thomas

Wien, Juli 2009

*Darin besteht das Wesen der Wissenschaft.  
Zuerst denkt man an etwas, das wahr sein könnte.  
Dann sieht man nach, ob es der Fall ist und  
im Allgemeinen ist es nicht der Fall.*

Bertrand Russell (1872-1970)

## **Danksagung**

Vor Beginn möchte ich mich bei alle bedanken, die direkt oder indirekt zum Entstehen dieser Dissertation beigetragen und mich auf verschiedenste Weise unterstützt haben.

Bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. Thomas Amon für seine Unterstützung und die konstruktiven Gespräche während der Arbeit.

Ein herzlicher Dank an meine Arbeitskollegen und Freunden, die mich bei der Erstellung der Arbeit immer wieder tatkräftig unterstützt haben.

Ein besonderer Dank meiner Familie, die mich stets unterstützt hat und mir die Erstellung der Arbeit ermöglicht hat.

## **Abstract**

*Biogas production - as a renewable energy source - is of major importance for the sustainable use of agrarian biomass. The technical level of biogas production is high. Nevertheless, the whole process needs to be optimised by developing of logistic concepts, by combining with other conversion technologies, by using of agricultural by-products and intercrops, as well as by pretreating of lignocellulosic biomass.*

*The transport demand of biogas plants is high, due to the high water content of the substrates. For the fermentation residues transportation can be reduced by separation. After separation the residues can be easily transported, stored, and handled at a competitive price.*

*Conventional biogas and bioethanol production features several weak points regarding aspects of sustainability. The combination of these two technologies can result in an optimisation of the whole process in view of energy and material flows. This is a first step into a sustainable biorefinery system.*

*Biogas production can be based on agricultural by- and waste products. By the utilisation of e.g. intercrops and lignocellulosic biomass, approximately 17.5 % of the total European energy demand can be covered by biogas. With such concepts energy production can be carried out without the competition to food and feed production.*

*Straw is often an unused substrate within the agrarian production. After pre-treatment, e.g. with the steam explosion technology, the biomass can be used as substrate for the production of bioethanol and biogas. In first experiments, biogas and ethanol yields from steam exploded wheat straw were analysed. The results show the high energy potential and the advantages of linking these two technologies.*

*In summary, results demonstrate possibilities to optimise the production of biogas. An energy supply based on renewable energy sources and without the dependence of fossil energy sources, can only be realised by optimising the whole process and the linkage of different conversion technologies to biorefinery systems.*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Energiepolitik und Klimaschutz in der europäischen Union	2
1.2 Grundlagen der Biogasproduktion	3
1.3 Stand der Biogastechnologie	4
1.4 Möglichkeiten einer Optimierung der Biogasherstellung	5
1.4.1 Logistik	5
1.4.2 Vorbehandlung von Biomasse	6
1.4.3 Biogas im Bioraffineriekonzept	8
<b>2 Zielsetzung und Abgrenzung der Fragestellung</b>	<b>10</b>
<b>3 Zusammenfassungen der Publikationen</b>	<b>12</b>
3.1 Detailed Monitoring of Two Biogas Plants and Mechanical Solid-Liquid Separation of Fermentation Residues	13
3.2 Technische und ökologische Betrachtung der kombinierten Bioethanol- und Biogasproduktion in nachhaltiger Landwirtschaft	14
3.3 Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of the energy potential from sustainable crop rotation systems in the EU-27	15
3.4 Analysis of Methane Potentials of Steam Exploded Wheat Straw and Estimation of Energy Yields of combined Ethanol and Methane Production	16
<b>4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung</b>	<b>18</b>
<b>5 Literaturverzeichnis</b>	<b>21</b>
<b>6 Publikationen</b>	<b>27</b>

## **1 Einleitung**

## **1.1 Energiepolitik und Klimaschutz in der europäischen Union**

Europa steht vor der großen Herausforderung, eine leistungsfähige, saubere und importunabhängige Energieversorgung aufzubauen. Die Mitgliedsstaaten der europäischen Union haben beschlossen bis 2020 eine Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen um 20%, eine Anhebung des Anteiles an erneuerbaren Energien auf 20 % und eine Erhöhung der Energieeffizienz um 20 % zu realisieren (European Commission, 2006; CGEE, 2007; European Commission, 2009; European Parliament and Council, 2009a). Bis zum Jahr 2020 ist im Bereich des Verkehrs eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission von 120 g auf 95 g pro km und eine Erhöhung des Anteil an erneuerbaren Energien in den Treibstoffen auf 10 % vorgesehen (Commission of the European Communities, 2008). Um diese Ziele erreichen zu können, müssen die zur Verfügung stehenden Ressourcen optimal genutzt werden. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Frage, welche Flächenressourcen und Biomassepotentiale zugänglich sind und wie sie am besten genutzt werden können.

Die Nutzung agrarischer Rohstoffe zur Energieproduktion steht in direkter Konkurrenz zur menschlichen Ernährung (Ruckenbauer, 2008; Leonhartsberger et al., 2008b). Diese Konkurrenz spiegelt sich deutlich in der Preisentwicklung von Lebensmitteln wieder. Mitchell (2008) berichtet, dass der IMF-Index<sup>1</sup> von international gehandelten Lebensmitteln vom Jänner 2002 bis Juni 2008 um 130 % und vom Jänner 2007 bis Juni 2008 um 56 % gestiegen ist. Der Preis von Getreide und Ölsaaten hat sich in den letzten zwei Jahren mehr als verdoppelt. Dieser starke Anstieg kann auf verschiedene Faktoren zurückgeführt werden, zu denen nach Mitchell (2008), FAO (2008) und Glaser (2009)

- Missernten in Australien in den Jahren 2006/2007 und in Europa im Jahr 2007,
- Spekulationen an den internationalen Börsen,
- steigende Nachfrage nach Getreide und Ölsaaten in verschiedenen asiatischen Staaten,
- Anstieg der Produktionskosten und
- Zunahme der Produktion von Biotreibstoffen auf Basis von Energiepflanzen

zählen.

Nach Bo Holm Nielsen et al. (2007) werden 62,4 % der nutzbaren landwirtschaftlichen Fläche für die Produktion von Lebensmitteln und Futtermitteln benötigt werden. Lediglich 20-40 % der europäischen Ackerfläche stehen für die Produktion von Energie und Rohstoffen für die Industrie zu Verfügung. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine nachhaltige Energieversorgung basierend auf Energie aus Energiepflanzen nicht realisiert werden kann.

Für die Herstellung von Bioenergie können landwirtschaftliche Reststoffe genutzt werden. Ein großes Potential liegt in der Nutzung von lignozellulosehaltiger Biomasse wie zum Beispiel Stroh, welches beim Anbau von Getreide, Ölsaaten sowie verschiedenen anderen Kulturen anfällt. Derzeit wird Stroh hauptsächlich zur Produktion von thermischer Energie

---

<sup>1</sup> IMF-Index: Nominaler Dollar Index von Lebensmittelpreisen

genutzt. Um lignozellulosehaltige Biomasse optimal für die Produktion von Biogas, Bioethanol oder Wasserstoff nutzen zu können, ist es notwendig, dass die bestehenden Technologien an diese neuen Rohstoffe angepasst und weiterentwickelt werden. Dadurch kann erreicht werden, dass das gesamte Potential der Biomasse für die Produktion von Bioenergie und Biotreibstoffen der zweiten Generation genutzt werden kann (European Commission Directorate General Joint Research Centre, 2007; European Parliament and Council, 2009).

## 1.2 Grundlagen der Biogasproduktion

Biogas wird in einer anaeroben Atmosphäre und unter Abwesenheit von Licht von Mikroorganismen gebildet. Die Fermentation der organischen Substanz erfolgt in vier Stufen; am Abbau sind hydrolytische, acidogene und acetogene Bakterien sowie methanogene Archaea beteiligt.

In der **ersten Phase**, der sog. **Hydrolyse**, werden durch fakultativ anaerobe hydrolytische Bakterien hochmolekulare organische Substanzen wie Eiweiße, Kohlehydrate, Fette und Zellulose mit Hilfe von Enzymen in niedermolekulare Verbindungen wie Einfachzucker, Aminosäuren, Fettsäuren und Wasser abgebaut. An der Hydrolyse ist eine heterogene Gruppe an Bakterien beteiligt, welche mit Hilfe von extrazellulären Enzymen (Hydrolasen) die Makromoleküle spalten.

In der **zweiten Phase**, der sog. **Acidogenese**, werden die Spaltprodukte der Hydrolyse zu reduzierten Verbindungen wie Carbonsäuren (Essig-, Propion- und Buttersäure), Alkoholen und Gasen (Kohlendioxid und Wasserstoff) abgebaut.

In der **dritten Phase**, der sog. **Acetogenese**, werden von acetogenen Bakterien die Carbonsäuren und Alkohole in Acetat, Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt.

In der **vierten** und letzten **Phase**, der sog. **Methanogenese**, erfolgt die Bildung von Methan, Kohlendioxid und Wasser im alkalischen Milieu durch Methanbakterien. Die Methanogenese kann über zwei verschiedene Reaktionswege erfolgen: Biogas wird zu 70 % unter Verwertung von Acetat von acetogenotrophen Mikroorganismen und zu 30 % unter Verwertung von Wasserstoff und Kohlendioxid von hydrogenotrophen Mikroorganismen gebildet (Madigan et al., 2008).

Die vier Phasen laufen in einer Biogasanlage meistens gleichzeitig ab, wobei sich aber die Geschwindigkeiten der einzelnen Stufen stark unterscheiden. Speziell Zellulosen und Hemizellulosen können von den Bakterien, abhängig vom verwendeten biogenen Material, nur langsam abgebaut werden. Nur bei Substraten, in denen die Kohlenhydrate in einer direkt verfügbaren Form vorliegen, kann die Methanogenese zu dem geschwindigkeitsbestimmenden Schritt werden, da sich in diesem Fall die acetogenen Bakterien schneller vermehren, den pH-Wert im Fermenter absenken und somit die Methanogenese hemmen (Kaltschmitt und Hartmann, 2001). Der optimale pH-Wert für die



Hydrolyse und Acidogenese liegt zwischen 4,5 und 6,3, für die Acetogenese und für Methanogenese zwischen 6,8 und 7,5 (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2004).

Der Biogas- und Methanertrag von organischen Substanzen kann mit Hilfe der von Buswell und Müller (1952) und Boyle (1976) veröffentlichten Formel berechnet werden. Für z. B. Mais mit einer molekularen Zusammensetzung von 37,6 % C, 59,1% H und 29,8 % O können nach Boyle (1976) 18,74 mol Methan und 18,86 mol CO<sub>2</sub> gebildet werden, korrespondierend mit 419,7 l<sub>N</sub>/kg VS Methan und 422,5 l<sub>N</sub>/kg VS CO<sub>2</sub>.

### **1.3 Stand der Biogastechnologie**

Die Biogaserzeugung aus Biomasse spielt im europäischen Kontext der Gewinnung erneuerbarer Energien eine zentrale Rolle. Biogas kann aus verschiedensten Rohstoffen gewonnen werden. Die Palette an potentiellen Rohstoffen reicht von einjährigen Ackerpflanzen (Mais, Cerealien, Zwischenfrüchte) über landwirtschaftliche Abfallprodukte (z.B. Wirtschaftsdünger und Stroh) bis hin zur Verwertung kommunaler und industrieller Abfälle. Die Technologie trägt in besonderer Weise zu einer nachhaltigen Stoff- und Energienutzung bei.

Seit Anfang der 90er Jahren ist in Österreich eine nennenswerte Nutzung von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen zu beobachten. Im Jahr 2002 wurde mit dem Ökostromgesetz der rechtliche Rahmen für den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern geschaffen. Die Festlegung von kostendeckenden Einspeisetarifen für Ökostrom führte zu einem rasanten Zubau von Anlagen. Die garantierte Auszahlungsdauer der Tarife sorgte für die nötige Investitionssicherheit. In Österreich kam es auf Grund der verbesserten rechtlichen Rahmenbedingungen zu einem sprunghaften Anstieg der Anzahl an Biogasanlagen. Der verstärkte Ausbau von Biogasanlagen brachte zusätzlich einen eindeutigen Trend zu leistungsstärkeren Anlagen mit sich. Der durchschnittliche Leistungsbereich von Biogasanlagen lag vor den tariflichen Bestimmungen des Ökostromgesetzes unter 100 kW<sub>el.</sub> und stieg bis Ende 2005 auf durchschnittlich 250 kW<sub>el.</sub> an (E-Control 2005). Bei alleiniger Betrachtung moderner Biogasanlagen, die zwischen 2003 – 2005 in Betrieb gingen, beträgt die durchschnittliche Kapazität bereits rund 320 kW<sub>el.</sub> (Hopfner-Sixt et al., 2006; Hopfner-Sixt und Amon, 2007). Dies zeigt deutlich den anhaltenden Trend zu einer wachsenden durchschnittlichen Anlagengröße auf. Die Tarifbestimmungen des Ökostromgesetzes sehen eine Reduktion des Stromtarifes um 25 % bei Kofermentationsanlagen vor. Dies führte zu einem verstärkten Einsatz von Energiepflanzen. Von den neu errichteten Biogasanlagen wurden bis 2006 ca. 10 % als reine Energiepflanzenanlagen betrieben. Ca. 65 % der Anlagen setzen Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger ein, wobei als Grundsubstrat bei ca. 61 % der Anlagen Schweinegülle und bei ca. 39 % der Anlagen Rindergülle zum Einsatz kommt (Hopfner-Sixt et al., 2006). Organische Abfälle werden zumeist in spezialisierten Abfallvergärungsanlagen vergoren.

Die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen beginnt mit Pflanzenbau, Ernte und Konservierung. Die Techniken hierfür sind ausgereift und im bewährten Praxiseinsatz. Der Einsatz verschiedener Gärrohstoffe in der Biogasanlage ermöglicht den Betrieben eine standortangepasste, ausgewogene Fruchtfolgegestaltung und garantiert in der Biogasanlage eine ausreichende „Fütterung“ der am Vergärungsprozess beteiligten Mikroorganismen. Eine ausgeglichene Substratmischung wirkt sich positiv auf die Stabilität des Gärprozesses aus, wodurch die Produktivität der Biogasanlage gesteigert wird (Weiland, 2003; Schulz und Eder, 2006; Weiland et al., 2007). In Österreich werden in modernen landwirtschaftlichen Biogasanlagen bevorzugt Maisganzpflanzen- und Grassilage eingesetzt. In deutlich geringeren Mengen werden andere Rohstoffe wie Maiskornsilage, Sonnenblumensilage, Vinasse oder Getreideausschutt herangezogen (Hopfner-Sixt et al., 2007).

Die Biogaserzeugung stellt bestimmte Anforderungen an die Qualität und Zusammensetzung der Pflanzen. Ein limitierender Faktor des anaeroben Abbaus liegt dabei in der Vergärung des „Ligno-Zellulose-Komplexes“ in der Biomasse und in der optimalen Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen. Für eine sichere Methangärung mit hohem energetischem Wirkungsgrad ist die richtige Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen im Fermenter der Biogasanlage erforderlich. Die Inhaltsstoffe der Ganzpflanzen (Hauptfrüchte als Rohstoffe für die Biogaserzeugung) sollen dem Bedarf der Methanogenen möglichst entsprechen, d.h. sie sollen nicht zu stark verholzt sein, damit der Abbauprozess zügig vonstatten geht, die Gärung soll stabil verlaufen und das Biogas soll eine hohe Qualität (möglichst viel  $\text{CH}_4$ , möglichst wenig  $\text{CO}_2$  und möglichst wenig Spurenstoffe wie  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  u. a.) besitzen. Der aktuelle Gehalt verschiedener Nährstoffgruppen in der Pflanzenbiomasse beeinflusst im Wesentlichen die Fähigkeit Methan zu bilden, weil die verschiedenen Stoffgruppen ein unterschiedliches Methanbildungsvermögen aufweisen und eventuell vorhandene Zellulose-Lignin-Komplexe den Abbau dieser Stoffgruppen behindern.

Ein optimierter Gärprozess ist Ziel und Notwendigkeit beim Betrieb einer Biogasanlage. Angestrebt wird die bestmögliche Effizienz und Wettbewerbsfähigkeit der Biogaserzeugung. Dazu bestehen gute Möglichkeiten entlang der gesamten Produktionskette vom Acker über die Biogasanlage bis hin zu den verschiedenen Nutzungen des Biogases bzw. des Biomethans und der Nutzung des Düngers (Karpenstein-Machan, 2005; Weiland et al., 2007; Amon et al., 2008).

## **1.4 Möglichkeiten einer Optimierung der Biogasherstellung**

### **1.4.1 Logistik**

Für den Betrieb einer Biogasanlage müssen - bedingt durch den hohen Wassergehalt der verwendeten Substrate - große Volumina an Biomasse von der Ackerfläche zur

Biogasanlage hin und Fermentationsrückstände wieder zurück bewerkstelligt werden. Biogasanlagen mit einer Leistung von 500 kW<sub>el.</sub>, die ausschließlich Energiepflanzen vergären, weisen einen täglichen Substratumsatz von bis zu 38 t FM auf (Karpenstein-Machan, 2005). Für die Produktion der Gärrohstoffe bedeutet dies einen Anbauflächenbedarf von rund 260 ha. Die Bewirtschaftung dieser großen Flächen, die bei Biogasanlagen mit 500 kW<sub>el.</sub> einen Transportradius von bis zu 20 km bedeuten kann, stellen hohe Anforderungen an die logistische Kette.

Die Beschaffung der Gärrohstoffe steht am Anfang der logistischen Kette und damit auch am Beginn der Steuerung der Materialflüsse einer Biogasanlage. Durch gezielte Anbaupläne und Fruchtfolgen sowie einer optimalen Abstimmung der Transporteinheiten wird die grundsätzliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Beschaffung der Rohstoffe ermöglicht. Mittels einer opportunen Lagerung sowie einer kosten- und energieeffizienten Einbringung der agrarischen Rohstoffe in die Biogasanlage kann die Wirtschaftlichkeit auf der Eingangsseite zusätzlich verbessert werden. Am Ende der logistischen Kette steht die Distributionslogistik, welche die notwendigen Transporte des Gärrestes über größere Entfernungen und dessen Verteilung auf den Feldern beinhaltet. Die Nutzung des Gärrestes als Dünger der Rohstoffe dient der weitgehenden Schließung von Stoff- und Energiekreisläufen bei der Biogaserzeugung und stellt ein zentrales Element der Produktionskette dar. Neben dem Nährstoffbedarf der verschiedenen Kulturpflanzen und Düngerrichtlinien stehen hierbei wieder die optimale Abstimmung der Transport- und Verteilungseinheiten im Vordergrund. Eine Aufbereitung des Gärrückstandes durch Separierung hat Auswirkungen auf die Distributionslogistik. Durch die Separierung des Gärückstandes in eine flüssige und feste Phase wird dieser in eine transportwürdige, lagerfähige und gut handhabbare Form gebracht, mit der ein effizienter Nährstoffexport realisiert werden kann.

Für die Bereiche der Beschaffungs- und Distributionslogistik liegen nur wenige Kennzahlen vor. Diese sind notwendig, um Biogasanlagen ökologisch und ökonomisch zu optimieren. So kann z.B. durch die Abstimmung der beiden Ketten „Ernte – Transport“ und „Transport – Gärrestausrückführung“ eine Steigerung der Effizienz der langen Transportwege großer Biogasanlagen erreicht werden. Die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen ist von zentraler Bedeutung, um eine langfristige Marktdurchdringung dieser Technologie zu gewährleisten.

#### **1.4.2 Vorbehandlung von Biomasse**

Die Substratkosten machen einen Großteil der laufenden Kosten für den Betrieb einer Biogasanlage aus. Heissenhuber und Berenz (2006) führen steigende Rohstoffkosten als größtes Risiko für den wirtschaftlichen Betrieb einer Biogasanlage auf Basis nachwachsender Rohstoffe an. Die in der Biomasse enthaltenen Inhaltsstoffe müssen zu einem möglichst hohen Anteil abgebaut werden können, damit daraus ein optimaler Ertrag erzielt werden kann (Boussaid et al., 1999).

In der Substrataufbereitung liegt ein großes Potential zur Optimierung der Gesamtanlage. Art und Umfang der Substrataufbereitung beeinflussen den Ablauf des Gärprozesses und damit die Ausnutzung des energetischen Potentials der verwendeten Substrate. Ziel der Aufbereitung ist es, den methanbildenden Mikroorganismen optimale Bedingungen zu bieten (Angelidaki und Ahring, 2000; Keller et al., 2003; Lehtomäki et al., 2006; Amon et al., 2006b; Schumacher et al., 2007; Arnell, 2009)

Das Hauptproblem des anaeroben Abbaus liegt in der Vergärung des „Ligno-Zellulose-Komplexes“ in der Biomasse und in der optimalen Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen. Die Zellwandmatrix ist bei Pflanzen mehr oder weniger stark mit Lignin inkrustiert (Klupsch, 2000; Amon et al., 2005; Amon et al., 2006a), was dazu führt, dass Teile der abbaubaren Biomasse für die Mikroorganismen nicht zugänglich sind. Durch eine Vorbehandlung kann die im Substrat vorhandene Cellulose, Hemicellulose und z.T. Lignin teilweise aufgespaltet werden, wodurch die Abbaubarkeit der Substrate ansteigt. Zudem kann durch Vorbehandlungen bei cellulosehaltigem Ausgangsmaterial die Hydrolyse der Cellulose beschleunigt und somit die Abbaugeschwindigkeit erhöht werden (Kaltschmitt und Hartmann, 2001).

Verschiedene chemische, enzymatische/biologische und physikalische Verfahren können für die Vorbehandlung verwendet werden.

Für **chemische Vorbehandlungen** werden Säuren, Laugen, Ammoniak und Harnstoff, Enzyme und andere Substanzen eingesetzt. In der Papierindustrie wird der „Kraft Lignin Prozess“ verwendet, um aus Holz Zellulose zu gewinnen. Für den Aufschluss wird Holz mit Natriumlauge bei Temperaturen von 155 – 175°C behandelt (Lignin Institute, 2001). Erste Versuche am Institut haben gezeigt, dass nach einer Vorbehandlung von Stroh mit Lauge sehr hohe Methanerträge erzielt werden können (Bauer et al., 2007a). Auch Untersuchungen von Lehtomäki et al. (2006) und Angelidaki & Ahring (2000) zeigen, dass eine Vorbehandlung mit Natronlauge von Biomasse zu einer Erhöhung der Biogasausbeute führen.

Ein weiteres Verfahren ist der „Organosolv Lignin Prozess“, welcher ebenfalls aus der Papierindustrie stammt. Dabei werden Säuren und andere organische Lösungsmittel verwendet. Für die Bearbeitung von Biomasse ist die Verwendung einer Mischung von Essigsäure und Ameisensäure, Alkohol sowie anderen organischer Lösungsmittel möglich. Organische Lösungsmittel sind im Fermenter abbaubar. Diese Prozesse spalten oder lösen Lignin im Substrat sehr wirksam auf (Mosier et al., 2005; Berlin et al., 2006).

Aus der Abwassertechnik stammt die Vorbehandlung der Biomasse mit einem starken Oxidationsmittel, z.B.: Wassertoffperoxid oder Ozon. Diese Oxidationsmittel können den Lignozellulosekomplex spalten, sodass die Zellulose und Hemizellulose von den Mikroben abgebaut werden kann (Brattenberger, 2000).

Zu den **biologischen Verfahren** zählen der Einsatz von Mikroorganismen und Enzymen. Um die rigiden chemischen Struktur der Biomasse zu lösen ist es vor allem notwendig, den Lignozellulosekomplex durch den Abbau des Lignins zu lösen. In der Natur gibt es mehrere

Organismen, die ligninhaltige Substrate verwerten können. Dazu zählen u. a. Lignin-abbauende Pilze, wie die „White-Rot“ Pilze, bei denen vom Lignin eine „weiße“ Substanz übrig bleibt. „White-Rot“ Pilze bilden Cellulasen und Hemicellulasen, die einen gewissen Abbau von Zellulose- und Hemizellulose-Polymeren zu Oligomeren durchführen können, da die Energieausbeute aus der Ligninzersetzung extrem gering ist (Call und Mücke, 1997; Costa et al., 2002; Keller et al., 2003; Diguta et al., 2007).

Zu den **physikalische Verfahren** zählen unter anderem mechanische Zerkleinerung sowie Druck und Temperatur. Eine mechanische Zerkleinerung wirkt sich positiv auf die Abbaubarkeit von Substraten aus. Je stärker ein Substrat zerkleinert wird, umso größer wird dessen Oberfläche und somit die Angriffsfläche für den mikrobiellen Abbau. Sowohl für eine Silierung als auch für die spätere Vergärung ist eine Zerkleinerung wichtig. Hierzu wird das Substrat zumindest mit einem Kurzschnittwagen, besser aber mit einem Exaktfeldhäcksler bei der Ernte zerkleinert. Eine weitere Aufbereitung kann auch direkt bei der Substrateinbringung in den Fermenter durch eine Zerkleinerungstechnik im Vorlagebehälter erfolgen. Die Zerkleinerung bewirkt eine schnellere Abbaugeschwindigkeit und führt somit zu einer kürzeren hydraulischen Verweilzeit im Fermenter. Je kleiner das Substrat, desto unproblematischer verhalten sich Substratmischungen beispielsweise aus Flüssigmist und Grüngut (Sharma et al., 1988; Torrescastillo et al., 1995; Mundhenke et al., 2002; Öchsner und Helffrich, 2005).

Ein thermisch-physikalisches Verfahren ist die sog. „Steam explosion“. Durch „Steam explosion“ wird sowohl auf der morphologischen als auch auf der molekularen Ebene eine mehr oder weniger starke Zerstörung der Struktur erreicht. Dabei spielen einerseits verschiedene chemische Prozesse, die bei hohen Temperaturen und Drücken in der Biomasse ablaufen, als auch mechanische Belastungen, die durch die plötzliche Entspannung der Biomasse entstehen, die entscheidende Rolle. Bei der Steam explosion verdampft das in der Biomasse enthaltene überhitzte Wasser plötzlich („popcorn-Effekt“) (Zimbardi et al., 1999; Prechtel und Stahl, 2000; Schneider et al., 2004; Zimbardi et al., 2007; Prechtel et al., 2008; Sassner et al., 2008).

### 1.4.3 Biogas im Bioraffineriekonzept

In der Vergangenheit wurden bereits verschiedenste Technologien zur energetischen und stofflichen Nutzung von Biomasse entwickelt. Einzeln betrachtet weisen diese Technologien zum Teil nicht geschlossene Stoffflüsse und somit einen Anfall von nicht verwertbaren Reststoffen auf. Durch eine Kombination dieser Technologie zu so genannten „Bioraffinerie-Systemen“ ist es allerdings möglich, die bei den Prozessen anfallenden Reststoffe und Energien optimal zu nützen.

„Bioraffinerie-Systeme“ sind komplexe und integrierte Systeme aus nachhaltigen, umweltfreundlichen Prozessen und Technologien, in denen Biomasse in verschiedene Produkte umgewandelt, sowie Energie produziert wird (Kamm und Kamm, 2004; Smith, 2005; Fernando et al., 2006; Kamm und Kamm, 2007).

Die Vielzahl der in Biogasanlagen verwertbarer Biomasse ermöglicht eine Anpassung an unterschiedliche Standorte und landwirtschaftliche Betriebsausrichtungen und bewirkt das hohe Potential der Biogasanlagen in nachhaltigen „Bioraffinerie-Systemen“. Um jedoch eine Konkurrenz der Energieproduktion zur Lebensmittelproduktion zu vermeiden, muss über so genannte integrierte Erzeugungssysteme eine vollständige Nutzung der Ressourcen angestrebt werden (Kamm und Kamm, 2007).

Die Herausforderung an ein nachhaltiges „Bioraffinerie-System“ ist eine effiziente Kombination von neuen und bereits umgesetzten Technologien (z.B. Biodiesel, Bioethanol, Biogas) sowie eine optimierte Rohstoffbereitstellung durch integrierte Fruchtfolgesysteme (Kamm und Kamm, 2004; Amon und Leonhartsberger, 2008; Taylor, 2008; Thomsen und Haugaard-Nielsen, 2008; Leonhartsberger et al., 2008c). Solche Systeme bringen die höchste Effizienz der Nutzung von Biomasse für Lebensmittel, Futtermittel und Energieproduktion.

Der Anbau von Mais, Weizen, Gerste, Zuckerrüben und Sonnenblumen sind ein Beispiel einer integrierten nachhaltigen Fruchtfolge. Mit dieser Fruchtfolge können gleichzeitig Lebensmittel, Futtermittel und Energie in Form von Biogas und Ethanol produziert werden.

Die Ethanol-Herstellung aus nachwachsenden Rohstoffen greift auf eine jahrhundertelange Tradition zurück und ist an sich technologisch ausgereift. Die europa- und weltweit in Betrieb befindlichen Bioethanolanlagen zeichnen sich durch hohe Produktionskapazitäten und optimierte Wärmeintegration einzelner Anlagenteile aus. Die Herstellung des regenerativen Treibstoffs Ethanol erfolgt überwiegend unter Einsatz fossiler Energien, wobei die Trocknung der Schlempe zum verkaufsfähigen Tierfutter DDGS (Distillers' Dried Grains and Solubles) für etwa 50 % des Energiebedarfs verantwortlich ist, allerdings einen positiven Beitrag zur Wirtschaftlichkeit leistet.

Ein Beispiel einer effizienten Koppelung stellt die Kombination der Bioethanol- und Biogasproduktion dar. Bei der Bioethanolherstellung wird ein hochwertiger regenerativer Treibstoff produziert. Die als Reststoff anfallende Schlempe ist für die Biogasherstellung ein wertvoller Rohstoff. Im Gegenzug dazu kann die bei der Biogasproduktion entstehende Abwärme für die Destillation des Ethanols genutzt werden, wodurch die stoffliche und energetische Effizienz beider Technologien wesentlich erhöht wird (Bauer et al., 2007).

Die Biogaspotentiale sind größer als bislang angenommen, da sich neben Wirtschaftsdüngern und Reststoffen aus der Landwirtschaft neue Möglichkeiten der Biomasseerzeugung in vielfältigen Fruchtfolgen bieten (Amon et al., 2007; Bauer et al., 2007b). Darüber hinaus ermöglicht die Biogastechnologie eine Integration verschiedenster Nebenprodukte aus der Nahrungs- und Energieindustrie sowie der Biotreibstoffherzeugung (Amon et al., 2008; Leonhartsberger et al., 2008a).

## **2 Zielsetzung und Abgrenzung der Fragestellung**

Biogas kann aus verschiedensten organischen Substanzen produziert werden. Der technische Stand der Biogasherstellung ist hoch, jedoch besteht in verschiedenen Bereichen noch Optimierungsbedarf.

Im Rahmen der Dissertation wurde ermittelt, wie die Biogasherstellung optimiert werden kann, sodass eine nachhaltige Energieproduktion gewährleistet werden kann. Aus diesem Grund wurden folgende Forschungsfragen zum Thema „Optimierung der Biogasherstellung“ bearbeitet:

- Wie kann bei großen Biogasanlagen bei der Vergärung von Wirtschaftsdüngern und Energiepflanzen der Aufwand für den Transport minimiert werden?
- Wie kann die bei der Biogasherstellung entstehende Abwärme sinnvoll genutzt werden? Ist eine Kombination der Biogas- und Ethanolherstellung technisch möglich und ökologisch sinnvoll? Welche Vor- und Nachteile kennzeichnen das System?
- Ist eine Biogasherstellung auf Basis landwirtschaftlicher Rohstoffe ohne Konkurrenz zur Lebens- und Futtermittelherstellung möglich? Wie hoch sind die Methan und Energieerträge von Zwischenfrüchten und landwirtschaftlichen Reststoffe. Wie hoch ist das Energiepotential bei Nutzung von Zwischenfrüchte und landwirtschaftlicher Reststoffe auf der Ackerfläche der EU-27?
- Kann lignozellulosehaltige Biomasse zur Herstellung von Biogas- und Bioethanol verwendet werden? Welche Potentiale stecken in einer Kombination der Biogas- und Ethanolherstellung auf Basis von Weizenstroh?

Zu jedem dieser Punkte wurde eine Publikation verfasst. Im folgenden Kapitel sind die Ziele und Ergebnisse der einzelnen Publikationen zusammengefasst.



### **3 Zusammenfassungen der Publikationen**

### **3.1 Detailed Monitoring of Two Biogas Plants and Mechanical Solid-Liquid Separation of Fermentation Residues**

Alexander Bauer, Herwig Mayr, Katharina Hopfner-Sixt, Thomas Amon

*Journal of Biotechnology* 142 (2009) 56–63; doi:10.1016/j.jbiotec.2009.01.016

Der Energiepflanzenbedarf von großen Biogasanlagen ist beträchtlich und stellt für die Anlagenbetreiber eine nicht zu vernachlässigende Herausforderung an die Logistik dar. Auf *Status: veröffentlicht am* Grund des in der Regel hohen Wassergehaltes der vererteten Rohstoffe müssen pro kWh erzeugte Energie verhältnismäßig große Massen antransportiert, gelagert und als Gärrest wieder abtransportiert werden.

Die Publikation präsentiert die Ergebnisse eines Monitoring von zwei Biogasanlagen und von Untersuchungen über das Separieren von Biogasgülle. Die untersuchten Biogasanlagen wurden für die Vergärung von Energiepflanzen entwickelt.

Bei Biogasanlage 1 (Betriebsbeginn 2005) handelt es sich um eine „Ring in Ring“ Anlage mit 500 kW<sub>el.</sub> Leistung. „Ring in Ring“ Anlagen arbeiten zweistufig, d.h. sie haben einen Haupt- und einen Nachfermenter, wobei beide Fermenter stehend und volldurchmischt sind. Bei Biogasanlage 2 (Betriebsstart 2006) handelt es sich um eine „Rückert“ Anlage. Das System „Rückert“ arbeitet im Gegensatz zu dem „Ring in Ring“ System einstufig ohne Nachfermenter. Der Fermenter bei Biogasanlage 2 ist für die Verwertung von strukturhaltigen Eingangsstoffen konzipiert. Die installierte elektrische Leistung liegt bei beiden Biogasanlagen bei 500 kW<sub>el.</sub> Die Verweilzeit der organischer Masse im Fermenter schwankt zwischen 45,0 und 83,7 Tagen. Bezogen auf ein Kilogramm organischer Substanz konnten zw. 0,40 und 0,43 Nm<sup>3</sup> Methan erzeugt werden. Daraus resultiert ein Abbaugrad der Biomasse von 77,3 bis 82,1 %.

Bei der Separierung von Gärrückständen wurden zwei verschiedene Separatortypen (Pressschneckenseparator und Siebtrommelseparator) eingesetzt. Durch die Separierung des Gärrückstandes wird der Gärrückstand in eine transportwürdige, lagerfähige und gut handhabbare Form gebracht, mit der ein Nährstoffexport preiswürdig realisiert werden kann. Die Untersuchungen mit zwei verschiedenen Separatortypen zeigen, dass der Pressschneckenseparator für Biogasgülle eindeutig besser geeignet ist als der Siebtrommelseparator. Besonders die hohen Durchsatzleistungen und die guten Abscheidegrade sprechen für den Pressschneckenseparator. Weitere Vorteile sind der geringe Arbeitszeitbedarf während des Betriebs und die Wartungsfreundlichkeit. Um mit dem Siebtrommelseparator ähnliche Ergebnisse zu erreichen, müssten vor allem die Kunststoffdruckwalze und das Trommelsieb an die in modernen Biogasanlagen vorherrschenden substratspezifischen Gegebenheiten, vor allem Temperaturen und TS-Gehalt, angepasst werden.

Der Abscheidegrad bei der Separierung der Gülle ist von den TS-Gehalten des Gärrückstands abhängig. Je höher der TS-Gehalt ist, desto höher ist der Anteil der festen

Phase nach der Separierung. Der Gärrückstand konnte im Projekt in 79,2 % flüssige Phase mit einem TS-Gehalt von 4,5 % und 20,8 % feste Phase mit einem TS-Gehalt von 19,3 % aufgeteilt werden. Die Trockensubstanz, die organische Trockensubstanz und damit zusammenhängend der Kohlenstoffgehalt sowie die Rohasche und das Phosphat werden - bezogen auf die Masse - in der festen Phase stark akkumuliert. Der Stickstoff sowie der Ammoniumstickstoff werden in der festen Phase leicht angereichert. Lediglich der Gehalt an Kalium nimmt in der festen Phase leicht ab.

### **3.2 Technische und ökologische Betrachtung der kombinierten Bioethanol- und Biogasproduktion in nachhaltiger Landwirtschaft**

Alexander Bauer<sup>a</sup>, Bettina Liebmann<sup>b</sup>, Anton Friedl<sup>b</sup>, Gernot Gwehenberger<sup>c</sup>, Michael Narodoslowsky<sup>c</sup> und Thomas Amon<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universität für Bodenkultur, Institut für Landtechnik, Peter-Jordan-Str. 82, 1190 Wien; <sup>b</sup> Technische Universität Wien, Getreidemarkt 9/166, 1060 Wien; <sup>c</sup> Technische Universität Graz, Inffeldgasse 21b, 8010 Graz

#### *Status unter Begutachtung*

Die EU-Richtlinie zur Förderung des Einsatzes von Biokraftstoffen und der Abänderung der österreichischen Kraftstoffverordnung lässt einen Anstieg der Bedeutung von Biotreibstoffen in den kommenden Jahren erwarten. Die konventionelle Bioethanol-Herstellung weist jedoch Schwächen in Bezug auf die Nachhaltigkeit auf: Zur Energieversorgung des Prozesses werden nach wie vor fossile Rohstoffe eingesetzt. Durch den Transport der großen Rohstoffmengen werden zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionen frei.

Im der Publikation werden Konzepte für dezentrale Klein-Bioethanolanlagen (1.000, 5.000, 10.000 Jahrestonnen) mit dem Rohstoff Weizen vorgestellt. Mit Hilfe von Prozesssimulationen wurde eine alternative Energieversorgungsvariante für die Bioethanol-Herstellung über die Biogas-Produktion aus Schlempe und Co-Substraten entwickelt. Wird aus Schlempe und anderen landwirtschaftlichen Reststoffen Biogas produziert, ergeben sich neben der Energiegewinnung auch Vorteile wie z. B. die Umwandlung in einen gut pflanzenverträglichen Dünger. Bei der Biogasproduktion aus Stroh bleibt zudem ein Teil des Kohlenstoffs, der nicht für die Biogasbildung von den Mikroorganismen verwendet wird, sowie ein Großteil von Stickstoff, Phosphor und Spurenelementen in den Gärrückständen zurück, wodurch eine nachhaltige Bewirtschaftung der Ackerflächen ermöglicht wird.

Biotreibstoffsysteme, die rein auf erneuerbaren Ressourcen basieren, zeigen deutliche ökologische Vorteile gegenüber herkömmlichen Strategien der Ethanolherstellung mit Hilfe fossiler Energiequellen. Betrachtet man die möglichen ökologischen Vorteile dieses Systems (z. B. ist eine Reduktion des ökologischen Druckes gegenüber fossilen Treibstoffen zwischen 85 und über 90 % erreichbar), so stellen die kombinierte Produktion von Ethanol und Biogas eine interessante Alternative für eine nachhaltige Treibstoffversorgung dar. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Biogas auf Erdgasqualität aufzubereiten und ins Erdgasnetz

einzuspeisen, so dass dieser Energieträger auch in urbanen Zentren zum Einsatz kommen kann.

Die Bioethanolerzeugung kann optimal mit der Biogaserzeugung kombiniert werden. Durch die Verbindung beider Konversionstechnologien ist das Gesamtkonzept stofflich und energetisch optimiert, und ein erster Schritt in Richtung integrierte nachhaltige „Bio-Raffinerie-Systeme“ gesetzt.

Wirklich nennenswerte Reduktionen des ökologischen Druckes industrieller Produktionen sind nur erreichbar, wenn neben der technologischen Änderung auch eine Änderung des logistischen Systems einhergeht. Eine Industrie, die die Prinzipien der Nachhaltigkeit verfolgt, muss die Frage der „economy of scale“ mit der Frage der „ecology of scale“ verknüpfen: Kleinere, dezentrale Einheiten mit integriertem Energiemanagement auf Basis erneuerbarer Energieformen haben hier einen eindeutigen strukturellen Vorteil.

### ***3.3 Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of the energy potential from sustainable crop rotation systems in the EU-27***

Alexander Bauer<sup>a</sup>, Christian Leonhartsberger<sup>a</sup>, Barbara Amon<sup>a</sup>, Peter Bösch<sup>b</sup>, Anton Friedl<sup>b</sup>, Thomas Amon<sup>a</sup>

<sup>a</sup> University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Division of Agricultural Engineering, Peter-Jordan-Strasse 82, 1190 Vienna, Austria;; <sup>b</sup> Vienna University of Technology, Getreidemarkt 9/166, 1060 Vienna, Austria

*Accepted: Clean Technologies and Environmental Policy, Springer Berlin / Heidelberg*

In den vergangenen Jahren stieg die Produktion von erneuerbaren Energien stetig an. Ein erheblicher Teil der erneuerbaren Energien wird aus Biomasse der Landwirtschaft produziert. Da die landwirtschaftliche Fläche begrenzt ist, steht die Energieproduktion in direkter Konkurrenz zu der Produktion von Lebens- und Futtermitteln. Um die Konkurrenz um Land zu minimieren, sind Konzepte notwendig, die auf Biomasse und Reststoffen basieren und somit keine Konkurrenz zur menschlichen Ernährung darstellen.

In der Landwirtschaft fallen verschiedene Reststoffe an, die zurzeit nur zu einem geringen Anteil genutzt werden. Die Nutzung von lignozellulosehaltiger Biomasse in einer Biogasanlage ist mit der bestehenden Technik nur bedingt möglich. So kann Stroh im Gegensatz zu Reststoffen wie z. B. Zwischenfrüchte nur nach einer Vorbehandlung verwertet werden.

In der vorliegenden Publikation wird das Energiepotential von einer Fruchtfolge bei zwei unterschiedlichen Nutzungsinteressen verglichen.

Bei der ersten Variante werden auf 20% der Ackerfläche der EU-27 Energiepflanzen angebaut. Die in diesem System produzierte Biomasse wird ausschließlich für die Biogas- und Bioethanolproduktion verwendet.

Bei der zweiten Variante werden auf der gesamten Ackerfläche der EU-27 primär Lebens- und Futtermittel sowie Rohstoffe für die Industrie produziert, wobei die Reststoffe energetisch als Biogas genutzt werden.

Das Ertragspotential der verschiedenen Ackerfrüchte wurde aus der Literatur erhoben bzw. selbst in Feldversuchen ermittelt. Das Methanpotential der verschiedenen Substrate der Fruchtfolge, sowie das mit dem Vorbehandlungsverfahren „Steam explosion“ vorbehandelte Stroh wurde im Labor nach VDI 4630 ermittelt.

Die Ergebnisse der Berechnungen haben gezeigt, dass im System „Anbau von Energiepflanzen“ pro Hektar und Jahr 190 GJ Energie produziert werden können. Im Vergleich dazu kann im „integrierten System“ bei der Nutzung von Reststoffen 126 GJ pro Hektar und Jahr produziert werden. Die in der EU-27 zu Verfügung stehende Ackerfläche beträgt 108 Millionen Hektar. Bei der Annahme, dass 20 % dieser Fläche für die Energieproduktion zur Verfügung stehen, beträgt das Energiepotential beim Anbau von Energiepflanzen 4,104 PJ pro Jahr. Werden hingegen aber Reststoffe und Zwischenfrüchte, welche beim Anbau von Lebens- und Futtermitteln anfallen, genutzt, so beträgt das Energiepotential der EU-27 13.600 PJ. Dieses Potential ist um den Faktor 3,3 höher als im System „Anbau von Energiepflanzen“. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesem integrierten System die gesamte zur Verfügung stehende Ackerfläche gleichzeitig für die Lebens- und Futtermittelproduktion sowie für die Energieproduktion genutzt werden kann.

Wird das Energiepotential des integrierten Systems mit dem gesamten Energieverbrauch der EU-27 verglichen, so wird ersichtlich, dass 17,5 % des europäischen Energiebedarfs über Reststoffe gedeckt werden. Dieser Anteil kann weiter erhöht werden, wenn Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz zu einer Reduktion des gesamten Energieverbrauchs erfolgreich umgesetzt werden können.

### ***3.4 Analysis of Methane Potentials of Steam Exploded Wheat Straw and Estimation of Energy Yields of combined Ethanol and Methane Production***

Alexander Bauer<sup>a</sup>, Peter Bösch<sup>b</sup>, Anton Friedl<sup>b</sup>, Thomas Amon<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Department of Sustainable Agricultural Systems, Division of Agricultural Engineering*

<sup>b</sup> *Vienna University of Technology*

*Journal of Biotechnology 142 (2009) 50–55; doi:10.1016/j.jbiotec.2009.01.017*

Erneuerbare Energieträger können wesentlich zur Reduktion von Treibhausgasen beitragen. Die Ziele der europäischen Union - eine Reduktion der Treibhausgase um 20 % bis 2020 - können aber nur dann erreicht werden, wenn verschiedenste Substrate energetisch genutzt werden. Reststoffe wie Stroh sind nur nach einer Vorbehandlung effizient für die Biogas- und Bioethanolproduktion nutzbar. Eine effiziente Vorbehandlung kann mit Hilfe des

„Steam explosion“ Verfahrens erzielt werden, bei welchem auf die Biomasse Temperaturen von bis zu 240 °C und Drücke von bis 20 bar einwirken.

Die Publikation präsentiert ein Konzept einer kombinierten Bioethanol- und Biogasproduktion. In einem ersten Schritt wurde Weizenstroh bei verschiedenen Zeit-Temperaturkombinationen vorbehandelt. In einem zweiten Schritt wurde das Biogas- und Methanpotential des vorbehandelten Strohs in Laborversuchen nach VDI 4630 ermittelt. Parallel dazu wurde der Gehalt an C6-Zuckern nach einer enzymatischen Hydrolyse ermittelt und das theoretische Bioethanolpotential berechnet. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde das Biogas- und Methanpotential der Ethanoltschleime abgeschätzt.

Durch die Vorbehandlung des Strohs konnte der Methanertrag im Vergleich zur Kontrollvariante um 20 % auf 331 l<sub>N</sub> pro kg oTS (organische Trockensubstanz) erhöht werden. Der im Labor gemessene spezifische Methanertrag von Stroh (275 l<sub>N</sub> pro kg oTS) ist in der Praxis nicht erreichbar, da das Stroh für die Laborversuche zerkleinert wurde. Zudem kommt es in der Praxis bei der Verwendung von Stroh zu der Bildung einer Schwimmschicht, welche im Laufe der Zeit zu Störungen in der Biogasanlage führt. Der theoretische maximale Ethanolertrag pro kg Stroh liegt bei 0,249 kg/kg Stroh. Aufgrund des nach einer enzymatischen Hydrolyse gemessenen Gehaltes an C6-Zuckern kann bei einer Vorbehandlung des Strohs für 10 min bei 200 °C ein maximaler Ethanolertrag von 0,200 kg/kg Stroh erwartet werden. Das entspricht einer Umsetzung von 80 % des theoretischen Potentials.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine kombinierte Produktion von Bioethanol und Biogas aus Stroh möglich ist. Um die Kombination der beiden Technologien erfolgreich in der Praxis zu realisieren, sind weitere Untersuchungen notwendig, welche

- den Effekt von der während der Vorbehandlung gebildeten Inhibitoren auf die Biogas- und Bioethanolerträge im Detail untersuchen und
- aufzeigen, wie die Erträge der beiden Konversionstechnologien bei optimalen Vorbehandlungsparametern weiter erhöht werden können.

Das vorgestellte System ermöglicht die Herstellung von Ethanol und Biogas aus Weizenstroh. Das Biogas kann in einem BHKW zu Strom umgewandelt und die dabei entstehende Abwärme in der Bioethanolherstellung effizient verwertet werden. Aufgrund des hohen Wasseranteils des Gärrests bei der Biogasherstellung ist eine ökologisch sinnvolle Umsetzung nur in regional angepassten Systemen möglich. Nur bei kurzen Transportdistanzen können Energieaufwendungen für den Transport von Biomasse und Gärrückständen minimiert werden.

Das vorgestellte Konzept ist ein Ausgangspunkt für die Entwicklung von Bio Raffinerie Systemen basierend auf lignozellulosehaltiger Biomasse. Das Konzept kann in bestehende Systeme integriert werden und eröffnet die Möglichkeit der Nutzung von Stroh. Das System kann dahingehend erweitert werden, sodass Rohstoffe für die Industrie wie Lignin, Zellulose, Hemicellulose, Aminosäuren und organische Säuren hergestellt werden.

## **4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung**

Die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen zeigen, dass die Biogasherstellung wesentlich optimiert werden kann.

Die in der Publikation **„Detailed Monitoring of Two Biogas Plants and Mechanical Solid-Liquid Separation of Fermentation Residues“** veröffentlichten Ergebnisse veranschaulichen, dass durch eine Separierung der Fermentationsrückstand in zwei Fraktionen mit unterschiedlichen Eigenschaften aufgeteilt werden kann. Die feste Fraktion, welche den Großteil der organischen Substanz beinhaltet, kann als Dünger für humuszehrende Kulturen verwendet werden. Durch die Reduktion des Trockensubstanzgehaltes in der flüssigen Fraktion ist zu erwarten, dass dieser Teil des Gärrückstandes schneller in den Boden infiltriert, wodurch eine Reduktion der Emission von umwelt- ( $\text{NH}_3$ ) und klimarelevanten Gasen ( $\text{N}_2\text{O}$ ) zu erwarten ist. Eine detaillierte Erhebung der Wirkungsweisen der zwei Fraktionen auf das Pflanzenwachstum sowie die Auswirkungen der Separierung auf die Emission von Treibhausgasen muss in zukünftigen Forschungsprojekten geklärt werden.

Die Ergebnisse der Publikation **„Technische und ökologische Betrachtung der kombinierten Bioethanol- und Biogasproduktion in nachhaltiger Landwirtschaft“** zeigen, dass eine technisch und ökologisch sinnvolle Biogasherstellung auf Basis von Ethanol- und Energiepflanzen möglich ist. Die bei der Verstromung des Biogases entstehende Abwärme kann in der Ethanolanlage genutzt werden, wodurch der Bedarf an fossilen Energieträgern sinkt. Auf der anderen Seite kann die Schlempe in der Biogasanlage genutzt werden. Die Kombination der zwei Konversionstechnologien führt somit zu einer Optimierung. Eine ökologisch sinnvolle Kombination ist aber nur bis zu einer bestimmten Größe möglich, da mit zunehmender Größe der Biogasanlagen der Energiebedarf für den Transport linear ansteigt. Maßnahmen werden notwendig, welche den Aufwand für den Transport reduzieren können. Die Separierung des Gärrückstandes ist der erste Schritt einer Aufbereitung des Fermentationsrückstandes. Das Transportvolumen kann reduziert werden und somit auch der Transportaufwand für den Fermentationsrückstand von der Biogasanlage auf landwirtschaftliche Flächen. Gerade bei Substraten mit hohem Wassergehalt wie z.B. Ethanol-Schlempe gilt es, den Aufwand für den Transport zu reduzieren.

Die Produktion von Biogas und Bioethanol sollte in ökologischen Fruchtfolgesystemen erfolgen, in denen primär Lebens- und Futtermittel produziert und nur Reststoffe für die Energieproduktion genutzt werden. In **„Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of the energy potential from sustainable crop rotation systems in the EU-27“** wurde das Energiepotential einer kombinierten Biogas und Ethanolproduktion berechnet. Bei einer Nutzung von Nebenprodukten und Reststoffen für die Energieproduktion können über 17,5% des europäischen Energiebedarfs gedeckt werden. Dieser Anteil kann deutlich erhöht werden, wenn Maßnahmen ergriffen werden, die den Energiebedarf Europas reduzieren. Die Landwirtschaft kann dabei einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung des Konzeptes der Nachhaltigkeit leisten. Bilden ökologische Fruchtfolgen die Basis der landwirtschaftlichen Produktion, so können der



Bedarf an mineralischen Düngemitteln, Pflanzenschutzmitteln und der Energieaufwand für die Bewirtschaftung der Felder deutlich reduziert werden. Eine einfache Maßnahme wie z.B. die Integration einer Leguminose in die Fruchtfolge kann zu einer erheblichen Einsparung von mineralischem Stickstoff beitragen.

Reststoffe der landwirtschaftlichen Produktion können nur bedingt direkt für die Energieherstellung genutzt werden. Stroh als häufiger Reststoff ist zur Ernte stark verholzt und kann mikrobiell nur schlecht abgebaut werden. Wird die Biomasse vorbehandelt, wird der Lignozellulose-Komplex gelöst und die Inhaltsstoffe können von Bakterien fermentiert werden. Eine Vorbehandlung von Stroh ist mittels der „Steam explosion“ Technik möglich. Die in **„Analysis of Methane Potentials of Steam Exploded Wheat Straw and Estimation of Energy Yields of combined Ethanol and Methane Production“** präsentierten Ergebnisse zeigen, dass 80 % des Energiepotentials nach einer Vorbehandlung umgesetzt werden. Bei einer parallelen Nutzung des Strohs für die Ethanol- und Biogasherstellung können die C6-Zucker für die Ethanolherstellung und alle anderen Inhaltsstoffe für die Biogasherstellung genutzt werden. Dadurch kann auf genmanipulierte Hefen verzichtet werden.

Aus den Ergebnissen der behandelten Themenfelder lässt sich ableiten, dass eine nachhaltige Energieversorgung folgende Punkte berücksichtigen sollte:

- Regionale Ressourcen sollten durch angepasste und ausgewogene Fruchtfolgen optimal genutzt werden;
- Der Anbau von Rohstoffen für die Energieproduktion darf nicht in Konkurrenz mit der Erzeugung von Lebens- und Futtermitteln stehen;
- Die energetische und stoffliche Verwertung von Biomasse sollte zur Gänze ohne fossile Rohstoffe betrieben werden können;
- Alle möglichen Reststoffe und Nebenprodukte sollten energetisch genutzt werden;
- Biomasse muss mit effizienten und umweltfreundlichen Technologien für die energetische Nutzung optimal vorbehandelt werden, sodass höchste Ausbeuten möglich sind;
- Kaskadische Nutzung der einzelnen Inhaltsstoffe der Biomasse in Bioraffineriesystemen;
- Dezentrale Konzepte müssen in Betracht gezogen werden, welche regionale Ressourcen optimal nutzen und somit den Transportaufwand und folglich auch die Umweltbeeinträchtigung durch Transportemissionen minimieren;
- Einsparung fossiler Energiequellen durch den Betrieb von Traktoren und Lastkraftwagen mit erneuerbaren Treibstoffen.

Eine Zukunft ohne fossile Energiequellen kann nicht realisiert werden, indem eine einzelne Konversionstechnologie optimiert wird. Nur wenn alle verfügbaren Verfahren einer stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse weiterentwickelt werden und einzelne Verfahren in Bioraffineriesystemen verknüpft werden, rückt eine Energieversorgung - basierend auf erneuerbaren Ressourcen - in greifbare Nähe.

## **5 Literaturverzeichnis**

Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Hopfner-Sixt, K., Bodiroza, V., Hrbek, R., Friedel, J., Pötsch, E., Wagentristsl, H., Schreiner, M., Zollitsch, W., 2007. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresour. Technol.* 98, 3204-3212.

Amon, T., Bauer, A., Leonhartsberger, Ch., 2008. Integrierte Systeme Sieben Fragen und Antworten zur Nutzung von Bioenergie. *Wissenschaft & Umwelt - Interdisziplinär* 11, 162-171.

Amon, T., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Amon, B., 2005. Methanerzeugung aus Getreide, Wiesengras und Sonnenblumen. Einfluss des Erntezeitpunktes und der Vorbehandlung. 7. Tagung: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 2005. 343-348., KTBL.

Amon, T., Kryvoruchko, V., Hopfner-Sixt, K., Amon, T., Bodiroza, V., Ramusch, M., Hrbek, R., Zollitsch, W., Boxberger, J., 2006a. Biogaserzeugung aus Energiepflanzen. Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Jahrgang 2006., Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Amon, T., Leonhartsberger, Ch., 2008. Agrarische Rohstoffe für die Biogaserzeugung. *Mitteilungen der Fachbereichsarbeitsgruppe. Nachwachsende Rohstoffe* 48, 7.

Amon, T., Pötsch, E., Amon, B., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Zollitsch, W., 2006b. Methane production from cereals, sun flower and maize: Optimisation of the methane yield per hectare through time of harvesting, variety and pre-treatment, in: Dechema e.V. (Ed.), *ACHEMA 2006, 28th International Exhibition-Congress in Chemical Engineering, Environmental Protection and Biotechnology*, 15 – 19 May 2006 Frankfurt am Main.

Angelidaki, I., Ahring, B.K., 2000. Methods of Increasing the Biogas Potential from the Recalcitrant Organic Matter Contained in Manure. *Water Sci. Technol.* 41, 189-194.

Arnell, M., 2009. Pretreatment of residual fibers from pulp AND paper industry for anaerobic degeneration and biogas production.

Bauer, A., Hrbek, R., Amon, B., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Zollitsch, W., Liebmann, B., Pfeffer, M., Friedl, A., Amon, T., 2007a. Potential of biogas production in sustainable biorefinery concepts. 15th European Biomass Conference and Exhibition, 7.-11.5.2007., ETA-Florence, Italy and WIP-Munich, Germany.

Bauer, A., Hrbek, R., Amon, B., Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Hopfner-Sixt, K., Bodiroza, V., Wagentristsl, H., Pötsch, E., Zollitsch, W., Amon, T., 2007b. Potential of Biogas Production in sustainable biorefinery concepts., *Proceedings of the 5th Research and Development Conference of Central- and Eastern European Institutes of Agricultural Engineering-Part 2*, 20-31.

Berlin, A., Maximenko, V., Bura, R., Kang, K.Y., Gilkes, N., Saddler, J., 2006. A rapid microassay to evaluate enzymatic hydrolysis of lignocellulosic substrates. *Biotechnol. Bioeng.* 93, 880-886.

Bo Holm Nielsen, J., Oleskowicz-Popiel, P., Al Seadi, T., 2007. Energy crop potentials for Bioenergy in EU-27. 15th European Biomass Conference & Exhibition From Research to Market Deployment 7-11 May 2007. Berlin, Germany.

Boussaid, A., Robinson, J., Cai, Y., Gregg, D.J., Saddler, J.N., 1999. Fermentability of the Hemicellulose-Derived Sugars from Steam-Exploded Softwood (Douglas Fir). *Biotechnol. Bioeng.* 64, 284-289.

Boyle, W.C., 1976. Energy recovery from sanitary landfills - a review. *Microbial Energy Conversion* 119-138. Oxford, Pergamon Press.

Buswell, A.M., Müller, H.F., 1952. Mechanism of Methane Fermentation. *Industrial and Engineering Chemistry* 44, 550-552.

Call, H.P., Mücke, I., 1997. History, overview and applications of mediated lignolytic systems, especially laccase-mediator-systems (Lignozym®-process). *J. BIOTECHNOL.* 53, 163-202.

Commission of the European Communities, 2008. Package of Implementation measures for the EU's objectives on climate change and renewable energy for 2020. Package of Implementation measures for the EU's objectives on climate change and renewable energy for 2020. Commission staff working document.

Costa, S.M., Alves, A.R., Esposito, E., 2002. Action of white-rot fungus *Panus tigrinus* on sugarcane bagasse: Evaluation of selectivity. *Appl. Biochem. Biotechnol. Part A Enzyme Eng. Biotechnol.* 98-100, 357-364.

Diguta, C., Jurcoane, S., Israel-Roming, F., Brulé, M., Mukengele, M., Lemmer, A., Oechsner, H., 2007. Studies concerning enzymatic hydrolysis of energy crops. *Romanian Biotechnological Letters* 2, 3203-3207.

European Commission Directorate General Joint Research Centre, 2007. Cereals Straw Resources for Bioenergy in the European Union. Pamplona, 18.-19. October 2006. Italy, European Communities.

European Parliament and Council, 2009. Directive of the European Parliament and of the Council on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources Amending and Subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC - PE-COS 3736/08. Directive of the European Parliament and of the Council PE-COS 3736/08. Brussels, Belgium.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2004. Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Leipzig, Förderkennzeichen: 22027200.

FAO, 2008. The State of Food and Agriculture 2008, Biofuels: Prospects, Risks and Opportunities. Agricultural Biotechnology-meeting the Needs of the Poor. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fernando, S., Adhikari, S., Chandrapal, C., Murali, N., 2006. Biorefineries: Current status, challenges, and future direction. *Energy Fuels* 20, 1727-1737.

- Glaser, J.A., 2009. Right to food and agrofuels. *Clean Technol. Environ. Policy*.
- Heissenhuber, A., Berenz, S., 2006. Energieproduktion in landwirtschaftlichen Unternehmen, in: Darnhofer, I., Walla, C., Wytrzens, H.K. (Eds.), *Alternative Strategien für die Landwirtschaft* Facultas, Wien, pp. 135-144.
- Hopfner-Sixt, K., Amon, T., 2007. Monitoring of agricultural biogas plants - mixing technology and specific values of essential process parameters. 15th European Biomass Conference & Exhibition Berlin, Germany, 7-11- May 2007.
- Hopfner-Sixt, K., Amon, T., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Milovanovic, D., Amon, B., 2006. Analyse und Optimierung neuer Biogasanlagen. Endbericht 809288 / 8539 KA/SA. Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG).
- Hopfner-Sixt, K., Amon, T., Walla, C., Pötsch, E.M., Amon, B., Milovanovic, D., Mayr, H., Weichselbaum, W., 2007. Analyse und Optimierung neuer Biogasanlagen. Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG).
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H., 2001. *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2001. Springer Verlag, Berlin.
- Kamm, B., Kamm, M., 2004. Biorefinery - systems. *Chem Biochem Eng Q* 18, 1-6.
- Kamm, B., Kamm, M., 2007. Internationale Bioraffinerie - Systeme Verknüpfung von Technologien der Agrarwirtschaft und einer biobasierten Stoff- und Energiewirtschaft.
- Karpenstein-Machan, M., 2005. *Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber*. DLG-Verlags GmbH, Frankfurt am Main.
- Keller, F.A., Hamilton, J.E., Nguyen, Q.A., 2003. Microbial pretreatment of biomass: Potential for reducing severity of thermochemical biomass pretreatment. *Appl. Biochem. Biotechnol. Part A Enzyme Eng. Biotechnol.* 105, 27-42.
- Klupsch, R., 2000. *Untersuchungen zur Herstellung von Chemiezellstoff aus Aspen- und Buchenholz nach dem Dampfdruck-Extraktionsverfahren*. Universität Hamburg, Fachbereich Biologie.
- Lehtomäki, A., Viinikainen, T.A., Ronkainen, O.M., Alen, R., Rintala, J.A., 2006. Effect of pre-treatments on methane production potential of energy crops and crop residues. *Anaerobic Digestion* 2004. 2, 1016-1021. Montreal.
- Leonhartsberger, Ch., Bauer, A., Lyson, D., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Milovanovic, D., Friedel, J.K., Rinnhofer, T., Amon, T., 2008a. Sustainable biogas production through the integration of high-yielding and site-adapted energy crops into crop rotation systems, in: Novosad, J. (Ed.), 18th International Congress of Chemical and Process Engineering 24 - 28 August 2008 Summaries 4 Pres 2008 and System Engineering CHISA 2008 Process Engineering Publisher, Prag.

Leonhartsberger, Ch., Bauer, A., Machmüller, A., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Milovanovic, D., Hrbek, R., Amon, B., Amon, T., 2008b. Sustainable crop rotations and their potential for biogas production, The "Nikola Poushkarov" Institute of Soil Science and Institute of Animal Sciences, 13th RAMIRAN International Conference Potential for simple technology solutions in organic manure management 11th - 14th June 2008 Albena, Bulgaria.

Leonhartsberger, Ch., Bauer, A., Machmüller, A., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Milovanovic, D., Hrbek, R., Amon, T., 2008c. Biogas production from energy crops produced in sustainable crop rotations, European Society of Agricultural Engineers, AgEng2008 International Conference on Agricultural Engineering & Industry Exhibition, 23 - 25 Juni Kreta.

Lignin Institute, 2001. Ligning and its Properties. Dialogue  
<http://www.lignin.org/01augdialogue.html>.

Madigan, M.T., Martinko, J., Dunlap, P., Clark, D.P., 2008. Brock biology of microorganisms. 1168., Prentice Hall International.

Mitchell, D., 2008. A Note on Rising Food Prices. Policy research working paper 4682. Washington, D.C., The World Bank, Development prospect Group.

Mosier, N., Wyman, Ch., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapple, M., Ladisch, M., 2005. Features of Promising Technologies for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *Bioresour. Technol.* 96, 673-686.

Mundhenke, R., Baaden, A., Müller, J., Schwedes, J., 2002. Auswirkungen einer mechanischen Vorbehandlung auf das anaerobe Abbauverhalten von organischen Feststoffen. *Chemie Ingenieur Technik* 74.

Öchsner, H., Helffrich, D., 2005. Technische Anforderungen an landwirtschaftliche Biogasanlagen bei der Vergärung Nachwachsender Rohstoffe, VDI-Richtlinien 2005, VDI-Berichte 1872.

Prechtel, S., Schneider, R., Faulstich, M., 2008. Thermische Nutzung tierischer Nebenprodukte durch Thermodruckhydrolyse (THD). Bericht.

Prechtel, S., Stahl, R., 2000. Thermodruckhydrolyse mit nachfolgender Vergärung. Neue Entwicklungen in Prozess und Technik. *Biogas-Offensive Niederbayern 2000*; 13. Dezember 2000, FH Deggendorf.

Ruckenbauer, P., 2008. Remarks on the current discussion about bioenergy for the public or for agricultural and rural areas only? *Acta Agronomica Hungarica* 56, 421-428.

Sassner, P., Galbe, M., Zacchi, G., 2008. Steam Pretreatment of Salix with and without SO<sub>2</sub> Impregantion for Production of Bioethanol. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 121-124, 1101-1118.

Schneider, R., Prechtel, S., Faulstich, M., 2004. Einsatz der Thermodruckhydrolyse zur Reduktion von organischen Reststoffen am Beispiel von Klärschlamm und tierischen Nebenprodukten. ATZ Entwicklungszentrum.

Schulz, H., Eder, B., 2006. Biogas-Praxis, Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele Wirtschaftlichkeit. Staufen bei Freiburg.

Schumacher, B., Oechsner, H., Lemmer, A., Jungbluth, T., Senn, T., 2007. The influence of the substrate's pre-treatment on the biogas yield of energy crops. International Wind Energy Workshop "Wind Energy in the Energy Revolution in Cuba", 22-25 May, 2007. V International Conference for Renewable Energy, Energy Saving and Energy Education CIER 2007., Technical University for Renewable Energy. UTER.

Sharma, S.K., Mishra, I.M., Sharma, M.P., Saini, J.S., 1988. Effect of Particle-Size on Biogas Generation from Biomass Residues. *Biomass* 17, 251-263.

Smith, W., 2005. The Biorefinery Concept: A Platform for the Delivery of Renewable Chemicals.

Taylor, G., 2008. Biofuels and the biorefinery concept. *Energy Policy* 36, 4406-4409.

Thomsen, M.H., Haugaard-Nielsen, H., 2008. Sustainable bioethanol production combining biorefinery principles using combined raw materials from wheat undersown with clover-grass. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 35, 303-311.

Torrescastillo, R., Llabresluengo, P., Mataalvarez, J., 1995. Temperature Effect on Anaerobic-Digestion of Bedding Straw in A One-Phase System at Different Inoculum Concentration. *Agriculture Ecosystems & Environment* 54, 55-66.

Weiland, P., 2003. Biologie der Biogaserzeugung. ZNR Biogastagung. FAL - Institut für Technologie and biosystemtechnik Bundsforschungsanstalt für Landwirtschaft.

Weiland, P., Rieger, C., Schröder, J., Kissel, R., Bachmaier, J., Plogsties, V., Vogtherr, J., 2007. Bundesweite Evaluierung neuartiger Biomasse-Biogasanlagen. 16.Symposium BIOENERGIE.Festbrennstoffe, Flüssigkraftstoffe, Biogas. Ostbayerisches Technologie-Transfer Institut e.V. (OTTI).

Zimbardi, F., Viggiano, D., Nanna, F., Demichele, M., Cuna, D., Cardinale, G., 1999. Steam Explosion of Straw in Batch and Continuous Systems. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 77-79, 117-79.

Zimbardi, F., Viola, E., Nanna, F., Larocca, E., Cardinale, M., Barisano, D., 2007. Acid impregnation and steam explosion of corn stover in batch processes. *Industrial Crops and Products* 26, 195-206.

## 6 Publikationen