

## Endbericht des Projekts

# Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte für Holzwerkstoffe aus Biogasanlagen

**Aktenzeichen:** 28691-34

**Projektbeginn:** 10.04.2012

**Laufzeit des Vorhabens:** 30 Monate

**Autoren:** Roland Essel, Elke Breitmayer, Michael Carus, Alfred Pfemeter, Ute Bauermeister

*gefördert durch*



Hürth, im Januar 2015

**Projektleitung:**

nova-Institut GmbH  
Chemiepark Knapsack  
Industriestraße 300  
50354 Hürth

Roland Essel  
Telefon: 02233 – 48 14 40  
Telefax: 02233 – 48 14 50  
Internet: [www.nova-institut.eu](http://www.nova-institut.eu)

**Projektpartner:**

BENAS Biogasanlagen GmbH  
Christoph Heitmann  
Kreuzbuchen 2  
28870 Ottersberg



Glunz AG  
Dr. Alfred Pfemeter  
Grecostr. 1  
49716 Meppen



Ein Unternehmen der Gruppe



GNS – Gesellschaft für Nachhaltige  
Stoffnutzung mbH  
Dr. Ute Bauermeister  
Weinbergweg 23  
06120 Halle

Gesellschaft für  
Nachhaltige  
Stoffnutzung mbH



Hinweis: Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

# Projektkennblatt

der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Az **28691**Referat **34**Fördersumme **238.283,00 €**

**Antragstitel**      **Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte aus Biogasanlagen für Holzwerkstoffe**

**Stichworte**      Stoffliche Nutzung, Biogas, Gärprodukte, Holzwerkstoff, Spanplatte, MDF, HDF, Laminat

Laufzeit

Projektbeginn

Projektende

Projektphase(n)

**30 Monate****10.04.2012****09.10.2014****1**

Zwischenberichte

1

**Bewilligungsempfänger**

nova-Institut für politische und  
ökologische Innovation GmbH  
Chemiepark Knapsack  
Industriestraße 300  
50354 Hürth

Tel 02233-48-1440

Fax 02233-48-1450

Projektleitung

Roland Essel

Bearbeiter

**Kooperationspartner**

Glunz AG, Grecostr. 1, 49716 Meppen  
BENAS Biogasanlagen GmbH, Kreuzbuchen 2, 28870 Ottersberg  
GNS - Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH, Weinbergweg 23, 06120 Halle

***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Entwicklung eines Verfahrens zur Nutzung von Reststoffen aus der Biogasproduktion (Gärprodukte) als Rohstoff für die Holzwerkstoffindustrie.

***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Der für das Verfahren notwendige Rohstoff fällt als Endprodukt der Biogasproduktion in der eigens hierfür umgebauten Biogasanlage des Projektpartners BENAS an. Er wird über ein patentiertes Verfahren der GNS (ANAStrip®-Verfahren) gereinigt, wobei die anorganischen Stickstoffbestandteile („Ammoniumstickstoff“) der Gärprodukte entfernt werden. Der Stickstoff wird in einer Ammoniumsulfat-Lösung gebunden und kann so als konzentrierter Mineraldünger gewonnen werden. Die Glunz AG verwendet die auf diese Weise vorbehandelten Gärprodukte experimentell als zusätzlichen Rohstoff für die Herstellung von Spanplatten, mitteldichten Faserplatten und hochdichten Faserplatten zur Weiterverarbeitung zu Laminat-Fußboden. Es folgt eine umfangreiche Untersuchung der Materialeigenschaften. Die nova-Institut GmbH führt die ökonomische und ökologische Begleitforschung durch.

***Ergebnisse und Diskussion***

Die Vorgehensweise zur Produktion von Gärprodukten aus Biogasanlagen hat sich im Projekt bewährt. Insgesamt wurden 12 Tonnen an gestripten, separierten und getrockneten Gärprodukten als alternativer Rohstoff für die Holzwerkstoffindustrie produziert. Gleichmaßen war die testweise Produktion von Holzwerkstoffen mit

unterschiedlichen Anteilen an Gärprodukten erfolgreich: MDF, HDF und Spanplatten. Aufgrund der Farbeigenschaften der Gärprodukte ist eine Nutzung im Segment der Laminat-Fußböden besonders sinnvoll. Aber auch andere Anwendungen, wie zum Beispiel Holzverbundwerkstoffe (Wood-Plastic-Composites, WPC), sind möglich. Mit Hilfe des neuartigen Verfahrens können Betreiber von Biogasanlagen sowohl hochwertigen und handelbaren Dünger (Ammoniumsulfatlösung, Düngerkalk) als auch die festen, faserhaltigen Bestandteile der Gärprodukte in Wert setzen und damit die Wirtschaftlichkeit der Anlagen verbessern. Für die gesamte Biogasbranche ergibt sich darüber hinaus ein wirtschaftlicher Nutzen, weil mit dem Verfahren neue Absatzmärkte in der verarbeitenden Industrie erschlossen werden können. Das technische Potenzial, die festen und faserhaltigen Bestandteile der Gärprodukte als Rohstoff für die stoffliche Nutzung in Deutschland zu heben, liegt jährlich bei ca. 1,5 Millionen Tonnen Trockenmasse.

Aus betrieblicher Sicht stellt das Verfahren kein erhöhtes Risiko für die Anlagensicherheit dar. Die technischen Parameter (Druck, Temperatur), Verfahrensabläufe (Luftevakuierung, Erwärmung/Kühlung) und Inhaltsstoffe (Gärprodukte, REA-Gips, Ammoniumsulfat) stellen für den Betrieb keine Gefahr dar und können vom Personal mit handelsüblicher Technik und Infrastruktur gesteuert werden. Im Vergleich zu klassischen Herstellungsverfahren der Ammoniumsulfatproduktion wird in dem beschriebenen Verfahren keine Aggressive Schwefelsäure benötigt. Ökonomisch ist das Verfahren hauptsächlich für Bestandsanlagen interessant. Das Verfahren kann unter positiven Rahmenbedingungen einen konkurrenzfähigen Rohstoff ( $< 75 \text{ €/t atro}$ ) für die Holzwerkstoffindustrie bereitstellen. Diese Bedingungen dürften vor allem in Veredelungsregionen mit hohem Viehbestand gegeben sein. Je nach Betriebsstruktur kann das Verfahren jedoch auch in gemischten Regionen aus gesamtbetrieblicher Sicht wirtschaftliche Vorteile bringen. Technische Optimierungspotenziale können darüber hinaus die Wirtschaftlichkeit in großem Maße erhöhen. Grundsätzlich steigert das Verfahren die Wertschöpfung konventioneller Biogasanlagen durch die Produktion von mehreren handelbaren Gütern.

Im Hinblick auf Klimaveränderungen können durch das neuartige Verfahren im Modellfall bis zu 386 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr eingespart werden. Bezogen auf die erzeugte Strommenge der Biogasanlagen sind das 0,0142 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Kilowattstunde erzeugtem Strom. Durch die Produktion eines handelbaren Stickstoffdüngers erlaubt das Verfahren ein standortangepasstes, örtlich und zeitlich optimiertes Stickstoff-Düngemanagement oder auch den Export von Nährstoffen aus Veredelungsregionen mit entsprechendem Überschuss an Nährstoffen. Die Stickstoff-Düngeverluste sind bei Ammoniumsulfat zudem deutlich reduziert im Vergleich zur Düngung mit Gärprodukten und erhöhen damit die Substitutionswirkung von Mineraldünger.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Die Projektergebnisse wurden bereits auf mehreren Fachkonferenzen präsentiert und durch zahlreiche Publikationen und Medienberichte einem breiten Publikum zugeführt. Alle Ergebnisse des Projekts werden im Internet veröffentlicht und stehen der Öffentlichkeit unter folgendem Link kostenfrei zur Verfügung: [www.bio-based.eu/technology](http://www.bio-based.eu/technology). Die bisherigen Rückmeldungen waren durchweg positiv. Als Werkstoff sind die Fasern eine sehr interessante Möglichkeit, um in Produkten der Holzwerkstoffindustrie und auch darüber hinaus Anwendung zu finden. Die GNS – Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH ist darüber hinaus im Dezember 2014 mit dem dritten Platz des Hugo-Junkers-Preis in der Kategorie Ressourceneffizienz für das ANAStrip®-Verfahren ausgezeichnet worden.

## ***Fazit***

Das Projekt hat eine Prozesskette zur Kaskadennutzung von Biogassubstraten entwickelt. Nach der energetischen Nutzung in der Biogasproduktion erfolgt die stoffliche Nutzung der Reststoffe (Gärprodukte) in hochwertigen Anwendungen wie Spanplatten, mitteldichten oder hochdichten Faserplatten, die dann später erneut stofflich (Recycling) und abschließend wieder energetisch genutzt werden können. Aus ökologischer Sicht trägt das Verfahren somit zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei. Aus ökonomischer Sicht steigert das Verfahren die Wertschöpfung konventioneller Biogasanlagen und ist darüber hinaus für die Biogasbranche durch die Erschließung neuer Absatzmärkte von Nutzen. Die größte Herausforderung für die Zukunft besteht darin, logistische Hindernisse zu überwinden und Partner der Biogas-Branche und potenziellen Anwendern aus anderen Branchen zusammenzubringen. Alle beteiligten Kooperationspartner haben zum bisherigen Erfolg des Projekts beigetragen und erwägen bereits jetzt die Fortführung und die Weiterentwicklung von Teilen des Vorhabens, um das innovative Verfahren auf den Markt zu bringen und dort zu etablieren.

# Inhalt

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>                                | <b>6</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>                                  | <b>7</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>                                | <b>8</b>  |
| <b>1 Hintergrund und Zielsetzung .....</b>                        | <b>9</b>  |
| <b>2 Arbeitsschritte und Methoden.....</b>                        | <b>11</b> |
| <b>3 Ergebnisse.....</b>                                          | <b>13</b> |
| <b>3.1 Technische Machbarkeit .....</b>                           | <b>13</b> |
| 3.1.1 Herstellung von festen und gestrippten Gärprodukten .....   | 13        |
| 3.1.2 Produktion von Holzwerkstoffen aus Gärprodukten .....       | 19        |
| <b>3.2 Techno-ökonomische Evaluierung .....</b>                   | <b>22</b> |
| 3.2.1 Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.....                      | 23        |
| 3.2.2 Transport- und Logistikkosten .....                         | 32        |
| 3.2.3 Potenziale von Gärprodukten in Deutschland.....             | 35        |
| <b>3.3 Ökologische Bewertung .....</b>                            | <b>36</b> |
| <b>4 Diskussion.....</b>                                          | <b>42</b> |
| 4.1 Zielerreichung und Erfolgskontrolle.....                      | 42        |
| 4.2 Abweichung von ursprünglicher Projektplanung .....            | 43        |
| 4.3 Zusammenarbeit der Projektpartner .....                       | 44        |
| 4.4 Öffentlichkeitsarbeit .....                                   | 45        |
| <b>5 Fazit.....</b>                                               | <b>47</b> |
| <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                 | <b>49</b> |
| <b>Anhang.....</b>                                                | <b>51</b> |
| A1: Laborergebnisse der gestrippten, separierten Gärprodukte..... | 51        |
| A2: Datenblätter zur Wirtschaftlichkeit.....                      | 53        |

## Abbildungsverzeichnis

|              |                                                                                                                                                  |    |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: | Schematische Darstellung der Arbeitsschritte und angewandten Methoden .....                                                                      | 11 |
| Abbildung 2: | Überblick über das Betriebsgelände der Biogasanlage in Ottersberg.....                                                                           | 14 |
| Abbildung 3: | Verfahrensfließbild des modifizierten Testaufbaus der ANAStrip®-Anlage .....                                                                     | 16 |
| Abbildung 4: | Gärprodukte nach erfolgter Ammoniak-Entfernung, Separierung und Trocknung im Größenvergleich zu einer Münze.....                                 | 19 |
| Abbildung 5: | Laborversuche von MDF- und Spanplatten mit unterschiedlichen Anteilen von Gärprodukten .....                                                     | 20 |
| Abbildung 6: | Schematische Darstellung zweier Biogasanlagen mit und ohne modifiziertes ANAStrip®-Verfahren .....                                               | 23 |
| Abbildung 7: | Potenziale für feste, faserhaltige Bestandteile von Gärprodukten in Deutschland .....                                                            | 36 |
| Abbildung 8: | Stoffstromanalyse einer Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren .....                                                                 | 37 |
| Abbildung 9: | Dr. Ute Bauermeister und Prof. Dr. Herbert Spindler bei der Übergabe des Hugo-Junkers-Preis für Forschung und Innovation aus Sachsen-Anhalt..... | 46 |

## Tabellenverzeichnis

|             |                                                                                                                                                                                  |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1:  | Steckbrief der Biogasanlage BENAS in Ottersberg .....                                                                                                                            | 15 |
| Tabelle 2:  | Randbedingungen der Testläufe im August 2012 .....                                                                                                                               | 17 |
| Tabelle 3:  | Ergebnisse und Analyse der Testläufe .....                                                                                                                                       | 18 |
| Tabelle 4:  | Werkstoffeigenschaften des produzierten Laminat-Fußbodens .....                                                                                                                  | 22 |
| Tabelle 5:  | Betriebsdaten der zu vergleichenden Biogasanlagen mit und ohne<br>ANAStrip®-Verfahren .....                                                                                      | 24 |
| Tabelle 6:  | Übersicht der Leistungen und Kosten einer Biogasanlage .....                                                                                                                     | 25 |
| Tabelle 7:  | Stromvergütung von Biogasanlagen nach EEG 2009 .....                                                                                                                             | 26 |
| Tabelle 8:  | Materialkosten der BGA mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren<br>und der Referenzanlage .....                                                                                     | 28 |
| Tabelle 9:  | Einzelposten der Investitionskosten für eine Biogasanlage mit und<br>eine Biogasanlage ohne modifiziertes ANAStrip®-Verfahren .....                                              | 29 |
| Tabelle 10: | Ergebnisübersicht der Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage mit<br>und einer Biogasanlage ohne modifiziertes ANAStrip®-Verfahren<br>in drei unterschiedlichen Regionen .....     | 31 |
| Tabelle 11: | Annahmen zur Kalkulation der Transport- und Logistikkosten .....                                                                                                                 | 33 |
| Tabelle 12: | Kalkulation eines Transportvorganges .....                                                                                                                                       | 34 |
| Tabelle 13: | Distanz-Kosten-Matrix bei einem Ladegewicht von 15,2 t .....                                                                                                                     | 34 |
| Tabelle 14: | Vergleich der THG-Emissionen der Substratinputs inklusive Lieferung .....                                                                                                        | 38 |
| Tabelle 15: | THG-Emissionen für den Bau und Betrieb der ANAStrip-Anlage .....                                                                                                                 | 38 |
| Tabelle 16: | Gutschriften für zusätzlich produzierten Strom durch erhöhte<br>Methanausbeute .....                                                                                             | 39 |
| Tabelle 17: | THG-Emissionen bei der Nutzung von Gärprodukten als Dünger .....                                                                                                                 | 41 |
| Tabelle 18: | Annahmen und Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit einer<br>Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren im Vergleich<br>zur Referenzanlage in einer Gemischregion .....     | 53 |
| Tabelle 19: | Annahmen und Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit einer<br>Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren im Vergleich<br>zur Referenzanlage in einer Veredelungsregion ..... | 54 |
| Tabelle 20: | Annahmen und Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit einer<br>Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren im Vergleich<br>zur Referenzanlage in einer Ackerbauregion .....    | 55 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                      |                                                                |
|----------------------|----------------------------------------------------------------|
| AKH                  | Arbeitskraftstunde                                             |
| ASL                  | Ammoniumsulfat-Lösung                                          |
| atro                 | absolut trocken                                                |
| BGA                  | Biogasanlage                                                   |
| BHKW                 | Blockheizkraftwerk                                             |
| CO <sub>2</sub> -Äq. | CO <sub>2</sub> -Äquivalent                                    |
| EEG                  | Erneuerbare-Energien-Gesetz                                    |
| f.K.                 | fixe Kosten                                                    |
| FM                   | Frischmasse                                                    |
| FNR                  | Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.                       |
| g/l                  | Gramm pro Liter                                                |
| h                    | Stunden                                                        |
| HDF                  | Hochdichte Faserplatte                                         |
| HTK                  | Hühnertrockenkot                                               |
| KTBL                 | Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. |
| kg                   | Kilogramm                                                      |
| kWh                  | Kilowattstunde                                                 |
| KWK                  | Kraft-Wärme-Kopplung                                           |
| MDF                  | Mitteldichte Faserplatte                                       |
| N                    | Stickstoff                                                     |
| NH <sub>3</sub>      | Ammoniak                                                       |
| NH <sub>4</sub> -N   | Ammonium-Stickstoff                                            |
| REA                  | Rauchgas-Entschwefelungs-Anlage                                |
| S                    | Schwefel                                                       |
| t                    | Tonnen                                                         |
| THG                  | Treibhausgas                                                   |
| tkm                  | Tonnenkilometer                                                |
| TS                   | Trockensubstanz                                                |
| v.K.                 | variable Kosten                                                |
| WPC                  | Wood-Plastic Composites                                        |

# 1 Hintergrund und Zielsetzung

Den Hintergrund des Projekts „Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte aus Biogasanlagen für Holzwerkstoffe“ bilden zwei Problemlagen:

1. Die deutsche Holzwerkstoffindustrie sucht cellulosehaltige, alternative Rohstoffe zur Produktion von Spanplatten und Faserplatten (MDF, HDF), da die Versorgung mit Holz auf unsicheren Füßen steht. Gerade der Energiebereich sorgt zunehmend für zusätzliche Nachfrage, Verknappung und Verteuerung von Holz, insbesondere bei den so genannten Sägenebenprodukten. Es wird erwartet, dass sich diese Problematik durch den weiteren Ausbau der Pellet-Heizungen und anderen energetischen Nutzungen schon in wenigen Jahren erheblich verschärfen wird (Mantau 2010; Carus et al. 2010). Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass weder cellulosehaltige Ackerkulturen (Pappeln, Weiden, Miscanthus, Hanf) noch Reststoffe oder Importe geeignete Rohstoffe in ausreichender Menge und zu günstigen Preisen zur Verfügung stellen können (Pauls et al. 2008). Mittel- bis langfristig könnte dies den Wirtschaftsstandort Deutschland für die Holzwerkstoffindustrie in Frage stellen.
2. Gerade die großen Betreiber von Biogasanlagen stehen zunehmend vor dem Problem, wie sie die Gärprodukte aus ihrer Biogasproduktion optimal in Wert setzen können. Insbesondere große Anlagen können die flüssigen Gärprodukte regional nur zu gewissen Anteilen absetzen. Bisher werden Gärprodukte hauptsächlich als Düngemittel eingesetzt. Eine energetische Nutzung hat sich am Markt noch nicht durchgesetzt. Die Aufbereitung der festen Bestandteile von Gärprodukten und deren anschließende stoffliche Nutzung in der Holzwerkstoffindustrie ist eine bisher noch nicht betrachtete Nutzungsoption, die in vielen Fällen eine ökologisch und ökonomisch interessantere Alternative zur bisherigen Verwertung von Gärprodukten sein könnte und somit beide Problemlagen lösen kann.

Das Projekt verfolgt deshalb das Ziel, die technische und ökonomische Machbarkeit der stofflichen Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte aus der Biogaserzeugung in der Holzwerkstoffindustrie zu realisieren. In enger Zusammenarbeit der Glunz AG als Holzwerkstoffproduzenten, der BENAS Biogasanlagen GmbH als Betreiber einer Biogasanlage, der GNS – Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH und der nova-Institut GmbH soll ein Verfahren zur stofflichen Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte aus der Biogasanlagen für die Produktion von Holzwerkstoffen entwickelt werden.

Bisher scheiterten alle Versuche, Holzwerkstoffe aus Gärprodukten von Biogasanlagen zu produzieren. Der Hauptgrund dafür liegt in einem Bestandteil der Gärprodukte, dem Ammonium-Stickstoff. Dieser entweicht bei hohen Temperaturen, wie sie bei der Herstellung von Span- und Faserplatten üblich sind, als Ammoniak in die Umgebungsluft und verursacht als stechendes Gas eine starke Geruchsbelastung der Holzwerkstoffe und Produktionsanlagen. Die drastische Reduzierung der Geruchsproblematik ist daher eine Kernaufgabe des Projekts. Sie wird durch eine Entfernung des Ammoniumstickstoffs mit Hilfe eines modifizierten ANAStrip-Verfahrens erreicht (Bauermeister et al. 2009). Die faserhaltigen, festen Bestandteile der Gärprodukte können nach dieser Aufbereitung in der Holzwerkstoffindustrie zur Substitution von Holz eingesetzt werden.

Die Gesamtziele des Projekts sind

- die technische Machbarkeit des neuartigen Verfahrens zu prüfen,
- die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu berechnen und
- eine ökologische Bewertung auf Basis von Treibhausgasemissionen vorzunehmen.

Im vorliegenden Abschlussbericht werden Hintergrund und Zielsetzung sowie der Ablauf des Projekts mit seinen einzelnen Arbeitsschritten und angewandten Methoden übersichtsartig dargestellt (vgl. Kapitel 1 und 2). Die Ergebnisse sind nach den Projektzielen in einen technischen Teil (vgl. Kapitel 3.1), einen ökonomischen Teil (vgl. Kapitel 3.2) und einen ökologischen Teil (vgl. Kapitel 3.3) gegliedert und werden dort jeweils detailliert beschrieben. Daran anschließend werden die Ergebnisse diskutiert (vgl. Kapitel 4) und ein Fazit gezogen (vgl. Kapitel 5).

## 2 Arbeitsschritte und Methoden

Die Realisierung des Projekts war mit diversen Arbeitsschritten verbunden, die in der folgenden Abbildung dargestellt sind.

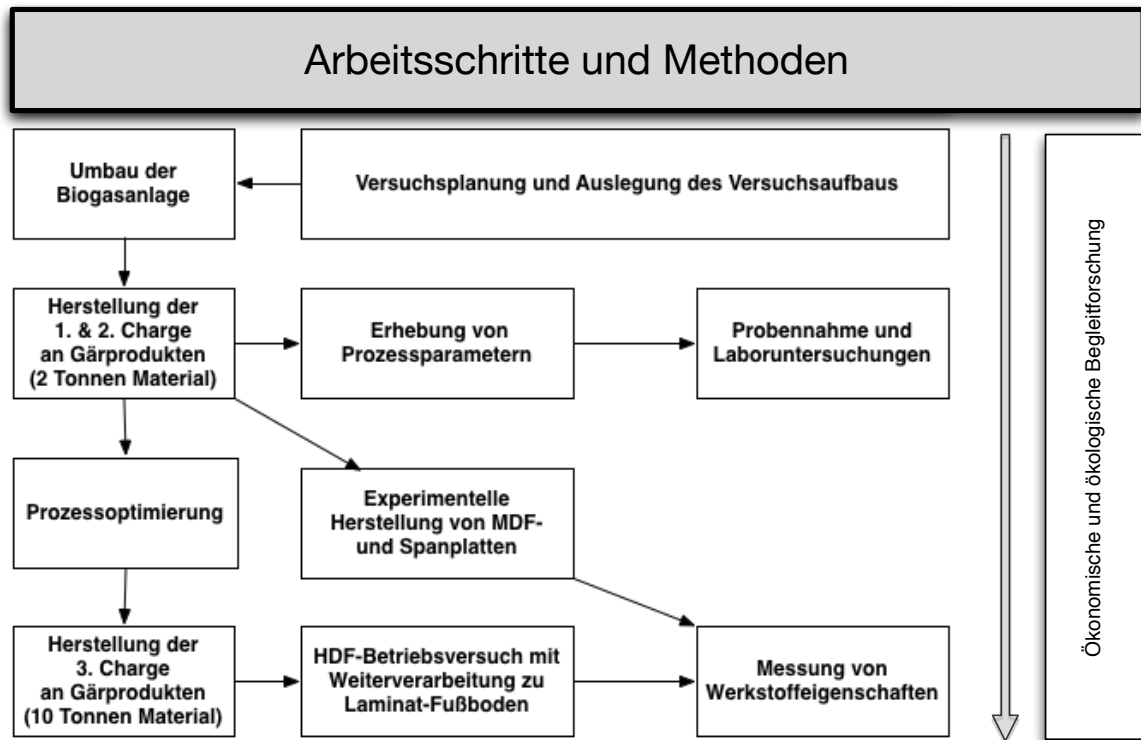


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte und angewandten Methoden

Quelle: Eigene Darstellung

In einem ersten Arbeitsschritt wurde die Biogasanlage vom Projektpartner BENAS so umgebaut, dass eine Produktion der geruchsreduzierten und mit Hilfe des ANASrip<sup>®</sup>-Verfahrens aufbereiteten Gärprodukte möglich ist. Dabei lieferte der Projektpartner GNS Unterstützung für die Versuchsplanung und Auslegung des Versuchsaufbaus, die Erhebung von Prozessparametern sowie die Probenahme und Laboruntersuchungen.

Der Herstellungsprozess der ersten und zweiten Charge an Gärprodukten lieferte eine Menge von zwei Tonnen Material, die vom Projektpartner Glunz für Laborversuche und Testproduktionen von Span- und MDF-Platten genutzt worden ist. Dabei wurden auch die Werkstoffeigenschaften der Holzwerkstoffe geprüft.

In einem iterativen Prozess wurde daraufhin der Prozess zur Herstellung der Gärprodukte optimiert, der Aufbau der Biogas- und ANASrip<sup>®</sup>-Anlage angepasst und eine dritte Charge an Gärprodukten hergestellt. Dabei wurde eine Menge von zehn Tonnen Material produziert, das für einen Betriebsversuch zur Herstellung von Laminat-Fußboden verwendet wurde. Der Betriebsversuch wurde von der LaminatPark GmbH & CO KG in Heusweiler-Eiweiler durchgeführt. Abschließend wurden die Werkstoffeigenschaften des Laminat-Fußbodens aus Gärprodukten und dessen Marktkonformität geprüft.

Die ökonomische und ökologische Begleitforschung verlief parallel zu allen anderen Arbeiten und schloss das Projekt mit der Berechnung der Gesamtkosten sowie einer Bilanzierung der Treibhausgasemissionen ab.

Die Ergebnisse des Projekts sind detailliert in den folgenden Kapiteln beschrieben.

## 3 Ergebnisse

Entsprechend der Projektziele sind die Ergebnisse in einzelnen Abschnitten zur technischen Machbarkeit (Kapitel 3.1), der Wirtschaftlichkeit (vgl. Kapitel 3.2) sowie der ökologischen Bewertung (vgl. Kapitel 3.3) gegliedert.

### 3.1 Technische Machbarkeit

In den folgenden beiden Unterkapiteln wird zum einen die Herstellung der festen und gestrippten Gärprodukte beschrieben und zum anderen die Produktion von Holzwerkstoffen aus diesen alternativen Rohstoffen dargestellt.

#### 3.1.1 Herstellung von festen und gestrippten Gärprodukten

Die Herstellung der Gärprodukte als Rohstoff für die Holzwerkstoffindustrie erfolgte beim Projektpartner BENAS. Die Biogasanlage von BENAS wurde 2005 gebaut und umfasst ein Betriebsgelände von etwa drei Hektar. Zur Bewirtschaftung der Anlage sind ein Betriebsleiter, vier Mitarbeiter zur Anlagenführung, fünf LKW- und Schlepperfahrer sowie zwei Geländepfleger angestellt. Der Umsatz des Unternehmens beläuft sich auf etwa 5-7 Millionen Euro pro Jahr.

Zur technischen Ausstattung zählen zwei Hauptfermenter, zwei Nachfermenter, zwei Endlager sowie zwei Vorgruben. Die Tanks der Fermenter und Endlager bestehen aus jeweils 5.000 m<sup>3</sup> für die feste und flüssige Phase sowie einem Gaslager von 1.500 m<sup>3</sup>. Zusätzlich stehen eine Betriebshalle, eine Lagerhalle für Rohstoffe, ein Trockenlager für Holz und ein betonierter Lagerplatz bereit. An die Biogasanlage sind 5,24 MW<sub>el</sub> installierte Leistung in Form von fünf Blockheizkraftwerken à 1.048 kW<sub>el</sub> angeschlossen. Außerdem ist eine Anlage für das patentierte ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren und eine Anlage zur Pelletierung von Gärresten vorhanden. Eine Anlage für die Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität befindet sich in der Erprobungsphase. Eine Anlage zur Speicherung von 8.000 m<sup>3</sup> Biogas befindet sich in Planung. Der Fuhrpark besteht aus fünf Schleppern, vier Lastkraftwagen sowie weiteren Fahrzeugen für die Biomasselogistik (Radlader, Teleskoplader, Gabelstapler, etc.).

Der Betrieb der Biogasanlage erfordert einen Rohstoffbedarf von ca. 70.000 Tonnen Substrat pro Jahr. Die Anteile der eingesetzten Substrate liegen laut RAL Prüfzeugnis (BGK 2012) bei ca. 13% Geflügelmist und 87% pflanzlichen Rohstoffen aus der Landwirtschaft (83% Mais-Ganzpflanzensilage, 4% Corn-Cob-Mix). Die Anteile der pflanzlichen Stoffe werden je nach Angebot durch Gras vom eigenen Grünland sowie durch Zukäufe von geeigneten Co-Substraten (z.B. Getreidemehl) ergänzt. Der Flächenbedarf für die Biogasanlage setzt sich zum einen aus 50 Hektar eigenem Anbau (10 ha Grünland, 40 ha Maisanbau), zum anderen aus gepachteten Flächen (ca. 300 ha Maisanbau) und dem Vertragsanbau (ca. 800 ha Maisanbau) von Landwirten in unmittelbarer Umgebung der Anlage zusammen. Außerdem ist der Flächenbedarf abhängig von Substrat und Menge an Zukäufen, die einer großen Schwankungsbreite unterliegen und nur schwer zu beziffern sind. Der Betreiber der Biogasanlage schätzt den gesamten Flächenbedarf für den Betrieb der Anlage auf 3.000 Hektar.

Das Hauptprodukt der Biogasanlage ist das Biogas zur Erzeugung von Strom und Wärme sowie zur Aufbereitung und Einspeisung in das öffentliche Erdgasnetz. Pro Jahr werden ca. 14 Millionen Kubikmeter Rohbiogas produziert. Das Gas besteht aus ca. 54% Methan und

46% Kohlenstoffdioxid. Derzeit sind drei Blockheizkraftwerke mit insgesamt 3,2 MW<sub>el</sub> installierter Leistung und ca. 8.760 Volllaststunden in Betrieb. Pro Jahr werden somit ca. 28.032 MWh<sub>el</sub> in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Die gesamte Wärmeproduktion entspricht in etwa der Stromproduktion, d.h. 3,2 MW<sub>th</sub>. Im Jahreschnitt werden ca. 85% der Wärme für verschiedene Anwendungen genutzt. Das folgende Foto zeigt einen Überblick über das Betriebsgelände der Firma BENAS Biogasanlagen GmbH in Ottersberg.



Abbildung 2: Überblick über das Betriebsgelände der Biogasanlage in Ottersberg  
Quelle: BENAS 2012

Die Wärmenutzung durch die ANAStrip<sup>®</sup>-Anlage liegt bei 500 bis 1.000 kW. Die Einspeisung von 700 m<sup>3</sup> Erdgas pro Tag in das öffentliche Netz ist geplant. Dies entspricht einer zusätzlichen Menge von ca. 1.200 m<sup>3</sup> Rohbiogas. Neben dem Biogas sind zahlreiche Nebenprodukte aus der Biogasanlage zu gewinnen. Pro Jahr entstehen ca. 62.000 Tonnen feste und flüssige Gärprodukte, die für eine stoffliche oder energetische Nutzung verwendet werden können. Pro Jahr können ca. 20.000 m<sup>3</sup> Scheitholz mit der Abwärme der Biogasanlage getrocknet werden. Pro Tag können ca. 11 Tonnen Ammoniumsulfatlösung und 3 Tonnen Düngekalk produziert werden, wenn wie bisher durchschnittlich 8 bis 10 m<sup>3</sup>/h separierter flüssiger Gärrest behandelt werden.

Nur etwa 3,6 % der Biogasanlagen in Deutschland haben eine installierte Leistung von mehr als 1 MW<sub>el</sub>. (DBFZ 2012, S. 102). Insgesamt handelt es sich bei der Biogasanlage des Projektpartners BENAS somit um eine der größten Anlagen in Deutschland, was für den großen Bedarf an alternativen Rohstoffen in der Holzwerkstoffindustrie ein wichtiger Faktor

ist. Die folgende Tabelle fasst die wesentlichen Charakteristika der Biogasanlage steckbriefartig zusammen.

Tabelle 1: Steckbrief der Biogasanlage BENAS in Ottersberg

|                           |                                                                                               |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Allgemeine Angaben</b> |                                                                                               |
| Standort                  | Ottersberg                                                                                    |
| Betreiber                 | BENAS Biogasanlagen GmbH                                                                      |
| Inbetriebnahme            | 2005                                                                                          |
| Substratzusammensetzung   | Maissilage, Geflügelmist, andere Substrate (Grassilage, Getreidemehl, etc.)                   |
| <b>Biogasanlage</b>       |                                                                                               |
| Fermentervolumen          | Ca. 26.000 m <sup>3</sup><br>2 Hauptfermenter, 2 Nachfermenter, 2 Endlager und<br>2 Vorgruben |
| Gaserfassung              | Von allen Fermentern                                                                          |
| <b>Gasverwertung</b>      |                                                                                               |
| BHKW                      | 5 Jenbacher BHKW á 1048 kW <sub>el</sub>                                                      |
| Gasaufbereitung           | Einspeisung von 700 m <sup>3</sup> in Erdgasnetz geplant                                      |

Quelle: Eigene Darstellung

Für die Herstellung der Gärprodukte waren verschiedene Umbaumaßnahmen im regulären Betrieb der Biogasanlage notwendig, die insbesondere das ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren betreffen. Die ANAStrip<sup>®</sup>-Behandlung ist für eine Weiternutzung der Gärprodukte in der Holzwerkstoffindustrie notwendig, da der sehr unangenehme Geruch und die starke Ausgasung von Ammoniak diese Nutzung bislang verhindern. Mit dem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren wird bei leichtem Unterdruck und Temperaturen von 50 bis 85°C der in den Gärresten enthaltene Ammoniumstickstoff (NH<sub>4</sub>-N) zu 70 bis 95% in Form von Ammoniak ausgetrieben. Das mit Ammoniak angereicherte Kreislaufgas verlässt den Strippbehälter und durchströmt anschließend einen Vorlagebehälter, in dem das Ammoniak in wässriger Lösung mit einem Absorptionsmittel unter Bildung von Ammoniumsulfat reagiert.

Die ANAStrip<sup>®</sup>-Anlage der Biogasanlage in Ottersberg ist für einen maximalen Durchsatz von 25 m<sup>3</sup>/h Gärrest ausgelegt, wobei nur separierte, flüssige Gärreste eingesetzt werden. Im Jahr 2012 wurden in der im vollautomatischen Betrieb arbeitenden Anlage durchschnittlich 8 bis 10 m<sup>3</sup>/h Gärreste behandelt. Nach einer Vorerwärmung auf ca. 60 bis 65 °C wird in den 4 installierten Strippbehältern unter Verwendung von durchschnittlich 500 - 1000 kW Abwärme aus dem BHKW das Ammoniak gemeinsam mit Kohlendioxid ausgetrieben. Aus dem heißen Strippgas werden unter Wärmerückgewinnung und Zufuhr von REA-Gips die Düngeprodukte Ammoniumsulfat-Lösung und Kalziumkarbonat erzeugt. Nach der Separation werden so täglich ca. 11 t ASL (5% N, 6% S) und ca. 3 t karbonatischer Kalk (TS > 70%, mit Restanhaftung an ASL) erzeugt.

Der Strippgrad ist abhängig von der eingesetzten Wärme und beträgt an der ANAStrip<sup>®</sup>-Anlage in Ottersberg durchschnittlich 78 bis 82%. Die NH<sub>4</sub>-N- Konzentration der Gärreste

wird von ca. 4 bis 5 g/l auf  $< 1$  g/l nach der Strippung gesenkt, wobei die Menge an Gärrest um ca. 3 bis 8% abnimmt. Der Massenverlust ist auf die Entfernung des Ammoniaks, des Kohlendioxids und des für die Erzeugung der Düngerlösung nötigen Wassers zurückzuführen. Der TS-Gehalt des Gärrestes erhöht sich dadurch nur geringfügig.

Da die installierten Substrat-Wärmetauscher in Ottersberg für feststoffhaltige Substrate nicht ausgelegt sind und im Dauerbetrieb schnell verstopfen würden, werden normalerweise nur die flüssigen Gärreste nach der Abtrennung der Feststoffe mittels Schneckenseparator eingesetzt. Für die Produktion der Gärprodukte für die Holzwerkstoffindustrie musste daher eine technische Lösung gefunden werden, mit der zumindest vorübergehend eine vollständige Behandlung der Gärreste mit den Gärrestfasern störungsfrei möglich ist.

Im Projekt wurde diese Herausforderung vom Partner GNS angenommen und erfolgreich gemeistert. Mit Hilfe eines modifizierten Stripping-Verfahrens wurde der Ammonium-Stickstoff auch aus den festen Bestandteilen der Gärprodukte mit BHKW-Abwärme im mäßigen Unterdruck ohne jede Verwendung von Laugen und Säuren entfernt. Zur Erzeugung von handelsfähigem Stickstoffdünger (Ammoniumsulfat-Lösung, Düngekalk) sowie der festen Bestandteile der Gärprodukte für die Holzwerkstoffindustrie wurde lediglich REA-Gips als Inputstoff benötigt. Nachfolgend ist der modifizierte Anlagenaufbau für die Herstellung der Testchargen an festen, gestrippten Gärresten skizziert.

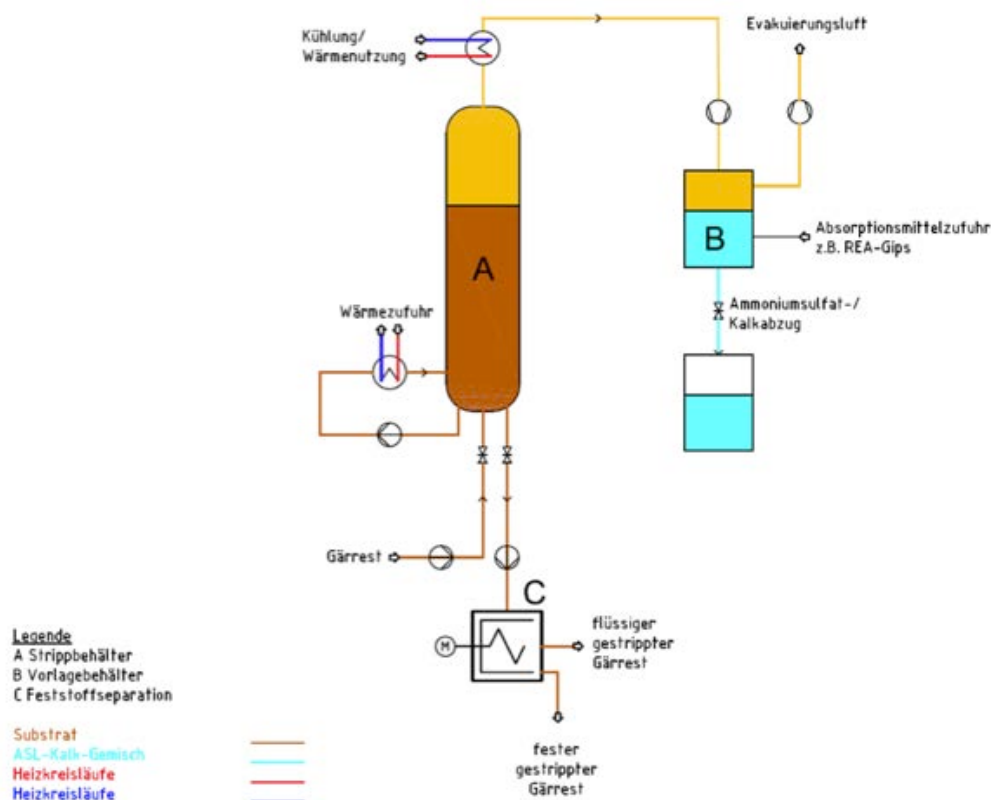


Abbildung 3: Verfahrensfließbild des modifizierten Testaufbaus der ANAStrip®-Anlage  
Quelle: GNS 2013

Im Zeitraum vom 6.-9. August 2012 wurden von der Firma BENAS zwei Testchargen von Gärresten erfolgreich mit dem modifizierten Testaufbau der ANAStrip®-Anlage behandelt. Als Ausgangsmaterial wurden zwei unterschiedliche Chargen Gärreste eingesetzt. Bei der

ersten Charge handelte es sich dabei um eine Standardmischung, die von BENAS unter thermophilen Bedingungen produziert wird und aus Hühnertrockenkot, Maissilage und geringfügigen Mengen anderer Substrate, wie zum Beispiel Grassilage und Getreidemehl besteht. Bei der zweiten Charge handelt es sich um eine Standardmischung einer Biogasanlage aus Tarmstedt, die unter mesophilen Bedingungen produziert und zu großen Teilen aus Gülle und Maissilage besteht.

Die Gärreste wurden zu Versuchsbeginn jeweils mit Wasser soweit verdünnt, dass der Druckanstieg im Wärmetauscher für den Betrieb der Anlage technisch vertretbar war. Nach der Vorerwärmung wurde der Stripp-Prozess mit Aufzeichnung der Versuchszeit und der jeweiligen Randbedingungen durchgeführt. Der spezifische Wärmeverbrauch liegt mit ca. 150 kWh/m<sup>3</sup> aufgrund der spezifischen Versuchsbedingungen höher als im Standardbetrieb bei BENAS. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Randbedingungen der Versuchsläufe zusammengestellt.

Tabelle 2: Randbedingungen der Testläufe im August 2012

|                                          | Einheit            | 1. Charge  | 2. Charge     |
|------------------------------------------|--------------------|------------|---------------|
| Herkunft                                 |                    | BENAS      | BGA Tarmstedt |
| <b>Angaben zur BGA</b>                   |                    | thermophil | mesophil      |
| Rindergülle, ca.                         | Ma.-%              | 0          | 38            |
| Hühnermist, ca.                          | Ma.-%              | 20         | 0             |
| Maissilage, andere NAWARO, ca.           | Ma.-%              | 80         | 62            |
| <b>Randbedingungen Strippung</b>         |                    |            |               |
| Elektr. Leistung der Stripp-Pumpe        | kW                 | 16         | 16            |
| Laufzeit der Pumpe                       | h                  | 19,5       | 21            |
| Energiebereitstellung für Pumpe          | kWh                | 312        | 336           |
| Temperatur Gärrest nach Vorerwärmung     | °C                 | 78         | 78            |
| Versuchszeit Strippung                   | h                  | 19,5       | 21            |
| Wärmezufuhr WT Strippung                 | kW                 | 600        | 600           |
| thermische Energie für Strippung         | kWh                | 11.700     | 12.600        |
| Gegendruck WT Strippung                  | bar                | 2,5        | 3             |
| Volumenstrom WT Strippung                | m <sup>3</sup> /h  | 140        | 140           |
| <b>Verdünnung Gärrest zur Behandlung</b> |                    |            |               |
| Wasser                                   | m <sup>3</sup>     | 28         | 30            |
| Gärrest                                  | m <sup>3</sup>     | 50         | 50            |
| spezifischer Wärmeverbrauch Strippung    | kWh/m <sup>3</sup> | 150        | 158           |
| <b>Randbedingungen Separation</b>        |                    |            |               |
| Elektrische Leistung Separator           | kW                 | 3          | 3             |
| Laufzeit Separator                       | h                  | 7          | 7             |
| Energiebereitstellung für Separator      | kWh                | 21         | 21            |

Quelle: GNS 2012

Anschließend erfolgte die Separation der Gärreste. Von den ungestrippten (jedoch bereits verdünnten) Gärresten, den gestrippten Gärresten und den separierten, gestrippten Feststoffen wurden Proben genommen, deren Untersuchung von GNS in zwei Laboren veranlasst wurde. Ergänzt mit den Eigenmessungen von BENAS sind die Analysenergebnisse in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3: Ergebnisse und Analyse der Testläufe

|                                           | Einheit  | 1. Charge |       |       | 2. Charge     |       |       |
|-------------------------------------------|----------|-----------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| Herkunft                                  |          | BENAS     |       |       | BGA Tarmstedt |       |       |
| <b>ungestrippter Gärrest</b>              | Messung: | BENAS     | Lab.1 | Lab.2 | BENAS         | Lab.1 | Lab.2 |
| Menge                                     | m³       | 78        |       |       | 80            |       |       |
| TS                                        | %        |           | 7,2   |       |               | 3,5   |       |
| oTS                                       | % v. TS  |           | 72,7  |       |               | 74,3  |       |
| pH-Wert                                   |          | 8,23      | 8,7   |       |               | 8,3   |       |
| NH <sub>4</sub> -N <sup>1</sup>           | mg/kg    | 2400      | 2.600 |       | 1500          | 1.300 |       |
| N gesamt                                  | mg/kg    |           | 5.600 |       |               | 2.900 |       |
| <b>gestrippter Gärrest</b>                |          |           |       |       |               |       |       |
| Menge                                     | m³       | ca. 70    |       |       | ca. 70        |       |       |
| TR                                        | %        |           | 7,3   |       |               | 3,8   |       |
| pH-Wert                                   |          | 9,2       | 8,9   |       |               | 9,3   |       |
| NH <sub>4</sub> -N <sup>1</sup>           | mg/kg    | 350       | 480   |       | 150           | 140   |       |
| <b>separierter, gestrippter Feststoff</b> |          |           |       |       |               |       |       |
| Menge                                     | t        | ca. 2,3   |       |       | ca. 2,3       |       |       |
| TR                                        | %        | 25,9      | 32,2  | 22    | 25,9          | 21,6  | 25,5  |
| oTS                                       | % v. TR  |           | 91,1  |       |               | 93    |       |
| pH-Wert                                   |          |           | 8,5   |       |               | 8,4   |       |
| NH <sub>4</sub> -N                        | mg/kg    |           | 55    |       |               | 63    |       |
| N gesamt                                  | mg/kg    |           | 4.540 |       |               | 2.680 |       |
| N gesamt vom TR                           | % TR     |           | 1,4   |       |               | 1,2   |       |
| Chlorid                                   | mg/kg    |           | 1449  |       |               | 799   |       |
| Chlorid vom TR                            | % v. TR  |           | 0,45  |       |               | 0,37  |       |
| Lignin (ADL)                              | % v. TR  |           |       | 21,2  |               |       | 17,8  |
| Zellulose (ADF-ADL)                       | % v. TR  |           |       | 46,6  |               |       | 43,1  |
| Hemicellulose (NDF-ADF)                   | % v. TR  |           |       | 19,5  |               |       | 18,2  |
| <b>Feststoff nach Trocknung</b>           |          |           |       |       |               |       |       |
| Menge                                     | t        | ca. 0,7   |       |       | ca. 0,7       |       |       |
| TR                                        | %        | 93        | 89,4  |       | 96            | 88,8  |       |
| NH <sub>4</sub> -N                        | mg/kg    |           | 24    |       |               | 14,6  |       |
| pH-Wert                                   |          |           | 8,4   |       |               | 7,3   |       |

Quelle: GNS 2012

Die Tabelle zeigt, dass die Konzentration des Ammonium-Stickstoffs (NH<sub>4</sub>-N) in den Gärprodukten nach der Strippung, Separation und Trocknung um deutlich etwa 90% reduziert wurde. Der Ligningehalt der gestrippten und separierten festen Gärprodukte liegt zwischen 18 und 21%. Holz hat im Vergleich dazu einen Ligningehalt zwischen 20 und 28%. Auch Form und Farbe der Gärprodukte ähneln dem Erscheinungsbild von Holz. Dies gilt sowohl für die Gärprodukte mit hohen Mais-Anteilen, als auch für die Gärprodukte mit hohen Gülle-Anteilen. In der folgenden Abbildung sind die Gärprodukte im Größenvergleich zu einer Münze dargestellt.



Abbildung 4: Gärprodukte nach erfolgter Ammoniak-Entfernung, Separierung und Trocknung im Größenvergleich zu einer Münze

Quelle: nova-Institut 2013

### **3.1.2 Produktion von Holzwerkstoffen aus Gärprodukten**

Die Herstellung von Holzwerkstoffen aus Gärprodukten erfolgte zunächst im Labor für Spanplatten und mitteldichte Faserplatten (MDF). Anschließend wurden die vielversprechenden Laborergebnisse in einem Betriebsversuch zur Herstellung von hochdichten Faserplatten (HDF) mit Weiterverarbeitung zu Laminat-Fußboden überprüft. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen sowie des Betriebsversuchs sind im Folgenden dargestellt.

#### **3.1.2.1 Laborversuche**

Die Glunz AG hat die festen, faserhaltigen und von Ammoniumstickstoff befreiten Gärprodukte experimentell als zusätzlichen Rohstoff für die Herstellung von Span- und MDF-Platten verwendet. Das Unternehmen nutzt damit die Möglichkeit, den Holzbedarf für die Herstellung von Holzwerkstoffen zu reduzieren und auf einen alternativ in ausreichenden Mengen verfügbaren, kostengünstigen lignocellulosehaltigen Rohstoff zuzugreifen. Die auf diese Weise produzierten Holzwerkstoffe wurden umfangreichen Untersuchungen der Materialeigenschaften, der Bearbeitbarkeit und anderer Eigenschaften unterzogen.

Bei den Spanplatten weisen die Ergebnisse der Laboruntersuchungen darauf hin, dass die hygro-mechanischen Eigenschaften sich geringfügig zur Referenzplatte mit zunehmendem Gärprodukte-Anteil verschlechtern. Alle Platten mit den Holzsubstituenten beider Chargen erfüllen aber die Anforderung einer Möbel-Spanplatte (EN 312 Typ P2).

Bei den mitteldichten Faserplatten wurden keine Auswirkung bei einer Substitution von 10-20% des Holzes durch Gärreste auf die Parameter Querkzugsfestigkeit, Elastizitätsmodul und

Biegemodul festgestellt, allerdings gab es eine geringe Reduktion von Querkzugsfestigkeit, Elastizitätsmodul und Biegemodul bei Verwendung von 30% Gärprodukten. Bei den hygromechanischen Eigenschaften gibt es keine Veränderung der mechanischen Kennwerte zur Referenzplatte. Nur die Quellung steigt geringfügig mit zunehmendem Gärprodukte-Anteil. Alle Platten mit den Holzsubstituenten beider Chargen erfüllen die Norm-Anforderungen der EN 622-5 Typ MDF.

Aus der Prüfung der Werkstoffeigenschaften von Span- und MDF-Platten mit unterschiedlichen Anteilen von Gärprodukten lässt sich die generelle Schlussfolgerung ziehen, dass es möglich ist, normgerechte MDF- und Spanplatten herzustellen. Die Gärprodukte aus der thermophilen und mesophilen Biogasanlage waren gleichermaßen tauglich und zeigten in den Untersuchungen keine signifikanten Unterschiede. Eine Laboranalyse der Gärprodukte zeigte zudem keine Gesundheitsrisiken für den Endverbraucher und die Arbeitssicherheit am Produktionsstandort (vgl. Anhang A1).

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass eine Substitution von 15-20% der Holzfasern durch Gärprodukte realistisch ist. Trotz der vielversprechenden Laborergebnisse können belastbare Aussagen zur Eignung der Gärprodukte als Rohstoff für die Holzwerkstoffindustrie jedoch erst nach der Durchführung eines großmaßstäblichen Industrieversuchs getätigt werden, wie er im Betriebsversuch zur Herstellung von Laminat-Fußboden erfolgt ist. Generelle Vorteile der Gärprodukte gegenüber anderen nachwachsenden Rohstoffen (Miscanthus, Hanf-Schäben, Flachs, etc.) sind jedoch die ganzjährige Verfügbarkeit, die hohe Menge an potenziell verfügbarem Material sowie die biotechnologische Aufbereitung des Materials im Gärprozess. Im Folgenden ist ein Foto der experimentell hergestellten Span- und MDF-Platten abgebildet.



Abbildung 5: Laborversuche von MDF- und Spanplatten mit unterschiedlichen Anteilen von Gärprodukten

Quelle: nova-Institut 2014

Es wird deutlich, dass sich die Farbe der Span- und MDF-Platten mit zunehmendem Anteil an Gärprodukten verdunkelt. Wegen der bei der Spanplatte und MDF beobachtbaren Farbveränderung wurde mit dem Marketing/Vertrieb festgelegt, dass die derzeit sinnvollste

Option des Gärprodukt-Einsatzes bei einer hochdichten Faserplatte (HDF) mit direkter Weiterverarbeitung zu einem Laminat-Fußboden liegt. Aus diesem Grund wurde ein Betriebsversuch geplant, der im Folgenden geschildert ist.

### **3.1.2.2 Betriebsversuch**

Am 14. April 2013 wurde ein Betriebsversuch bei der LaminatPark GmbH & Co. KG am Standort Eiweiler zur Herstellung von hochdichten Faserplatten (HDF) aus Gärprodukten mit Weiterverarbeitung zu Laminat-Fußboden durchgeführt. Das Ziel des Betriebsversuchs lautete, die Laborergebnisse im laufenden Betrieb zu überprüfen und einen Teil der herkömmlichen Rohstoffe durch Gärprodukte zu ersetzen, um normgerechte HDF-Platten zu produzieren und zu marktkonformem Laminat-Fußboden weiterzuverarbeiten.

Beim Umbau der Produktionsanlage des LaminatParks sowie der Personalplanung wurden sicherheits- und arbeitstechnische Aspekte berücksichtigt. So waren Mitarbeiter bei der Füllung der Zellenradschleuse mit Gärprodukten mit Schutzbrillen und schnittfesten Handschuhen ausgestattet. Aspekte der Seuchenhygiene wurden bereits im Vorfeld des Betriebsversuchs durch eine Laborprüfung untersucht. Eine Gefährdung des Personals durch die Gärprodukte konnte aufgrund der Ergebnisse des Prüfberichts ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse der Laborprüfung finden sich im Anhang A.1.

Zur Vorbereitung des Betriebsversuchs wurden beim Projektpartner BENAS Biogasanlagen GmbH in Kooperation mit der GNS – Gesellschaft für nachhaltige Stoffnutzung mbH eine Menge von 10 Tonnen Gärprodukte produziert. Die Gärprodukte wurden von der Firma BENAS Biogasanlagen GmbH in 50 Bigbags mit einem Gewicht von jeweils ca. 200 Kilogramm für den Betriebsversuch bereitgestellt. Der Transport der Bigbags von der Biogasanlage in Ottersberg zum Standort des LaminatParks in Eiweiler erfolgte durch ein externes Speditionsunternehmen. Auf dem Gelände des LaminatParks wurden die Bigbags mit Hilfe eines Schwerlastkrans auf das Gebäude der Produktionsanlage transportiert. Die Zuführung der Gärprodukte in den Produktionsprozess der HDF-Platten erfolgte mit Hilfe einer Zellenradschleuse. Die Produktion der HDF-Platten erfolgte im laufenden Betrieb, so dass durch die Zuführung der Gärprodukte konventionelle Einsatzstoffe substituiert werden konnten.

Die erfolgreiche Herstellung von HDF-Platten aus Gärprodukten im Labor konnte in einem Betriebsversuch im laufenden Betrieb des LaminatParks reproduziert werden. Dabei wurden 140 m<sup>3</sup> normgerechte HDF-Platten mit einem Anteil von 2% Gärprodukten produziert und zu 19.000 m<sup>2</sup> marktkonformem Laminat-Fußboden weiterverarbeitet.

Die nachfolgende Tabelle liefert einen Überblick über die Werkstoffeigenschaften des produzierten Laminat-Fußbodens. Es wird deutlich, dass eine Substitution von Holz durch Gärprodukte nicht zu negativen Auswirkungen auf die Platteneigenschaften führt. Insbesondere die für die Produktion von Laminatböden wichtigen Parameter wie Querzugsfestigkeit, Abhebefestigkeit und Dickenquellung sind nicht beeinträchtigt worden. Ebenso ist bis auf die dunklere Färbung der HDF-Platte keine optische Beeinträchtigung des Endprodukts Laminat-Fußboden zu bemerken.

Tabelle 4: Werkstoffeigenschaften des produzierten Laminat-Fußbodens

| Werkstoffeigenschaften von Laminat-Fußboden  | Ergebnisse des Betriebsversuchs |
|----------------------------------------------|---------------------------------|
| Querzugfestigkeit                            | 1,4-1,8 N/mm <sup>2</sup>       |
| Quellung                                     | 8-12 %                          |
| Abrieb                                       | AC4                             |
| Optische Beurteilung der Plattenbeschichtung | unauffällig                     |
| Biegefestigkeit                              | 35-45 N/mm <sup>2</sup>         |
| Rohdichte                                    | 830-890 kg/m <sup>3</sup>       |
| Abhebefestigkeit                             | 1,6-2,4 N/mm <sup>2</sup>       |

Quelle: Eigene Darstellung

### 3.2 Techno-ökonomische Evaluierung

Die Nutzung von Gärprodukten in der Holzwerkstoffindustrie ist ein neues Verfahren, das im Rahmen des Projektes entwickelt und durchgeführt wurde. Neben der technischen Machbarkeit spielt insbesondere auch die Wirtschaftlichkeit eine große Rolle, ob und in welchem Umfang ein solches Verfahren zur Anwendung kommt. Da an dem innovativen Verfahren zwei Branchen beteiligt sind, die bisher relativ wenige Berührungspunkte hatten, sollen grundsätzlich zwei Fragen aus unterschiedlicher Betrachtungsperspektive geklärt werden:

- Ist es für den Betreiber einer Biogasanlage attraktiv, die Biogasanlage aufzurüsten und mit Hilfe von Gärprodukten neue Märkte zu erschließen?
- Stellen Gärprodukte eine attraktive Rohstoffquelle zur Verarbeitung in der Holzwerkstoffindustrie dar und zu welchen Preisen stehen sie zur Verfügung?

Aus Sicht der Politik ist es zudem interessant zu wissen, welche Mengen an festen, faserhaltigen Gärprodukten in Deutschland zur Verfügung stehen, und welche Potenziale es für eine stoffliche Nutzung dieser alternativen, nachwachsenden Rohstoffe gibt. Ziel der techno-ökonomischen Evaluierung ist es deshalb,

- die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren im Vergleich zu einer konventionellen Biogasanlage ohne dieses Verfahren darzustellen,
- die Kosten für gestrippte, separierte und für die Holzwerkstoffindustrie aufbereitete Gärprodukte zu ermitteln,
- die Transport- und Logistikkosten zur Bereitstellung der Gärprodukte abzuschätzen und
- das technische Potenzial für die erschließbare Menge an Gärprodukten in Deutschland zu beziffern.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Kostenermittlung der festen und gestrippten Gärprodukte ist ausführlich in Kapitel 3.2.1 dargestellt. Eine Übersicht aller Positionen für die Gesamtrechnung der Wirtschaftlichkeit am Beispiel einer Biogasanlage mit und einer Biogasanlage ohne ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren ist in Anhang A2 dargestellt. Die Transport- und

Logistikkosten zur Bereitstellung der Gärprodukte für die Holzwerkstoffindustrie sind in Kapitel 3.2.2 abgebildet. Das Vorgehen zur Ermittlung des technischen Potenzials ist in Kapitel 3.2.3 dargestellt.

Da eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden, Berechnungen und Annahmen zur Klärung der oben genannten Fragen zum Einsatz gekommen sind, werden diese Aspekte in den jeweiligen Unterkapiteln detailliert beschrieben und Schlussfolgerungen daraus gezogen. Durch eine transparente Darstellung ist eine Übertragung der Ergebnisse und des methodischen Ansatzes auch auf andere Biogasanlagen möglich.

### 3.2.1 Wirtschaftlichkeit des Verfahrens

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden zwei Biogasanlagen identischer Leistung von 3 MW<sub>el</sub>, zum einen mit und zum anderen ohne Aufbereitung der Gärreste verglichen. Um der regional stark variierenden Verwendung von Gärresten Rechnung zu tragen, werden neben dem reinen Vergleich von zwei Biogasanlagen mit und ohne modifiziertes ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren drei Regionen in unterschiedlichen Szenarien dargestellt: eine Ackerbauregion, eine Veredelungsregion (mit hohem Tierbestand) und eine Gemischtreregion. Bei allen Szenarien wird hierbei von der gleichen Gewinnhöhe für beide Biogasanlagen ausgegangen. Daher wird bei der Anlage mit modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren der Preis für die angebotenen festen Gärprodukte als Zielgröße entsprechend angepasst. In der folgenden Abbildung werden beide zu vergleichenden Biogasanlagen schematisch dargestellt.

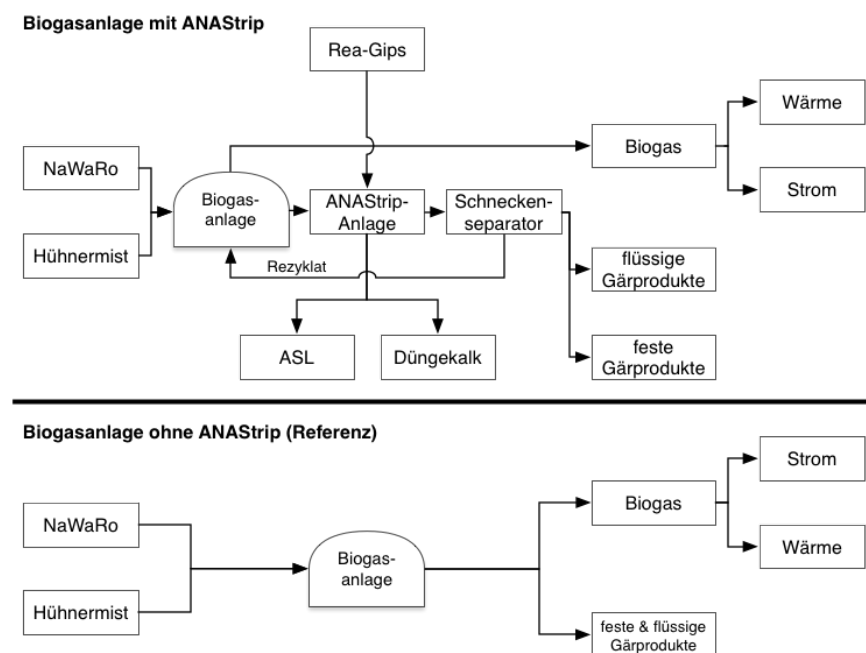


Abbildung 6: Schematische Darstellung zweier Biogasanlagen mit und ohne modifiziertes ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren

Quelle: Eigene Darstellung

Sämtliche Input- und Outputstoffe der Biogasanlage gehen in die Berechnung zu Marktpreisen ein, sodass eine möglichst realitätsnahe Modellierung der beiden zu vergleichenden Biogasanlagen erfolgt. Substratinputs sind in beiden Fällen Maissilage und Hühnermist. Der Substratinput berechnet sich aus dem maximal möglichen Einsatz von

Hühnermist in der Anlage. Zum einen orientiert sich dies an der Substratzusammensetzung der BENAS-Anlage in Ottersberg, zum anderen liegt hier die generelle Annahme zugrunde, dass Hühnermist als relativ kostengünstiges Substrat zum maximal möglichen Einsatz kommt.

Hühnermist ist zwar ein relativ günstiges, jedoch auch sehr stickstoffreiches Substrat. Ammoniak hingegen wirkt toxisch auf die Mikroorganismen, so dass mit einer erhöhten Zufuhr von  $\text{NH}_4$ , das im Gleichgewicht mit  $\text{NH}_3$  steht, eine hemmende Wirkung auf den Biogasprozess auftritt. Der empfohlene  $\text{NH}_4\text{-N}$  Gehalt liegt bei  $<4 \text{ mg/l}$  (KTBL 2006). Die Strippung dient hier der Regulierung des Stickstoffgehaltes im Gärprozess und erlaubt dadurch einen höheren Anteil an Hühnermist in der Substratzusammensetzung. Dieser Effekt wird in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt, ebenso eine durch die Strippung bedingte leicht erhöhte Methanausbeute, die in der Referenzanlage zusätzlichen Substratinputs zum Ausgleich bedarf. Im Fall der Biogasanlage mit Ammoniak-Entfernung durch ANAStrip<sup>®</sup> wird eine Rückführung von 40.000 Tonnen Rezyklat berücksichtigt. Die folgende Tabelle stellt die wichtigsten Betriebsdaten der beiden Anlagen gegenüber.

Tabelle 5: Betriebsdaten der zu vergleichenden Biogasanlagen mit und ohne ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren

|                            |                    | BGA mit<br>ANAStrip <sup>®</sup> | BGA ohne<br>ANAStrip <sup>®</sup> |
|----------------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Gesamtleistung BHKW</b> |                    | <b>3088 kW<sub>el</sub></b>      | <b>3088 kW<sub>el</sub></b>       |
| <b>Substrate</b>           |                    |                                  |                                   |
| Maissilage                 | t/a                | 45.771                           | 55.006                            |
| Hühnermist                 | t/a                | 14.454                           | 3.667                             |
| <b>Gesamt</b>              | <b>t/a</b>         | <b>60.225</b>                    | <b>58.673</b>                     |
| <b>Output</b>              |                    |                                  |                                   |
| Biogas                     | t/a                | 16.140                           | 16.335                            |
| Methan                     | Nm <sup>3</sup> /a | 6.484.276                        | 6.484.323                         |
| Stromproduktion            | kWh/a              | 27.233.960                       | 27.234.158                        |
| <b>Gärprodukte</b>         |                    |                                  |                                   |
| feste Phase                | t/a                | 10.527                           |                                   |
| flüssige Phase             | t/a                | 27.268                           |                                   |
| feste & flüssige Phase     | t/a                |                                  | 42.337                            |
| Ammoniumsulfatlösung       | t/a                | 5.857                            |                                   |
| Düngeralkali               | t/a                | 1.744                            |                                   |

Quelle: Eigene Darstellung

Die Stoffströme einer Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren unterscheiden sich deutlich von Anlagen ohne Strippung. Mithilfe der Zugabe von REA-Gips, einem Nebenprodukt aus der Rauchgasentschwefelung, wird Stickstoff aus dem Prozess in Form von Ammoniumsulfat entzogen. Daneben entsteht Düngeralkali als Co-Produkt des Verfahrens.

Ammoniumsulfat und Düngekalk sind beides zugelassene und transportwürdige Düngemittel, so dass sowohl eine innerbetriebliche Verwendung als Dünger, als auch der Verkauf jeweils eine Nutzungsoption darstellen. Die Berechnung der vorliegenden Studie geht von einem Verkauf aus. Die gestrippten Gärprodukte werden im Anschluss mit einem Schneckenseparator in eine feste und flüssige Phase geteilt. Ein Teil der flüssigen Phase wird in den Gärprozess zurückgeleitet, der andere Teil der flüssigen Gärprodukte kann verkauft oder auf die Felder ausgebracht werden. Die festen, gestrippten und separierten Gärprodukte sind Zielprodukte für die Holzwerkstoffindustrie.

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wird eine Vollkostenrechnung für beide Biogasanlagen durchgeführt. Auf der Einnahmenseite stehen Erlöse aus Strom- und Wärmenutzung inklusive betriebsinterner Heizmitteleinsparungen sowie Erlöse aus dem Verkauf der Gärprodukte und Düngemittel. Auf der Kostenseite werden bei den variablen Kosten die Materialkosten und Betriebsstoffe des Gärprozesses, der Strippung und der Separation berechnet. Weiterhin werden Reparatur- und Wartungskosten, Kosten für Laboranalysen und Maschinenkosten berücksichtigt. Die Fixkosten beinhalten Abschreibung, Zinsansatz bzw. –kosten, Versicherungsbeiträge und Lohnkosten/-ansatz. Abschließend werden noch die Gemeinkostenzuschlag in Form einer Pauschale berechnet.

Die folgende Tabelle stellt die Faktoren dar, die als Leistungen und Kosten in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Biogasanlagen einfließen.

Tabelle 6: Übersicht der Leistungen und Kosten einer Biogasanlage

| Leistungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Kosten                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erlöse aus der Strom- und Wärmeproduktion</li> <li>• Erlöse aus dem Verkauf von Gärprodukten (fest, gestrippt)</li> <li>• Erlöse durch die Produktion von Düngemitteln <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gärreste (flüssig, gestrippt)</li> <li>▪ Ammoniumsulfatlösung (ASL)</li> <li>▪ Düngekalk</li> </ul> </li> </ul> | <p><b>Variable Kosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialkosten (Substrate, REA-Gips)</li> <li>• Betriebsmittel (Strom, Schmieröl, Wasser)</li> <li>• Reparatur- und Wartungskosten</li> <li>• Laboranalysen</li> <li>• Maschinenkosten</li> </ul> <p><b>Fixe Kosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abschreibung, Zinskosten, Versicherung, Lohnkosten</li> </ul> <p><b>Gemeinkosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gemeinkostenzuschlag</li> </ul> |

Quelle: Eigene Darstellung

Die Leistungen und Kosten werden im Folgenden näher erläutert.

### 3.2.1.1 Erlöse aus der Strom- und Wärmeproduktion

Die Erlöse aus der Stromproduktion generieren sich aus der Einspeisung von Strom in das deutsche Stromnetz. Die Einspeisevergütung richtet sich nach dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG). In der vorliegenden Analyse wurde die Vergütungsstruktur einer Altanlage auf Basis des EEG 2009 analog zur untersuchten Anlage des Projektpartners BENAS Biogasanlagen GmbH zugrunde gelegt. Die folgende Tabelle gibt Auskunft über die Vergütungsstruktur zweier Biogasanlagen mit und ohne ANAStrip®-Verfahren.

Tabelle 7: Stromvergütung von Biogasanlagen nach EEG 2009

|                                            |               | BGA mit<br>ANAStrip® | BGA ohne<br>ANAStrip® |
|--------------------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|
| Grundvergütung                             | ct/kWh        | 8,57                 | 8,57                  |
| NAWARO-Bonus                               | ct/kWh        | 4,49                 | 4,49                  |
| Bonus aus Kraft-Wärme-Kopplung             | ct/kWh        | 3,00                 | 3,00                  |
| <i>Anteil Kraft-Wärme-Kopplung</i>         | <i>%</i>      | <i>26%</i>           | <i>15%</i>            |
| Technologie-Bonus                          | ct/kWh        | 2,00                 | 2,00                  |
| <i>Anteil Technologie-Bonus berechtigt</i> | <i>%</i>      | <i>100%</i>          | <i>100%</i>           |
| Luftreinhaltebonus                         | ct/kWh        | 0,16                 | 0,16                  |
| <b>Stromvergütung</b>                      | <b>ct/kWh</b> | <b>16,40</b>         | <b>16,00</b>          |

Quelle: Eigene Darstellung

Im Fall der Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren werden 27.233.960 kWh<sub>el</sub> bei einer durchschnittlichen Einspeisevergütung von 0,164 €/kWh berücksichtigt. Im Fall der Referenzanlage werden 27.234.158 kWh<sub>el</sub> mit einer Einspeisevergütung in Höhe von 0,160 €/kWh berücksichtigt. Die Erlöse belaufen sich aufgrund der Differenz der eingespeisten Strommenge und der Einspeisevergütung auf 4.458.199,30 Euro für den Fall der Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren und 4.368.358,97 Euro für den Fall der Referenzanlage jeweils bezogen auf ein Jahr.

Wärme aus der Kraft-Wärmekopplung kann entweder externen Infrastrukturen mit Wärmebedarf zugeführt werden oder in der Biogasanlage für interne Prozesse genutzt werden. Externe Nutzung von Wärme aus Biogasanlagen wird unter anderem in Nahwärmenetzen realisiert. Beispiele für interne Wärmenutzungskonzepte sind die Beheizung von Wohn- und Wirtschaftsgebäuden, Gewächshäusern oder die Trocknung von Holzschnitzeln und landwirtschaftlichen Gütern.

Als Grundannahme für Erlöse aus der Wärmenutzung wird für beide Biogasanlagen ein Wärmenutzungsgrad von 15% angesetzt, der mit einem Preis von 0,02 € / kWh vergütet wird. Hinzu kommen Erlöse in Form von Heizmitteleinsparungen für die Beheizung von Wohn- und Wirtschaftsgebäuden in Höhe von 2.176 Litern Heizöl, das mit einem Preis von 0,84 Euro in die Berechnung eingeht. Im Falle der Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren wird die darüber hinaus verfügbare Restwärme für die Ammoniak-Entfernung aufgewendet, wodurch insgesamt der Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung im Vergleich zur Referenzanlage auf 26% steigt (vgl. Tabelle 7).

### 3.2.1.2 Erlöse aus dem Verkauf von festen und gestrippten Gärprodukten

Preise für feste und gestrippte Gärprodukte gibt es de facto nicht, da es bisher keine vergleichbare stoffliche Nutzung außer der Verwendung als Düngemitteln gibt. Kalkulatorisch wird daher berechnet, welcher Preis für die festen und gestrippten Gärprodukte erzielt werden müsste, um mit der Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren den gleichen Gewinn zu erzielen wie im Referenzszenario. Die Ergebnisse spiegeln damit aus Sicht eines Biogasanlagenbetreibers die Grenzkosten wieder, die als Minimum der Herstellungskosten von festen und gestrippten Gärprodukten angesetzt werden können.

### 3.2.1.3 Erlöse aus der Produktion von Düngemitteln

In der Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren entstehen neben den festen und gestrippten Gärprodukten für die Holzwerkstoffindustrie drei weitere Nebenprodukte (vgl. Tabelle 5): Ammoniumsulfatlösung, Kalk als handelbarer, mineralischer Dünger sowie flüssige und gestrippte Gärprodukte. Die Produktion von Ammoniumsulfatlösung und Düngekalk ist abhängig vom Stickstoffgehalt im Gärprozess. Je Kilogramm entferntem Stickstoff im modifizierten ANAStrip®-Verfahren fallen 3,6 kg Düngekalk (trocken) und 4,7 kg ASL (trocken), bzw. 18,9 Kilogramm 25-prozentige Ammoniumsulfatlösung an. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden 5.857 Tonnen Ammoniumsulfatlösung und 1.744 Tonnen Düngekalk pro Jahr berücksichtigt. Beide Nebenprodukte werden mit gängigen Marktpreisen bewertet. Der Marktpreis für ASL entspricht 30 Euro pro Tonne. Der Marktpreis für Düngekalk geht mit 25 Euro pro Tonne in die Berechnung ein.

In der Referenzanlage ohne Stripverfahren fallen pro Jahr rund 42.337 t flüssige und feste Gärprodukte an. Im Fall Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren entstehen pro Jahr 27.268 t flüssige und gestrippte Gärprodukte. Sowohl die flüssigen und festen Gärprodukte aus der Referenzanlage als auch die flüssigen und gestrippten Gärprodukte aus der Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren werden je nach Standort mit Kosten für die Entsorgung oder Erlösen aus der Düngewirkung bewertet:

- In Ackerbauregionen sind Gärprodukte als Düngemittel sehr begehrt. Der Düngewert nach RAL-Prüfungszeugnis beläuft sich für den untersuchten Fall der BENAS Biogasanlagen GmbH auf 11,50 €/t<sub>(FM)</sub>. Die Transport- und Ausbringungskosten werden in der Regel von den Abnehmern der Gärprodukte übernommen, so dass die Düngewerte als Erlöse für den Anlagenbetreiber gerechnet werden können.
- In Veredelungsregionen, in denen ein großer Nährstoffüberschuss besteht, werden Gärprodukte in der Regel kostenpflichtig entsorgt und der Nährstoffwert der Gärprodukte nicht berücksichtigt. Die Kosten für den Transport und die Ausbringung der Gärprodukte wird in der vorliegenden Berechnung mit 11,50 €/t<sub>(FM)</sub> Gärprodukt veranschlagt. Die Übereinstimmung dieses Wertes mit dem Düngewert aus der Ackerbauregion ist rein zufälliger Natur und unterliegt keinen weiteren methodischen Annahmen.
- In Gemischtsregionen, in denen weder der Ackerbau noch die Tierproduktion überwiegt, kann von einem Regelfall ausgegangen werden. Hier wiegen sich die Nährstoffwerte der Gärprodukte und die Transport- und Ausbringungskosten in etwa auf. Aus diesem Grund werden in Gemischtsregionen in der vorliegenden Berechnung weder Erlöse noch Kosten berücksichtigt.

### 3.2.1.4 Variable Kosten

Unter den variablen Kosten werden Materialkosten, Betriebsmittel, Reparatur- und Wartungskosten, Laboranalysen und Maschinenkosten berücksichtigt (vgl. Tabelle 6).

Unter Materialkosten werden alle Kosten summiert, die durch den Zukauf der Substrate Maissilage und Hühnertrockenkot (HTK) entstehen. Die zugrunde liegenden Preise für beide Substrate, im Fall von Maissilage 38 Euro pro Tonne und im Fall von HTK 21 Euro pro Tonne, sind Frei-Haus-Preise und entsprechen dem realen Bezugspreis des Projektpartners BENAS. Im Betrieb der Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren ist als zusätzlicher Einsatzstoff REA-Gips notwendig. Der Gipsbedarf liegt bei 6,1 Kilogramm je Kilogramm entferntem Stickstoff. Durch die Ammoniak-Entfernung ist in der Biogasanlage mit ANAStrip®-Verfahren ein wesentlich höherer Einsatz von Hühnermist möglich. Daher unterscheiden sich auch die Materialkosten. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Materialkosten für eine Anlage mit ANAStrip®-Verfahren und eine BGA ohne ANAStrip®-Verfahren.

Tabelle 8: Materialkosten der BGA mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren und der Referenzanlage

|              |         | BGA mit ANAStrip® |                      | BGA ohne ANAStrip® |                      |
|--------------|---------|-------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
|              |         | Einsatzmenge      | Kosten               | Einsatzmenge       | Kosten               |
| Maissilage   | 38,00 € | 45.771 t/a        | 1.739.298 €/a        | 55.006 t/a         | 2.090.209 €/a        |
| HTK          | 21,00 € | 14.454 t/a        | 303.534 €/a          | 3.667 t/a          | 77.008 €/a           |
| REA-Gips     | 10,00 € | 2.172 t/a         | 21.717 €/a           |                    |                      |
| <b>Summe</b> |         |                   | <b>2.064.549 €/a</b> |                    | <b>2.167.217 €/a</b> |

Quelle: Eigene Darstellung

Unter den Betriebsmitteln werden der Eigenstrombedarf sowie der Verbrauch an Wasser und Schmieröl in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt. Der Eigenstrombedarf der Biogasanlage wird anhand des Biogas-Messprogramms II (FNR 2009) geschätzt. Er beträgt im Durchschnitt 7,9% des produzierten Stroms. Für den Eigenstrombedarf des Schneckenseparators und der ANAStrip®-Anlage werden Angaben der BENAS GmbH angesetzt. Der Eigenstrombedarf beträgt hiernach 4 kWh/m<sup>3</sup> für die Stripanlage und 0,3 kWh/m<sup>3</sup> für den Schneckenseparator.

Der Wasserbedarf für Reinigungszwecke beruht auf einer Schätzung der BENAS GmbH. Die Preisannahme für Wasser beträgt 0,67 €/m<sup>3</sup> (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft 2007). Dieser Wert schwankt in Deutschland laut KTBL (2009) zwischen 0,26 €/m<sup>3</sup> und 2,50 €/m<sup>3</sup> (KTBL 2009). Der Wasserbedarf ist jedoch insgesamt wenig relevant für die Wirtschaftlichkeit.

Der Bedarf an Schmieröl für Otto-Gas-Motoren kann mit 300 ml je Betriebsstunde geschätzt werden und wird mit 2 €/l beziffert (KTBL 2009). Der Bedarf orientiert sich mit 2.520 Litern pro Jahr am Bedarf für 1.000 kW-Anlagen.

Reparatur- und Wartungskosten einer BGA können nach KTBL (2009) näherungsweise mit 1-2 % des Anschaffungswertes pro Jahr abgeschätzt werden. In dieser Rechnung wurden 2 % für die Biogasanlage und die ANAStrip®-Anlage angesetzt. Für den Gas-Otto-Motor betragen diese Kosten laut KTBL (2009) rund 0,02 Euro je Kilowattstunde. Für Laboranalysen werden analog zu KTBL (2009) sechs Analysen pro Jahr mit Kosten von 120 Euro je Analyse für

beide Systeme berücksichtigt. Die Maschinenkosten betragen laut KTBL 20,00 Euro je Betriebsstunde bei einer Vollauslastung von 833 Betriebsstunden pro Jahr. Darin sind sowohl die Betriebskosten als auch sämtliche Fixkosten wie bspw. Abschreibung enthalten. In der BGA mit modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren wird eine Vollauslastung mit 833 h/Jahr angenommen, in der Referenzanlage eine Auslastung von 75% bzw. 625 h/Jahr.

### 3.2.1.5 Fixkosten

Unter den Fixkosten wurden die Positionen Abschreibung der Investitionskosten, Zinskosten und Zinsansatz, Versicherung sowie Lohnkosten bewertet.

Die Investitionskosten der Biogasanlage wurden nach der Methodik des Biogasmessprogramms II geschätzt und spezifische Investitionskosten von 1.000 €/kW<sub>el</sub> angenommen. Für Kosten des Planungs- und Genehmigungsverfahrens wurde ein Aufschlag von 10 % der Gesamtinvestitionskosten berechnet (KTBL 2009). Die Investitionskosten für Separator und das modifizierte ANAStrip<sup>®</sup>-System wurden von den Projektpartnern BENAS GmbH sowie der GNS mbH aufgrund ihrer Erfahrungswerte geschätzt. Die Investitionen in eine Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren übersteigen die Investitionen in eine Referenzanlage um rund 1,8 Millionen Euro. Die Einzelpositionen sind in der folgenden Tabelle aufgeschlüsselt.

Tabelle 9: Einzelposten der Investitionskosten für eine Biogasanlage mit und eine Biogasanlage ohne modifiziertes ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren

|                                             | BGA mit ANAStrip <sup>®</sup> | BGA ohne ANAStrip <sup>®</sup> |
|---------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| <b>Biogasanlage und BHKW*</b>               |                               |                                |
| Investitionssumme                           | 3.087.751                     | 3.087.751                      |
| +10% für Planung / Genehmigung              | 308.775                       | 308.775                        |
| <b>Σ Biogasanlage</b>                       | <b>3.396.526</b>              | <b>3.380.773</b>               |
| <b>Strippung und Feststoffseparation*</b>   |                               |                                |
| ANAStrip <sup>®</sup> -Anlage               | 1.600.000                     | -                              |
| Feststoffseparation Gärprodukt <sup>1</sup> | 60.000                        | -                              |
| Feststofflager (Gips, Kalk, Gärprodukt)     | 100.000                       | -                              |
| Flüssigdüngerlager (ASL)                    | 75.000                        | -                              |
| <b>Σ Separation und Strippung</b>           | <b>1.835.000</b>              | -                              |
| <b>Σ Investitionskosten</b>                 | <b>5.231.526</b>              | <b>3.380.773</b>               |

\* Alle Angaben in Euro

Quelle: Eigene Darstellung

Die Abschreibung der Biogasanlage erfolgt anhand der Näherungsrechnung, nach der 44% der Investitionskosten der Kategorie „Technik“ zugeordnet werden und 56% der Kategorie „Bau“. Die Abschreibungsdauer der Technik beträgt 10 Jahre, die Abschreibungsdauer baulicher Maßnahmen 20 Jahre. Diese Vorgehensweise wird im Biogas-Messprogramm II (FNR 2009) als Näherungsrechnung vorgeschlagen. Für die ANAStrip<sup>®</sup>-Anlage wird die

Nutzungsdauer auf 10 Jahre geschätzt, das Feststofflager mit 30 Jahren und das Flüssiglager mit 20 Jahren angesetzt. Beim Feststoffseparator wird eine Nutzungsdauer von 10 Jahren angenommen. Die Abschreibung für den Fuhrpark ist in den Betriebskosten enthalten.

Nach FNR (2009) beträgt der Eigenkapitalanteil beim Neubau von Biogasanlagen im Durchschnitt etwa 16%. Aufgrund veränderter Rahmenbedingungen ist davon auszugehen, dass dieser Teil heute erheblich höher ist. In der vorliegenden Berechnung wird daher von einer Eigenkapitalquote von 30% ausgegangen. Der Zinsansatz auf das Eigenkapital beträgt 4% des halben Anschaffungswertes (KTBL 2009). Die Zinskosten des Fremdkapitals werden mit einem Zinsfuß von 7% auf 10 Jahre mit 12 Raten/Jahr berechnet.

Für die Versicherungskosten werden in Anlehnung an KTBL (2009) 0,5% der Investitionssumme angesetzt.

Der Arbeitskraftbedarf der Biogasanlage wird näherungsweise mit 4 Akh / kW<sub>el</sub> und Jahr berechnet. Für das Gesamtverfahren mit Separation und Strippung wird ein zusätzlicher Arbeitskraftbedarf von 1 Ak/Jahr ( $\hat{=}$  1.760 h mit 220 Arbeitstagen à 8 h) geschätzt analog des Arbeitskraftbedarfs der BENAS Biogasanlagen GmbH. Als Lohnansatz sind 17,50 €/h berücksichtigt.

#### **3.2.1.6 Gemeinkosten**

Als Gemeinkostenzuschlag werden 10 €/kW<sub>el</sub> angesetzt (KTBL 2009). Für den Betrieb der ANAStrip<sup>®</sup>-Anlage werden keine zusätzlichen Gemeinkosten berechnet. Der Gemeinkostenzuschlag beläuft sich daher sowohl für die Referenzanlage ohne Ammoniak-Entfernung als auch für die Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren auf 30.877,51 Euro pro Jahr.

#### **3.2.1.7 Ergebnisse**

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wird die Annahme geprüft, welcher Verkaufspreis angesetzt werden müsste, um mit einer Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren den gleichen Gewinn zu erwirtschaften wie mit einer Biogasanlage ohne das Verfahren. Ein wichtiger Einflussfaktor auf das Ergebnis ist die regionale Zuordnung der Biogasanlagen, da die Einschätzung über die Wertigkeit der Gärprodukte als Düngemittel stark variiert. Die folgenden Ergebnisse zeigen die Gegenüberstellung einer BGA mit, und einer BGA ohne modifiziertes ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren bei gleichem Gewinn in drei unterschiedlichen Regionen. Eine ausführliche Darstellung aller zugrunde liegenden Annahmen und Berechnungen ist in Anhang A2 dargestellt.

Anhand der folgenden Tabelle lässt sich schließen, dass die Gesamtkosten für den Betrieb einer Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren jährlich 411.642 Euro über den Gesamtkosten für den Betrieb einer Biogasanlage ohne modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren liegen. Das ist hauptsächlich auf die höheren Fixkosten zurückzuführen, die u.a. durch die hohen Investitionen und Zinskosten entstehen. Diese Ergebnisse sind standortunabhängig und gelten somit gleichermaßen in Veredelungsregionen, Gemischtsregionen und Ackerbauregionen.

Tabelle 10: Ergebnisübersicht der Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage mit und einer Biogasanlage ohne modifiziertes ANAStrip®-Verfahren in drei unterschiedlichen Regionen

|                                                                                   | Veredelungsregion |                    | Gemischregion     |                    | Ackerbauregion    |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
|                                                                                   | BGA mit ANAStrip® | BGA ohne ANAStrip® | BGA mit ANAStrip® | BGA ohne ANAStrip® | BGA mit ANAStrip® | BGA ohne ANAStrip® |
| <b>Gesamtkosten*</b>                                                              | <b>3.939.202</b>  | <b>3.527.560</b>   | <b>3.939.202</b>  | <b>3.527.560</b>   | <b>3.939.202</b>  | <b>3.527.560</b>   |
| <i>Summe vK</i>                                                                   | <i>3.004.577</i>  | <i>3.000.973</i>   | <i>3.004.577</i>  | <i>3.000.973</i>   | <i>3.004.577</i>  | <i>3.000.973</i>   |
| <i>Summe fK</i>                                                                   | <i>903.747</i>    | <i>495.709</i>     | <i>903.747</i>    | <i>495.709</i>     | <i>903.747</i>    | <i>495.709</i>     |
| <i>Gemeinkosten</i>                                                               | <i>30.878</i>     | <i>30.878</i>      | <i>30.878</i>     | <i>30.878</i>      | <i>30.878</i>     | <i>30.878</i>      |
| <b>Σ Leistungen*</b>                                                              | <b>4.376.652</b>  | <b>3.965.010</b>   | <b>4.863.531</b>  | <b>4.451.889</b>   | <b>5.350.410</b>  | <b>4.938.768</b>   |
| Deckungsbeitrag*                                                                  | 1.372.075         | 964.037            | 1.858.954         | 1.450.916          | 2.345.833         | 1.937.795          |
| <b>Gewinn*</b>                                                                    | <b>437.451</b>    | <b>437.451</b>     | <b>924.330</b>    | <b>924.330</b>     | <b>1.411.209</b>  | <b>1.411.209</b>   |
| <b>Herstellingspreis für feste, gestrippte Gärprodukte (€ / t<sub>(TM)</sub>)</b> |                   |                    |                   |                    |                   |                    |
|                                                                                   | <b>-25,87</b>     | <b>/</b>           | <b>37,45</b>      | <b>/</b>           | <b>100,76</b>     | <b>/</b>           |

\* Alle Angaben in Euro pro Jahr

Quelle: Eigene Darstellung

Die Leistungen unterscheiden sich durch die standortabhängige Bewertung der Gärprodukte jedoch deutlich voneinander. In Ackerbauregionen, in denen Nährstoffe ein gefragtes Gut sind, können höhere Erlöse durch den Verkauf der nährstoffreichen Gärreste erzielt werden als in beiden anderen Regionen. In Veredelungsregionen, in denen ein Nährstoffüberschuss besteht, müssen die Gärreste dagegen kostenpflichtig entsorgt werden. Die höchsten Gewinne für Anlagenbetreiber sind daher in Ackerbauregionen zu erwarten. Die geringsten Gewinne sind dagegen in Veredelungsregionen zu erwarten.

Der Herstellungspreis für feste und gestrippte Gärprodukte ist dementsprechend dort am höchsten, wo mit der alternativen Verwendung als Dünger der höchste Gewinn erzielt werden kann. In einer Ackerbauregion müsste eine Tonne Trockenmasse fester und gestrippter Gärprodukte rund 100 Euro kosten, um den gleichen Gewinn für eine Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren gegenüber einer Referenzanlage ohne dieses Verfahren zu erzielen. In Gemischregionen ist ein kalkulatorischer Herstellungspreis von 37,45 € / t<sub>(TM)</sub> realistisch. In Veredelungsregionen können theoretisch auch negative Preise, d.h. zusätzliche

Kosten für die Entsorgung, entstehen. Dies ist jedoch nur ein hypothetischer Fall, da ein Anlagenbetreiber keine Investitionen in ein neuartiges Verfahren vornehmen würde, ohne einen Mehrwert zu generieren.

Grundsätzlich ist deshalb festzuhalten, dass Biogasanlagen mit einem modifizierten ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren wirtschaftlich betrieben werden können und dabei einen attraktiven Rohstoff für die Holzwerkstoffindustrie herstellen – und dies insbesondere in Veredlungsregionen, aber auch in Gemischtsregionen. Nur in Ackerbauregionen wird es schwierig, da hier die Gärreste einen hohen Düngewert besitzen und daher für eine stoffliche Nutzung in der Holzwerkstoffindustrie zu teuer sind.

Die Investitionen in eine Ammoniak-Entfernung mit dem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren lohnt sich in besonderem Maße bei großen Bestandsanlagen, die ausreichend Gärprodukte liefern. Diese können feste und gestrippte Gärprodukte für unter 75 €/t<sub>atro</sub> herstellen und sind damit konkurrenzfähig gegenüber herkömmlichen Holzrohstoffen.

Nach der aktuellen Fassung des EEG aus dem Jahr 2014 ist die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen kritisch. Ohne Zusatzerlöse lässt sich der Neubau einer Biogasanlage kaum noch verwirklichen, was man an den Statistiken zur Inbetriebnahme neuer Anlagen bereits deutlich erkennen kann. Die ersten großen Betreiber von Biogasanlagen haben bereits Insolvenz angemeldet.

Dies ist eine Chance für den Einsatz des modifizierten ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahrens, das sowohl den Betrieb von Altanlagen als auch Neuanlagen optimieren kann: Durch die Nutzung von Wirtschaftsdünger wie Hühnertrockenkot können die Substratkosten erheblich reduziert werden. Hinzu kommt, dass durch ein verbessertes Düngemanagement und die Nutzung von ASL und Düngerkalk Kosten für mineralische Dünger eingespart werden können. Durch eine Vermarktung der gestrippten und festen Gärprodukte können darüber hinaus zusätzliche Einnahmen für das Unternehmen erzielt werden. Technische und wirtschaftliche Optimierungspotenziale für das ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren, wie bspw. ein höherer Mechanisierungsgrad, können die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlagen zusätzlich in großem Maße erhöhen.

Schlussendlich bedarf es allerdings einer beträchtlichen logistischen Leistung, Gärprodukte für die Holzwerkstoffindustrie verfügbar zu machen. Vermutlich gelingt es nur sehr großen Anlagenbetreibern bzw. Betreibern mehrerer Anlagen, die Gärprodukte in ausreichender Qualität und Quantität über einen konstanten Zeitraum zur Verfügung zu stellen. Der Einflussfaktor Logistik auf die Wirtschaftlichkeit von Gärprodukten ist daher im folgenden Kapitel eingehend beschrieben.

### **3.2.2 Transport- und Logistikkosten**

Neben den Herstellkosten der Gärprodukte spielen die Transport- und Logistikkosten eine große Rolle. Um gegenüber herkömmlichen Rohstoffen für die Holzwerkstoffindustrie konkurrenzfähig zu sein, sind Transport- und Logistikkosten so niedrig zu halten, dass der Gesamtpreis unter 75 €/t bleibt, um mit anderen Holzrohstoffen konkurrieren zu können. Im Folgenden werden die Transport- und Logistikkosten in Abhängigkeit von Schüttdichte und Transportentfernung berechnet. Anhand einer Sensitivitätsanalyse wird berechnet, ab welcher Distanz zwischen Produktionsort der Gärprodukte und Verarbeiter der wirtschaftliche Einsatz unter Berücksichtigung der Bezugspreise von konventionellen Rohstoffen möglich ist.

Im beschriebenen Betriebsversuch wurden die Fasern als Stückgut in Bigbags von Ottersberg nach Eiweiler gefahren (vgl. Kapitel 3.1.2). Dies macht jedoch im Dauerbetrieb aus Kostengründen keinen Sinn. Zum einen sind Gärprodukte in Bigbags nur eingeschränkt stapelbar, und zum anderen kann bei Schüttguttransporten eine größere Ladedichte und ein insgesamt höherer Auslastungsgrad erreicht werden. Eine praktikable Lösung ist der Transport via Schubbodenaufleger mit einem Fassungsvermögen von ca. 92 m<sup>3</sup> und 25t Ladegewicht. Diese Alternative wird im Folgenden weiter betrachtet.

Für die Berechnung der Transport- und Logistikkosten wurden Annahmen getroffen, die in der folgenden Tabelle dargestellt sind.

Tabelle 11: Annahmen zur Kalkulation der Transport- und Logistikkosten

| Annahme                          |             | Quelle                                                                                                       |
|----------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dieselpreis                      | 1,40 €      | Annahme basierend auf ADAC (2013)                                                                            |
| Verbrauch (l/100km)              | 30 l/100 km | Spielmann et al (2010), Durchschnittswert, gewichtsunabhängig                                                |
| Lohnkosten (Fahrer)              | 15,00 €/h   | Auskunft BENAS                                                                                               |
| Auftragskosten                   | 20 %        | Annahme (Pauschalzuschlag auf die Auftragssumme)                                                             |
| Rückführung                      | 50 %        | Annahme (Zuschlag auf die variablen Kosten); Ein Aufschlag von 50% heißt, jeder zweite LKW fährt leer zurück |
| Ø-Geschwindigkeit Autobahn       | 65 km/h     | Cargoforum (2013)                                                                                            |
| Ø-Geschwindigkeit Nicht-Autobahn | 40 km/h     | Ebd., Geschwindigkeit inner- und außerorts gemittelt                                                         |
| Maut                             | 0,19 €/km   | Kategorie C S3 ohne PMK, S2 mit PMK 1, 2, 3 oder 4 (Tollcollect 2013)                                        |

Quelle: Eigene Darstellung

Beispielhaft ist in der folgenden Tabelle die Kalkulation eines Transportvorganges auf Basis einer Distanz von 561 km für die Strecke zwischen Ottersberg und Heusweiler dargestellt.

Tabelle 12: Kalkulation eines Transportvorganges

| Fixkosten                          | [in €]        | Berechnung / Quelle                         |
|------------------------------------|---------------|---------------------------------------------|
| Abschreibung (Hänger)              | 14,33         | KTBL (2006); Sattelheck Kippauflieger (34t) |
| Abschreibung (LKW)                 | 49,86         | KTBL (2006); Zweiachsig für Kippauflieger   |
| Auftragsbearbeitung                | 157,85        | 20% der Auftragssumme                       |
| <b>Variable Kosten</b>             |               |                                             |
| Lohnkosten                         | 148,75        | Fahrdauer*Lohn                              |
| Diesel (voll)                      | 235,62        | Distanz*Verbrauch                           |
| Maut                               | 98,99         | Distanz*Autobahnanteil*Maut                 |
| Rückführung                        | 241,68        | 50% Aufschlag auf var. Kosten               |
| <b>Summe (je Transportvorgang)</b> | <b>947,09</b> |                                             |
| je t Transportgut                  | 56,88         | Trocken (TS-Gehalt 91%); 16,65t             |
| je t Transportgut                  | 68,63         | Trocken (TS-Gehalt 91%); 13,8t              |
| je t Transportgut                  | 126,28        | Feucht (TS-Gehalt 25%)                      |
| je km                              | 1,69          |                                             |
| je h                               | 95,50         |                                             |

Quelle: Eigene Darstellung

In der folgenden Tabelle ist der Zusammenhang zwischen Produktpreis und Distanz skizziert. Bei den Transportpreisen handelt es sich um Frei-Haus-Preise. In der Zeile „- €“ können die reinen Logistikkosten abgelesen werden. Mit steigenden Produktionskosten, sowie zunehmenden Entfernungen nimmt die Wirtschaftlichkeit ab. Dieser Zusammenhang ist in der Tabelle farblich hervorgehoben. Die in Konkurrenz zu konventionellen Rohstoffen wirtschaftlichen Konstellationen von Produktionskosten und Distanzen von Gärprodukten für die Holzwerkstoffindustrie sind grün gefärbt. Alle rot gefärbten Preise weisen auf die nicht vorhandene Konkurrenzfähigkeit am Markt hin.

Tabelle 13: Distanz-Kosten-Matrix bei einem Ladegewicht von 15,2 t

|                   |         | Transportdistanz |         |         |          |          |          |
|-------------------|---------|------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
|                   |         | 100 km           | 200 km  | 300 km  | 400 km   | 500 km   | 600 km   |
| Produktionskosten | - €     | 15,12 €          | 25,34 € | 35,55 € | 45,76 €  | 55,98 €  | 66,19 €  |
|                   | 20,00 € | 35,12 €          | 45,34 € | 55,55 € | 65,76 €  | 75,98 €  | 86,19 €  |
|                   | 30,00 € | 45,12 €          | 55,34 € | 65,55 € | 75,76 €  | 85,98 €  | 96,19 €  |
|                   | 40,00 € | 55,12 €          | 65,34 € | 75,55 € | 85,76 €  | 95,98 €  | 106,19 € |
|                   | 50,00 € | 65,12 €          | 75,34 € | 85,55 € | 95,76 €  | 105,98 € | 116,19 € |
|                   | 60,00 € | 75,12 €          | 85,34 € | 95,55 € | 105,76 € | 115,98 € | 126,19 € |

Quelle: Eigene Darstellung

Bei einem Preis von 40,00 € pro Tonne an Gärprodukten ist ein Transport dementsprechend nur bis zu einer Entfernung bis maximal 300 km wirtschaftlich machbar, wenn die Grenzkosten von 75,00 € für einen konventionellen Rohstoff der Holzwerkstoffindustrie nicht überschritten werden dürfen. Die Transport- und Logistikkosten sind somit ein wesentlicher Einflussfaktor für den Bezugspreis der Gärprodukte. Eine gewisse geografische Nähe von Biogasanlagen und potenziellen Abnehmern aus der Holzwerkstoffindustrie erscheint unter diesen Gesichtspunkten unabdingbar.

### 3.2.3 Potenziale von Gärprodukten in Deutschland

In welchen Mengen sind die festen, faserhaltigen Bestandteile von Gärprodukten als Rohstoff für die Holzwerkstoffindustrie in Deutschland verfügbar? Diese Frage wird im Folgenden anhand einer Potenzial-Schätzung beantwortet.

Das theoretische Potenzial beschreibt „*das in einer gegebenen Region innerhalb eines bestimmten Zeitraums unter gegebenen physikalischen Gegebenheiten theoretisch nutzbare Angebot*“ eines biogenen Rohstoffs (Eltrop et al. 2014, S. 20). In Deutschland fallen jährlich rund 60 Millionen Tonnen Frischmasse von Gärprodukten an (Wragge et al. 2013). Doch nur die festen, faserhaltigen Bestandteile sind als Rohstoff für die Holzwerkstoffindustrie von Interesse. Wissenschaftliche Untersuchungen, die Gärprodukte aus Praxisbetrieben in Baden-Württemberg auf Nährstoffmenge und -qualität und resultierende Düngewirkung hin analysierten, ermittelten einen durchschnittlichen Gehalt an Trockensubstanz in Gärprodukten von 7% (Amon et al. 2013). Dieser Anteil kommt als theoretisches Potenzial für eine stoffliche Nutzung in Betracht und entspricht ca. 4,2 Millionen Tonnen Trockenmasse.

Seit dem Jahr 2000 ist die Anzahl von Biogasanlagen in Deutschland sprunghaft von etwa 1.000 auf 7.700 Anlagen im Jahr 2013 gestiegen (DBFZ 2014). Das entspricht einem jährlichen Wachstum von etwa 17%. Dieser Trend wird sich aufgrund veränderter politischer Rahmen- und Förderbedingungen in Deutschland wahrscheinlich nicht fortsetzen. Der Neubau von Biogasanlagen ist derzeit für Betreiber und Investoren nicht mehr attraktiv, was durch den sinkenden Neubau von Anlagen bestätigt wird (DBFZ 2014). Aus diesem Grund schätzen die Autoren der vorliegenden Studie, dass das theoretische Potenzial in Deutschland in Zukunft kaum steigen und nach Auslaufen der Fördergelder durch das EEG ab dem Jahr 2020 eher sinken wird.

Das technische Potenzial beschreibt den Anteil des theoretischen Potenzials, „*der unter Berücksichtigung der derzeitigen technischen Möglichkeiten nutzbar ist*“ (Eltrop et al. 2014, S. 20). Die kritische Größe hinsichtlich der technischen Machbarkeit ist die Effizienz der Separierung, in der die flüssigen von den festen Bestandteilen der Gärprodukte getrennt werden. Kerkerling (2013) analysierte die Effizienz unterschiedlicher Techniken zur Separierung von Gärprodukten und kommt zum Ergebnis, dass ca. 20-25% Trockenrückstand mit Hilfe von Wendelfilter, Siebbandpresse und Pressschnecke zum heutigen Stand der Technik aus den Gärprodukten gewonnen werden können. Das technische Potenzial entspricht damit bis zu 1,5 Millionen Tonnen Trockenmasse an Fasern, die innerhalb eines Jahres in Deutschland stofflich genutzt werden können.

Das wirtschaftliche Potenzial beschreibt den Anteil des technischen Potenzials, der unter den Wettbewerbsbedingungen des Marktes realisiert werden kann. Wie groß das wirtschaftliche Potenzial ist, kann derzeit nicht eindeutig beziffert werden. Geht man zum Beispiel davon aus, dass aufgrund der Skaleneffekte in der Produktion nur die Betreiber von Biogasanlagen mit einer installierten Leistung größer als 500 kW<sub>el</sub> in die neuartige Technologie investieren, dann sind das nur etwa 20% der bestehenden Biogasanlagen in Deutschland. Letztendlich ist

jedoch auch eine Nachfrage nach den festen, faserhaltigen Bestandteilen der Gärprodukte für Investitionen in der Biogasbranche erforderlich. Insofern bleibt abzuwarten, ob einzelne Betreiber durch geschickte Verhandlungen mit der verarbeitenden Industrie neue Absatzmärkte finden und das Konzept umsetzen.

Die folgende Abbildung stellt die unterschiedlichen Potenzialbegriffe und Mengen an Gärprodukten graphisch dar.

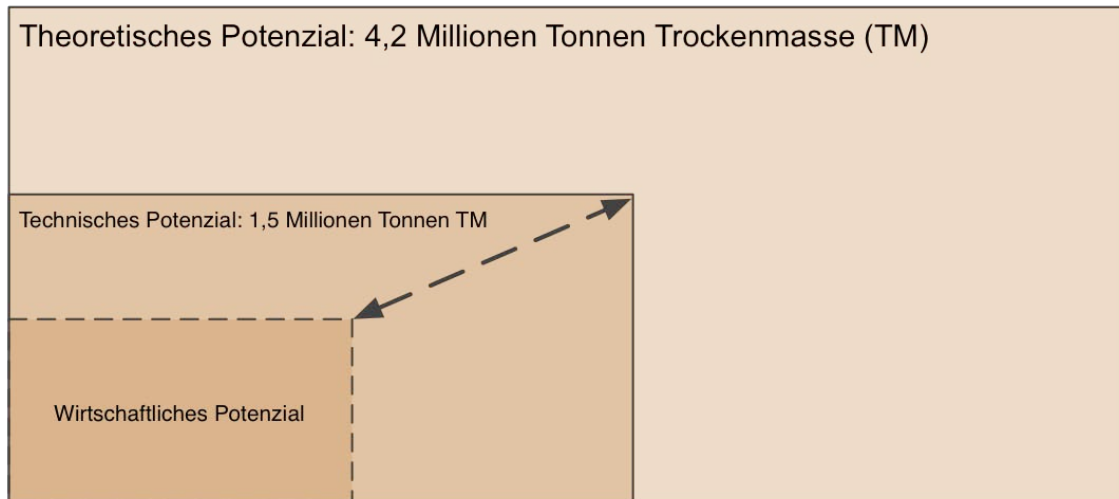


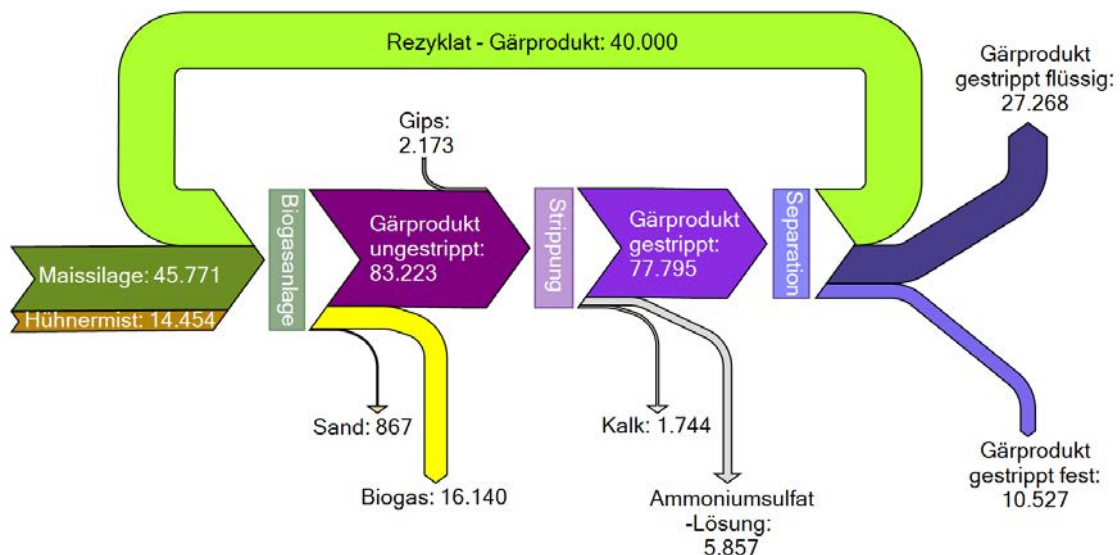
Abbildung 7: Potenziale für feste, faserhaltige Bestandteile von Gärprodukten in Deutschland

Quelle: Eigene Darstellung

### 3.3 Ökologische Bewertung

Zur ökologischen Bewertung des Verfahrens wurden der praxisübliche Einsatz von Gärprodukten als Dünger einerseits, und der Einsatz der Gärprodukte als Rohstoff zur Herstellung von Holzwerkstoffen, sowie die Nutzung der Koppelprodukte Ammoniumsulfatlösung und Düngekalk andererseits verglichen. Eine energetische Verwendung in Form von Brennstoffpellets hat sich in Deutschland unter anderem durch die starke Schlackenbildung beim Verbrennen und emissionsrechtliche Bedenken nicht etabliert (Arndt & Wagner 2009). Aus diesem Grund wird auf einen Vergleich zwischen einer stofflichen und energetischen Verwendung verzichtet. Ziel der ökologischen Bewertung ist es deshalb, die konkurrierenden stofflichen Nutzungsoptionen für Gärprodukte unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes zu vergleichen.

Grundlage der Berechnung bilden die beiden Systeme analog zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, das heißt, eine Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren auf der einen Seite, und als Referenzsystem eine Biogasanlage ohne ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren. Die folgende Abbildung stellt die Stoffströme der Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren graphisch dar. Alle Stoff- und Mengenangaben sind mit den Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit identisch.



alle Angaben ohne Einheit in t/a

Abbildung 8: Stoffstromanalyse einer Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren

Quelle: Eigene Darstellung

Bei dem Systemvergleich werden der Substrateinsatz, der Bau und Betrieb der Anlagen, die Nutzungsphase der jeweiligen Produkte und Koppelprodukte sowie mögliche Zusatzeffekte berücksichtigt und eine Treibhausgasbilanz erstellt. Die Unterschiede der Treibhausgasbilanzen beider Biogasanlagen lassen sich wie folgt vereinfacht berechnen:

$$\Delta \text{THG} = (S_1 - S_2) + (A_1 - A_2) + (G_1 - G_2) + Z$$

mit

$\Delta \text{THG}$  = Differenz der Treibhausgasemissionen

$S_1$  = Substrateinsatz BGA<sub>1</sub> |  $S_2$  = Substrateinsatz BGA<sub>2</sub>

$A_1$  = Anlage und Betrieb<sub>1</sub> |  $A_2$  = Anlage und Betrieb<sub>2</sub>

$G_1$  = Gärproduktnutzung<sub>1</sub> |  $G_2$  = Gärproduktnutzung<sub>2</sub>

$Z$  = Zusatzeffekte

Sowohl die Referenzanlage als auch die Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip-Verfahren® basieren auf den Substraten Maissilage und Hühnertrockenkot. Hühnertrockenkot geht als Abfallprodukt der Tierproduktion ohne THG-Emissionen in die Bilanz mit ein. Die Emissionen der Maissilage umfassen die gesamte Vorkette der landwirtschaftlichen Produktion vom Feld bis zum Lager, d.h. Aussaat, Düngung, Häckseln, Transport und Lagerung. Sowohl bei Maissilage als auch bei Hühnertrockenkot werden die Transportemissionen vom Produktionsstandort bis zur Biogasanlage kalkuliert. Unberücksichtigt bleiben Fruchtfolgeeffekte sowie THG-Emissionen durch Landnutzungsänderungen. Die folgende Tabelle umfasst die unterschiedlichen THG-Emissionen für den Substratinput beider Systeme inklusive der Transportemissionen.

Tabelle 14: Vergleich der THG-Emissionen der Substratinputs inklusive Lieferung

| Substratinput                |                               | BGA mit ANASrip | BGA ohne ANASrip |
|------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|
| <b>Substrate</b>             |                               |                 |                  |
| Maissilage                   | t/a                           | 45.771          | 55.006           |
| THG Anbau                    | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / t   | 49,9            | 49,9             |
| THG Maissilage               | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / a   | 2.283.973       | 2.744.799        |
| Hühnermist                   | t/a                           | 14.454          | 3.667            |
| THG Hühnermist               | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / a   | 0               | 0                |
| <b>Transporte</b>            |                               |                 |                  |
| Transportdistanz Maissilage  | km                            | 10              | 10               |
| Transportdistanz Hühnermist  | km                            | 20              | 20               |
| Transportleistung Maissilage | tkm / a                       | 457.710         | 550.060          |
| Transportleistung Hühnermist | tkm / a                       | 289.080         | 73.340           |
| THG Traktor (Euro 3)         | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / tkm | 0,309           | 0,309            |
| THG LKW (Euro 3)             | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / tkm | 0,184           | 0,184            |
| THG Maissilage               | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / a   | 141.432         | 169.969          |
| THG Hühnermist               | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / a   | 89.326          | 22.662           |
| <b>THG gesamt</b>            | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / a   | 2.514.731       | 2.937.430        |
|                              | t CO <sub>2</sub> -Äq. / a    | 2.515           | 2.937            |

Quelle: Eigene Darstellung

Anhand der Tabelle wird deutlich, dass durch die unterschiedlichen Inputmengen der Substrate bei gleicher elektrischer Leistung der Biogasanlagen rund 422 Tonnen THG-Emissionen eingespart werden können. Allerdings entstehen durch den Stromverbrauch für den Betrieb der ANASrip<sup>®</sup>-Anlage und die Separation von festen und flüssigen Gärprodukten, durch das zusätzliche Betriebsmittel REA-Gips sowie durch den Bedarf an Materialien für den Bau der ANASrip<sup>®</sup>-Anlage zusätzliche Aufwendungen in Form von THG-Emissionen, die bei der Referenzanlage nicht auftreten.

Tabelle 15: THG-Emissionen für den Bau und Betrieb der ANASrip-Anlage

| Position                         | Einheit                       | Wert    |
|----------------------------------|-------------------------------|---------|
| Strom für Strippung & Separation | kWh /a                        | 356.211 |
| THG Strom Mix Deutschland        | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / kWh | 0,610   |
| THG Strom                        | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / a   | 203.053 |
| REA-Gips für Strippung           | t/a                           | 2.171   |
| THG                              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / t   | 117     |
| THG REA-Gips                     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / a   | 254.007 |
| Material für Bau der Anlage      | t CO <sub>2</sub> -Äq. / a    | 0,887   |
| THG gesamt                       | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / a   | 471.297 |
|                                  | t CO <sub>2</sub> -Äq. / a    | 471     |

Quelle: Eigene Darstellung

In den Berechnungen werden für den Bau der ANAStrip®-Anlage sowie zusätzliche Gärproduktlager zwei Tonnen Kies und Sand, zwei Tonnen Beton und fünf Tonnen Stahl berücksichtigt. Die bei der Produktion dieser Materialien anfallenden Emissionen werden entsprechend der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über einen Zeitraum von zehn Jahren linear abgeschrieben. Insgesamt entstehen beim Bau und Betrieb der ANAStrip®-Anlage somit THG-Emissionen in Höhe von 471 Tonnen pro Jahr.

Neben den Unterschieden in den Substratzufuhren und dem Anlagenbetrieb weisen die beiden zu vergleichenden Biogasanlagen zudem einen Unterschied in der produzierten Strommenge auf. Durch den verbesserten Methanaufschluss im ANAStrip®-Verfahren ist eine zusätzliche Stromproduktion von 89.840 Kilowattstunden möglich. Die zusätzliche Stromproduktion kann als Gutschrift für die Biogasanlage berücksichtigt werden. Als mögliche Methoden zur Berechnung der Gutschrift kann die Marginalbetrachtung gegenüber einer fossilen Bereitstellung mit Kohle und Erdgas herangezogen werden oder eine Durchschnittsbetrachtung gegenüber dem aktuellen Strommix durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen methodischen Vorgehensweisen zur Berechnung der Gutschriften sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 16: Gutschriften für zusätzlich produzierten Strom durch erhöhte Methanausbeute

| Position               | Einheit                       | Marginalbetrachtung | Durchschnittsbetrachtung |
|------------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------------|
| Produzierter Strom     | kWh / a                       | 89.840              | 89.840                   |
| Substitutionspotenzial | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / kWh | 0,779               | 0,610                    |
| Gutschrift             | kg CO <sub>2</sub> -Äq. / a   | 69.985              | 54.802                   |

Quelle: Eigene Darstellung

Anhand der Rechnungen wird deutlich, dass mit dem ANAStrip-Verfahren durch den erhöhten Methanaufschluss jährlich zwischen 55 und 70 Tonnen THG-Emissionen im Vergleich zur Referenzanlage eingespart werden können.

Gärprodukte werden in der Landwirtschaft als organischer Dünger eingesetzt, um die Rückführung von Nährstoffen in den Stoffkreislauf zu sichern und Kosten durch die Substitution von Mineraldünger einzusparen. Bei der Berechnung der THG-Emissionen können deshalb bei der Referenzanlage Gutschriften für Äquivalenzprozesse und substituierte Produkte (Mineraldünger) berücksichtigt werden. Als Aufwendungen werden der Bau und das Material für Lager, der Transport und die Ausbringung der Gärprodukte in der THG-Bilanz berücksichtigt. Bei der Lagerung wird von einem gasdichten Abschluss ausgegangen, weshalb keine Lagerverluste von Methan in der Kalkulation berücksichtigt werden.

Nach Schmehl et al. (2012) können für den Bau zusätzlicher Lager für Gärprodukte Materialaufwendungen in Höhe von 6,5 Tonnen Kies und Sand, 29,2 Tonnen Beton, 0,8 Tonnen Stahl, 2 Kilogramm Kupfer, 35 Kilogramm PVC und 26 Kilogramm PE-Folie berücksichtigt werden. Die THG-Emissionen werden entsprechend der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über einen Zeitraum von zehn Jahren linear abgeschrieben. Insgesamt entstehen beim Bau und der Lager THG-Emissionen in Höhe von 476 Kilogramm pro Jahr.

Für den Transport der Gärprodukte wird eine Distanz von 20 Kilometern angenommen. Bei einer Transportmenge von 42.337 Tonnen Gärprodukte pro Jahr entspricht dies einer Transportleistung 846.740 Tonnenkilometer pro Jahr. Als spezifische THG-Emissionen der Transportmittel werden 0,212 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Tonnenkilometer angenommen. Daraus ergeben sich THG-Emissionen von ca. 180 Tonnen pro Jahr. Bei den THG-Emissionen, die beim Ausbringen der Gärprodukte anfallen, werden ein Schleppschlauch für den Anteil der flüssigen Gärprodukte und eine Kurzscheibenegge für die Unterarbeitung der Gärprodukte in den Boden berücksichtigt. Dabei fallen insgesamt etwa 103 Tonnen THG-Emissionen an.

Durch die Nährstoffe, die in den Gärprodukten enthalten sind, können Emissionen bei der Produktion von Mineraldünger durch den Substitutionseffekt eingespart werden. Bei einer Applikation von 42.337 Tonnen Gärprodukte werden dem Boden etwa 350 Tonnen Stickstoff, 50 Tonnen Phosphor und 210 Tonnen Kalium zugeführt. Allerdings können im Fall von Stickstoff nur etwa 70% dieser Menge als Mineraldüngeräquivalent bei der Berechnung des Substitutionspotenzials berücksichtigt werden. Legt man Literaturwerte für die THG-Emissionen von Diammoniumphosphat und Kaliumchlorid zugrunde, können auf diese Weise THG-Emissionen in Höhe von 860 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Jahr eingespart werden.

Im Fall der Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren entstehen neben den festen und flüssigen Gärprodukten auch die Koppelprodukte Ammoniumsulfat-Lösung und Düngerkalk. Aus diesem Grund weicht die Berechnung der THG-Emissionen von der Referenzanlage ab.

Die festen und gestrippten Anteile der Gärprodukte werden in der Produktion von hochdichten Faserplatten eingesetzt und substituieren dort konventionelle Holzrohstoffe in einem Gewichtsverhältnis von 1:1. Es wird davon ausgegangen, dass die Art und Menge aller anderen Inhaltsstoffe von hochdichten Faserplatten durch die Substitution nicht beeinflusst wird. Gleichmaßen bleibt der Produktionsprozess durch die Substitution unverändert. Aufgrund der Tatsache, dass Gärprodukte und konventionelle Holzrohstoffe als Nebenprodukte ohne ökologische Last in die Berechnung der THG-Emissionen eingehen, ist eine Einsparung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten an dieser Stelle nicht zu erwarten.

Analog zur Referenzanlage können im Fall der Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren für den Transport und die Ausbringung von Ammoniumsulfatlösung, Düngerkalk und flüssigen, gestrippten Gärprodukten THG-Emissionen in Höhe von 261 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente ermittelt werden. Bei der Substitution von Mineraldünger können jedoch bis zu 1.203 Tonnen THG-Emissionen eingespart werden.

Die folgende Tabelle fasst die Gesamtergebnisse zusammen.

Tabelle 17: THG-Emissionen bei der Nutzung von Gärprodukten als Dünger

| Position                                   | Biogasanlage mit ANAStrip®-Verfahren | Biogasanlage ohne ANAStrip®-Verfahren |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Substrateinsatz                            | 2.515                                | 2.937                                 |
| Bau und Betrieb der ANAStrip® - Anlage     | 471                                  | /                                     |
| Steigerung der Methanausbeute              | -70                                  | /                                     |
| Verwendung der Gärprodukte                 |                                      |                                       |
| Bau und Material Lager                     | 0,43                                 | 0,48                                  |
| Transporte Gärprodukte                     | 143                                  | 180                                   |
| Ausbringung Gärprodukte                    | 118                                  | 103                                   |
| Substitution von Mineraldünger             | -1.203                               | -860                                  |
| <b>Summe</b>                               | <b>1.974</b>                         | <b>2.360</b>                          |
| Alle Angaben in t CO <sub>2</sub> -Äq. / a |                                      |                                       |

Quelle: Eigene Darstellung

Anhand der Tabelle wird deutlich, dass im Hinblick auf die Klimawirkung durch das neuartige Verfahren im Modellfall 386 Tonnen THG-Emissionen pro Jahr im Vergleich zur Referenzanlage eingespart werden können. Bezogen auf die erzeugte Strommenge der Biogasanlagen können im Modellfall 0,0142 Kilogramm Treibhausgasemissionen je Kilowattstunde erzeugtem Strom eingespart werden. Darüber hinaus können weitere positive Aspekte durch die Verringerung von Düngeverlusten, durch ein örtlich und zeitlich optimiertes Stickstoffmanagement sowie durch die Produktion eines handelbaren Düngers mit der Option zum Export von Nährstoffen aus Veredelungsregionen entstehen.

Hinzu kommt, dass durch das neuartige Verfahren eine stoffliche Nutzung von Biomasse in Holzwerkstoffen oder anderen Anwendungen angestoßen werden kann. Es bildet somit den potenziellen Startpunkt einer Biomassekaskade und bietet neue Perspektiven für die energetische Nutzung von Biomasse in Biogasanlagen, denn bisher war eine stoffliche Nutzung nach einer energetischen Nutzung von Biomasse so gut wie ausgeschlossen. Sobald die Biomasse jedoch mehrfache Nutzungskaskaden durchläuft, trägt das Verfahren zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei, denn bei gleichem Rohstoffinput kann eine größere Menge an Endprodukten hergestellt werden.

## 4 Diskussion

Im Folgenden wird zum einen die Zielerreichung und Erfolgskontrolle (vgl. Kapitel 4.1), die Abweichung von der ursprünglichen Projektplanung (vgl. Kapitel 4.2), die Zusammenarbeit der Projektpartner (vgl. Kapitel 4.3) und die Öffentlichkeitsarbeit (vgl. Kapitel 4.4) beschrieben.

### 4.1 Zielerreichung und Erfolgskontrolle

Hinsichtlich der technischen Machbarkeit wurden alle Ziele des Projektes erreicht. Zum einen wurde das Verfahren zur Ammoniak-Entfernung von festen Gärresten erfolgreich durchgeführt und zum anderen wurden die dabei hergestellten Gärprodukte zur Produktion von Holzwerkstoffen in Form von Span- und MDF-Platten sowie von Laminat-Fußboden eingesetzt.

Bei der BENAS Biogasanlagen GmbH wurden entsprechend des Projektantrags die folgenden Arbeitsschritte erfolgreich durchgeführt:

- Behandlung der Gärrückstände aus der Biogaserzeugung mit dem ANAStrip®-Verfahren zur Beseitigung des Ammoniak-Geruchs
- Separierung der festen Bestandteile (Fasern) aus den Gärrückständen mit Hilfe einer Schneckenpresse
- Trocknung und Aufbereitung der Gärprodukte für die weitere Verwendung in der Holzwerkstoffindustrie

Der Umbau der Biogasanlage und die Behandlung der Gärprodukte haben gezeigt, dass eine Produktion von geruchsreduzierten und zur weiteren Nutzung aufbereiteten Gärprodukten möglich ist. Die Testläufe zur Produktion von Gärprodukten lieferten zwei Tonnen Material aus zwei verschiedenen Ausgangssubstraten einer thermophilen und einer mesophilen Biogasanlage. Eine weitere Charge lieferte eine Trockenmenge von zehn Tonnen Material.

Mit der Umsetzung der oben genannten Arbeitsschritte wurden mehrere technische Innovationen erzielt. Einerseits ist durch den Umbau der Gärproduktbehandlung der Biogasanlage die Geruchsbehandlung zur Entfernung der Stickstoffbestandteile im Versuchsmaßstab demonstriert worden. Andererseits ist durch die Entfernung der Stickstoffbestandteile mit Hilfe des ANAStrip®-Verfahrens und die daran anschließende Aufarbeitung des Presssaftes die Produktion eines nährstoffreichen Düngers umgesetzt worden. Außerdem wurden die behandelten Gärprodukte als Rohstoff für die Holzwerkstoffindustrie verfügbar gemacht, wodurch konventionelles Material in Holzwerkstoffen substituiert werden kann.

In Zusammenarbeit der Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH, der BENAS Biogasanlagen GmbH und der nova-Institut GmbH wurden entsprechend des Projektantrags die folgenden Arbeitsschritte erfolgreich durchgeführt:

- Berechnung zur Auslegung des Versuchsaufbaus bei veränderten Randbedingungen
- Erhebung notwendiger Prozessparameter bei der Versuchsdurchführung
- Durchführung von physikalischen und chemischen Analysen der Gärprodukte

- Erstellung einer Gesamtbilanz für alle am Prozess beteiligten Stoff- und Energieströme

Die Ergebnisse der oben genannten Arbeitsschritte zeigen, dass die Abtrennung der anorganischen Stickstoffbestandteile aus der festen Phase der Gärprodukte erfolgreich war, insbesondere die Problematik der Ammoniak-Emissionen wurde somit gelöst. Mit Hilfe der Prozessparameter konnten weiterhin Daten für die Energie- und Massenbilanzen erhoben werden und zur Berechnung der THG-Emissionen herangezogen werden.

Bei der Glunz AG wurden entsprechend des Projektantrags die folgenden Arbeitsschritte erfolgreich durchgeführt:

- Die Analyse der Gärprodukte in einem zentralen Forschungs- und Entwicklungslabor
- Die experimentelle Herstellung von MDF- und Spanplatten im Labor mit unterschiedlichen Anteilen von Gärprodukten (0%, 10%, 20%, 30%) als Substitut für konventionelles Holzmaterial
- Die Messung der Werkstoffeigenschaften der MDF- und Spanplatten mit unterschiedlichen Anteilen von Gärprodukten im Vergleich zu konventionellen Holzwerkstoffen
- Die experimentelle Herstellung von HDF-Platten mit 10% Gärproduktanteil und Weiterverarbeitung zu Laminat-Fußboden
- Die Messung der Werkstoffeigenschaften der HDF- und Laminat-Platte und optische Beurteilung der Laminat-Plattenbeschichtung

Die technische Umsetzbarkeit der Nutzung von Gärprodukten als Rohstoff für Holzwerkstoffe wurde mit Hilfe der oben genannten Arbeitsschritte bewiesen. Es wurden normgerechte Spanplatten, mittel- und hochdichte Faserplatten und Laminat-Fußboden produziert. Eine Substitution von 15 – 20% der Holzfasern durch die Gärprodukte ist realistisch. Gärprodukte bieten darüber hinaus grundsätzliche Vorteile gegenüber anderen nachwachsenden Rohstoffen (Miscanthus, Hanfschäben, Flachs, etc.): Sie sind ganzjährig in großer Menge verfügbar und besitzen durch die biotechnologische Aufbereitung in der Biogasanlage besondere Eigenschaften, die für die Nutzung in der Holzwerkstoffindustrie von Vorteil sind.

Bei der nova-Institut GmbH wurden nach den praktischen Arbeiten alle ökonomischen und ökologischen Berechnungen zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit und zur Bestimmung der Treibhausgasemissionen durchgeführt (vgl. Kapitel 3.2 und Kapitel 3.3). Mit den Arbeiten wurden umfassende Datensätze (*Life Cycle Inventory, LCI*) für die weitere Bearbeitung von Ökobilanzen erhoben.

## 4.2 Abweichung von ursprünglicher Projektplanung

Ursprünglich waren zwei Betriebsversuche zur Herstellung von MDF- und Spanplatten vorgesehen. Unter Berücksichtigung der folgenden Projektergebnisse war jedoch ein Betriebsversuch für die Herstellung von Laminat-Fußboden notwendig:

- Marktkonformität des Produktes

Die dunkle Farbe der Gärprodukte sorgt dafür, dass die im Labor experimentell hergestellten MDF- und Spanplatten ebenfalls dunkel gefärbt sind, je nachdem welche Menge an konventionellem Holzmaterial substituiert wird. Die europäischen Kunden bevorzugen allerdings helle MDF- und Spanplatten. Aufgrund der geringen Akzeptanz

von Farbveränderungen im Markt ist der Absatz von dunklen MDF- und Spanplatten deshalb nicht möglich. Ein HDF-Betriebsversuch mit Weiterverarbeitung zu Laminat-Fußboden hat dem gegenüber einen entscheidenden Vorteil. Die Gärprodukte werden lediglich in der Trägerschicht aus hochdichten Faserplatten (HDF) verwendet, sodass der Kunde keinen Unterschied wahrnimmt, solange die Dekorschicht unverändert bleibt. Ein Betriebsversuch zur Herstellung von Laminat-Fußboden ermöglichte somit den Eignungstest von Gärprodukten für ein marktkonformes Produkt.

- Verringerter Materialbedarf

Im Gegensatz zu einem Betriebsversuch zur Herstellung von Spanplatten, bei dem ca. 30 – 40 t Gärprodukte benötigt werden, ist die Herstellung von Laminat-Fußboden weniger materialintensiv. Hier ist eine Trockenmenge von etwa 10 Tonnen an Gärprodukten ausreichend. Die Herstellung von Laminat-Fußboden hat demnach den Vorteil, dass nur etwa ein Viertel der Gesamtmenge an Gärprodukten benötigt wird, um belastbare Daten zu deren Eignung in der industriellen Produktion von Holzwerkstoffen zu liefern.

- Nähe zum Endverbraucher

Laminat-Fußboden ist ein veredeltes Produkt mit einer höheren Wertschöpfung im Vergleich zu den Halbzeugen MDF- und Spanplatten. MDF- und Spanplatten werden in der Regel als Grundlage für weitere Deckschichten (Tapeten, Fliesen, etc.) genutzt, wohingegen der Laminat-Fußboden eine Endanwendung ist und der Kunde keine Veränderungen mehr vornimmt. Somit gelangt der Laminat-Fußboden als marktkonformes Produkt näher an den Endverbraucher.

Ein HDF-Betriebsversuch mit Weiterverarbeitung zu Laminat-Fußboden durch die Glunz AG am Standort Eiweiler wurde mit Hilfe der Nachbewilligung von Fördermitteln ermöglicht. Dabei handelt es sich um einen im Zielprodukt modifizierten und im Materialbedarf verringerten Projektansatz. Insgesamt kann die Änderung des ursprünglich geplanten Vorgehens als sinnvolle Maßnahme bewertet werden.

### 4.3 Zusammenarbeit der Projektpartner

Die Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern verlief stets reibungslos. Das hohe Engagement der Beteiligten ist sicher auch darauf zurückzuführen, dass sich alle von einem erfolgreichen Projekt einen Mehrwert und einen positiven Impuls für die Marktsituation erhoffen.

Hervorzuheben ist die gute Zusammenarbeit zwischen GNS und BENAS beim Umbau der Biogasanlage sowie der Produktion der Gärprodukte. Die Ammoniak-Strippung von festen und flüssigen Bestandteilen der Gärprodukte hat beide Projektpartner vor große technische und logistische Herausforderungen gestellt, die während des Projektes erfolgreich gelöst werden konnten. So wurde beispielsweise die Festsetzung von Fasern im Wärmetauscher während des Strip-Vorgangs dadurch gelöst, dass eine zusätzlich Rückspülung in den Prozess integriert wurde. Besonderen Dank gilt auch dem Projektpartner Glunz AG, der mit dem LaminatPark einen kompetenten Partner zur Herstellung von Laminat-Fußboden in das Projekt eingebunden hat und mit dem Betriebsversuch ein weiterer Meilenstein zur Prüfung der technischen Machbarkeit gelungen ist. Darüber hinaus wurden alle wesentlichen chemischen und technischen Prozessparameter von den Projektpartnern BENAS, GNS und

Glunz bereitgestellt, ohne die eine ökonomische und ökologische Begleitforschung des nova-Instituts nicht möglich gewesen wäre.

Die Resultate der Labor-, sowie des Betriebsversuches übertrafen dabei alle Erwartungen. Die Begeisterung von Seiten der Partner für die hochwertigen Faserstoffe war stets zu spüren und lässt auf weitere Schritte einer betrieblichen Umsetzung des innovativen Verfahrens hoffen.

## **4.4 Öffentlichkeitsarbeit**

Die Öffentlichkeit wurde über den gesamten Zeitraum mit zahlreichen Aktionen über den jeweiligen Entwicklungsstand des Projektes informiert. Die erste Ankündigung zum Start des Projektes wurde im Juli 2012 über den Newsletter des nova-Instituts an über 10.000 Empfänger verschickt. So wurde von Anfang an ein großer Kreis an Interessenten einbezogen und auf die bestehende Projektseite im Internet aufmerksam gemacht.

Konkrete Ergebnisse wurden erstmals auf dem Kongress „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“ präsentiert, der vom 10. bis zum 11. September 2013 von FNR und KTBL in Kassel durchgeführt worden ist. Die Darstellung der Zwischenergebnisse erfolgte in Form eines Posterbeitrages sowie eines Artikels, der im Tagungsband des Kongresses veröffentlicht wurde (Essel et al. 2013). Während des Kongresses erzielte der innovative Ansatz große Aufmerksamkeit und regte zahlreiche Diskussionen mit Anlagenbetreibern und Vertretern aus der Wissenschaft an. Im Rahmen der 13. Biomassetagung, die vom 12. bis zum 13. November 2012 vom Institut für angewandte Stoffstromanalyse (IfaS) in Birkenfeld durchgeführt wurde, konnte darüber hinaus ein Vortrag mit dem Titel „Vom Gärprodukt zum Holzwerkstoff – Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte aus Biogasanlagen für Holzwerkstoffe“ präsentiert werden (Essel 2013). Auch hier war die Resonanz durchweg positiv.

Am 09. September 2014 fand in Köln ein Abschlussworkshop des Projekts mit dem Titel „Vom Gärprodukt zum Holzwerkstoff - eine innovative Verwendung von Gärprodukten“ statt. Neben Hintergrund und Ziel des Projektes wurden alle technischen, ökonomischen und ökologischen Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Beachtenswert ist, dass ein sehr breiter Teilnehmerkreis mit etwa 40 Vertretern aus der Holzwerkstoffindustrie, der Biogas-Branche sowie aus Wissenschaft und Behörden erreicht wurde und die Ergebnisse weit über die unmittelbaren Zielgruppen hinaus gestreut wurden.

Neben dem Abschlussworkshop und der Teilnahme an Kongressen wurden die Projektergebnisse auch in Printmedien unter dem Fachpublikum verbreitet. In der Oktoberausgabe der Zeitschrift „Energie aus Pflanzen“ findet sich ein 4-seitiger Artikel mit dem Titel „Gärreste als Fußboden - Vom Gärprodukt zum Holzwerkstoff“, in dem das Projekt sowie die erzielten Ergebnisse prägnant zusammengefasst sind (Essel et al. 2014). Darüber hinaus sind Beiträge im Holzzentralblatt und den VDI Nachrichten in Vorbereitung.

Die GNS – Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH ist darüber hinaus im Dezember 2014 mit dem dritten Platz des Hugo-Junkers-Preis in der Kategorie Ressourceneffizienz für das ANAStrip<sup>®</sup>-Verfahren ausgezeichnet worden. Seit 24 Jahren vergibt das Ministerium für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt den Hugo-Junkers-Preis für Forschung und Innovation an zukunftsweisende Unternehmen und Wissenschaftler aus der Region.



Abbildung 9: Dr. Ute Bauermeister und Prof. Dr. Herbert Spindler bei der Übergabe des Hugo-Junkers-Preis für Forschung und Innovation aus Sachsen-Anhalt

Quelle: GNS 2015

Alle Ergebnisse des Projekts werden im Internet veröffentlicht und stehen der Öffentlichkeit unter folgendem Link kostenfrei zur Verfügung: [www.bio-based.eu/technology](http://www.bio-based.eu/technology). Neben den Artikeln und Präsentationen soll hier auch der vorliegende Abschlussbericht hinterlegt werden. Sobald der Abschlussbericht und alle anderen Dokumente online bereitgestellt sind, wird es eine weitere Mailing-Aktion gegeben, in der auch der Verband der Holzwerkstoffindustrie (VHI) sowie der Fachverband Biogas e.V. beteiligt werden soll. Ein großer Multiplikatoreffekt wird zudem von einem Projektvortrag (Essel 2015) im Rahmen der „BIOGAS - 24. Internationale Jahrestagung und Fachmesse“ erwartet, die vom Fachverband Biogas in der Zeit vom 27. bis zum 29. Januar 2015 in Bremen durchgeführt wird.

## 5 Fazit

Das Projekt hat eine Prozesskette zur Kaskadennutzung von Biogassubstraten entwickelt. Nach der energetischen Nutzung in der Biogasproduktion erfolgt die stoffliche Nutzung der Reststoffe (Gärprodukte) in hochwertigen Anwendungen wie Spanplatten, mitteldichten oder hochdichten Faserplatten, die dann später erneut stofflich (Recycling) und abschließend wieder energetisch genutzt werden können. Aus ökologischer Sicht trägt das Verfahren somit zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei.

Die Vorgehensweise zur Produktion von Gärprodukten aus Biogasanlagen hat sich im Projekt bewährt. Insgesamt wurden 12 Tonnen an gestrippten, separierten und getrockneten Gärprodukten als alternativer Rohstoff für die Holzwerkstoffindustrie produziert. Gleichmaßen war die testweise Produktion von Holzwerkstoffen mit unterschiedlichen Anteilen an Gärprodukten erfolgreich. Aufgrund der Farbeigenschaften der Gärprodukte ist eine Nutzung im Segment der Laminat-Fußböden sinnvoll. Aber auch andere Anwendungen, wie zum Beispiel Holzverbundwerkstoffe (*Wood-Plastic-Composites*, WPC), sind möglich.

Mit Hilfe des neuartigen Verfahrens können Betreiber von Biogasanlagen sowohl hochwertigen und handelbaren Dünger (Ammoniumsulfatlösung, Düngerkalk) als auch die festen, faserhaltigen Bestandteile der Gärprodukte in Wert setzen und damit die Wirtschaftlichkeit der Anlagen verbessern. Für die gesamte Biogasbranche ergibt sich darüber hinaus ein wirtschaftlicher Nutzen, weil mit dem Verfahren neue Absatzmärkte in der verarbeitenden Industrie erschlossen werden können. Das technische Potenzial, die festen und faserhaltigen Bestandteile der Gärprodukte als Rohstoff für die stoffliche Nutzung in Deutschland zu heben, liegt jährlich bei ca. 1,5 Millionen Tonnen Trockenmasse.

Aus betrieblicher Sicht stellt das Verfahren kein erhöhtes Risiko für die Anlagensicherheit dar. Die technischen Parameter (Druck, Temperatur), Verfahrensabläufe (Luftevakuierung, Erwärmung/Kühlung) und Inhaltsstoffe (Gärprodukte, REA-Gips, Ammoniumsulfat) stellen für den Betrieb keine Gefahr dar und können vom Personal mit handelsüblicher Technik und Infrastruktur gesteuert werden. Im Vergleich zu klassischen Herstellungsverfahren der Ammoniumsulfatproduktion wird in dem beschriebenen Verfahren keine Aggressive Schwefelsäure benötigt.

Ökonomisch ist das Verfahren hauptsächlich für Bestandsanlagen interessant. Das Verfahren kann unter positiven Rahmenbedingungen einen konkurrenzfähigen Rohstoff (< 75 €/t atro) für die Holzwerkstoffindustrie bereitstellen. Diese Bedingungen dürften vor allem in Veredelungsregionen gegeben sein. Je nach Betriebsstruktur kann das Verfahren jedoch auch in gemischten Regionen aus gesamtbetrieblicher Sicht wirtschaftliche Vorteile bringen. Technische Optimierungspotenziale können darüber hinaus die Wirtschaftlichkeit in großem Maße erhöhen. Grundsätzlich steigert das Verfahren die Wertschöpfung konventioneller Biogasanlagen durch die Produktion von mehreren handelbaren Gütern.

Im Hinblick auf Klimaveränderungen können durch das neuartige Verfahren im Modellfall bis zu 386 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr eingespart werden. Bezogen auf die erzeugte Strommenge der Biogasanlagen sind das 0,0142 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Kilowattstunde erzeugtem Strom. Durch die Produktion eines handelbaren Stickstoffdüngers erlaubt das Verfahren zudem ein standortangepasstes, örtlich und zeitlich optimiertes Stickstoff-Düngemanagement oder auch den Export von Nährstoffen aus Nährstoffüberschuss-Regionen (Veredelungsregionen). Die Stickstoff-Düngeverluste sind bei

Ammoniumsulfat zudem deutlich reduziert im Vergleich zur Düngung mit Gärprodukten und erhöhen damit die Substitutionswirkung von Mineraldünger.

Die Projektergebnisse wurden bereits einem breiten Publikum zugeführt, weitere Veröffentlichungen sind geplant. Die bisherigen Rückmeldungen waren durchweg positiv. Als Werkstoff sind die Fasern eine sehr interessante Möglichkeit, um in Produkten der Holzwerkstoffindustrie und auch darüber hinaus Anwendung zu finden. Die größte Herausforderung für die Zukunft besteht darin, logistische Hindernisse zu überwinden und Partner der Biogas-Branche und potenziellen Anwendern aus anderen Branchen zusammenzubringen. Alle beteiligten Kooperationspartner haben zum bisherigen Erfolg des Projekts beigetragen und erwägen bereits jetzt die Fortführung und die Weiterentwicklung von Teilen des Vorhabens, um das innovative Verfahren auf den Markt zu bringen und dort zu etablieren.

## Literaturverzeichnis

- ADAC (2013): Monatliche Durchschnittspreise Kraftstoffe seit 2000; <http://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/kraftstoffpreise/kraftstoff-durchschnittspreise/default.aspx?ComponentId=51587&SourcePageId=54981>.
- Amon, T.; Döhler, H.; Grebe, S.; Klages, S.; Roth, U.; Wilken, D. & S. Wulf (2013): Qualität und Verwertung des Gärrückstandes. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung. FNR, Gülzow.
- Arndt, M. & R. Wagner (2009): Einführung in die Gärrestverbrennung. Vortrag auf dem C.A.R.M.E.N.-Fachgespräch, 03.10.2009, Straubing.
- Bauermeister, U.; Wild, A. & T. Meier (2009): Stickstoffabtrennung mit dem ANAStrip®-Verfahrenssystem GNS. In: Gülzower Fachgespräche Band 30: Gärrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzung – Stand und F&E-Bedarf. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow.
- BGK – Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (2012): RAL Prüfzeugnis 8545-1206-001 für NawaRo-Gärprodukt fest. BGK, Köln.
- Cargoforum (2013): <http://cargoforum.de/Forums/viewtopic/t=8708.html>; Foreneintrag vom 26.6.2012.
- Carus, M. & A. Raschka (2010): Entwicklung von Förderinstrumenten für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland, Hürth.
- DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum (2014): Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben IIa Biomasse). Zwischenbericht Juni 2014, DBFZ, Leipzig.
- DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum (2012): Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse; Endbericht zur EEG-Periode 2009 bis 2011. Deutsches Biomasseforschungszentrum, Leipzig.
- Eltrop, L.; Härdtlein, M.; Jenssen, T.; Özdemir, E.; Henßler, M. & C. Kruck (2014): Grundlagen und Planung von Bioenergieprojekten. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Gülzow.
- Essel, R. (2013): Vom Gärprodukt zum Holzwerkstoff – Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte aus Biogasanlagen für Holzwerkstoffe“. Vortrag auf der 13. Biomassetagung – Biomasse als systemischer Dienstleister, Institut für angewandtes Stoffstrommanagement (IfaS), Umwelt-Campus Birkenfeld, 12. - 13. November 2013, Birkenfeld.
- Essel, R.; Bauermeister, U.; Heitmann, C.; Meier, T.; Pfemeter, A. & M. Carus (2013): Stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte für Holzwerkstoffe. In: Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Kongress vom 10. bis 11. September 2013 in Kassel. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, S. 342-344.
- Essel, R.; Piotrowski, S. & M. Carus (2014): Gärreste als Fußboden – Vom Gärprodukt zum Holzwerkstoff. In: Energie aus Pflanzen 5 (18): S. 48-51.

- Essel, R. (2015): Werkstoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Gärprodukte in Span- und Faserplatten. Vortrag auf der BIOGAS – 24. Internationale Jahrestagung und Fachmesse, Fachverband Biogas e.V., 27. - 29. Januar 2015, Bremen.
- FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2009): Biogasmessprogramm II – 61 Biogasanlagen im Vergleich. 1. Auflage aktualisiert, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow.
- KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2006): Betriebsplanung Landwirtschaft 2006/07. 20. Auflage, Darmstadt.
- Mantau, U. et al. (2010): EUwood – Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report, Hamburg.
- Pauls, A.; Carus, M.; Piotrowski, S.; Breuer, T.; Frölich, W.; Hau, A.; Gahle, C. & D. Drevermann (2008): Potenzialanalyse über alternative heimische und exotische Nachwachsende Rohstoffe für die Holzwerkstoffindustrie in Deutschland, Hürth.
- Schmehl, M.; Hesse, M. & J. Geldermann (2012): Ökobilanzielle Bewertung von Biogasanlagen unter Berücksichtigung der niedersächsischen Verhältnisse. Georg-August-Universität, Göttingen.
- Spielmann, M.; Faltenbacher, M.; Stoffregen, A. & D. Eichhorn (2010): Energiebedarfs- und Emissionsvergleich von LKW, Bahn und Schiff im Güterfernverkehr; Abschlussbericht vom 9.7.2010. PE International.
- Tollcollect (2013): <http://www.toll-collect.de/rund-um-ihre-maut/maut-tarife.html>.
- Wragge, V.; Sensel-Gunke, K. & K. Nielsen (2013): Stoffliche Beschaffenheit von Gärprodukten aus Biogasanlagen. Vortrag auf der Fachtagung Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus Biogasanlagen. 21. März 2013, Berlin.

# Anhang

## A1: Laborergebnisse der gestrippten, separierten Gärprodukte

Im Folgenden ist ein Auszug aus dem Prüfbericht der Firma EUROFINS Umwelt Ost GmbH zu diversen Untersuchungen der festen und gestrippten Gärprodukten, insbesondere der Seuchenhygiene, dargestellt.

| Parameter | Einheit | BG* | Grenzwerte                                                               |                                                               | Probenbezeichnung | Gärrest   |
|-----------|---------|-----|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|
|           |         |     | gem. §4 Abs. 11 u. 12 AbfKlärV vom 15.04.1992 (andere als leichte Böden) | gem. §4 Abs. 11 u. 12 AbfKlärV vom 15.04.1992 (leichte Böden) | Labornummer       | 613013059 |
|           |         |     |                                                                          |                                                               | Methode           | Messwerte |

### Bestimmung aus der Originalsubstanz

|                     |           |      |  |  |                                 |         |
|---------------------|-----------|------|--|--|---------------------------------|---------|
| Trockenmasse        | Ma.-%     | 0,1  |  |  | DIN EN 14346                    | 91,0    |
| Trockensubstanz     | Ma.-% OS* | 0,1  |  |  | gemäß Methodenbuch der BGK e.V. | 91,0    |
| Lindan (HCH, gamma) | mg/kg TS* | 0,01 |  |  | DIN ISO 10382                   | < 0,01  |
| Pentachlorphenol    | mg/kg TS* | 0,01 |  |  | DIN ISO 14154                   | < 0,010 |
| Benzo(a)pyren       | mg/kg TS* | 0,05 |  |  | DIN EN 15527 / DIN ISO 18287    | 0,11    |

### Bestimmung aus der getrockneten Substanz

#### Dioxine/Furane

|                                       |              |    |     |  |                             |          |
|---------------------------------------|--------------|----|-----|--|-----------------------------|----------|
| 2,3,7,8-TetraCDD                      | ng/kg TS*    | 1  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 1      |
| 1,2,3,7,8-PentaCDD                    | ng/kg TS*    | 1  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 1      |
| 1,2,3,4,7,8-HexaCDD                   | ng/kg TS*    | 1  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 1      |
| 1,2,3,6,7,8-HexaCDD                   | ng/kg TS*    | 1  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 1      |
| 1,2,3,7,8,9-HexaCDD                   | ng/kg TS*    | 1  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 1      |
| 1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD                | ng/kg TS*    | 3  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 3      |
| OctaCDD                               | ng/kg TS*    | 10 |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | 83       |
| 2,3,7,8-TetraCDF                      | ng/kg TS*    | 1  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 1      |
| 1,2,3,7,8-PentaCDF                    | ng/kg TS*    | 1  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 1      |
| 2,3,4,7,8-PentaCDF                    | ng/kg TS*    | 1  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 1      |
| 1,2,3,4,7,8-HexaCDF                   | ng/kg TS*    | 1  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 1      |
| 1,2,3,6,7,8-HexaCDF                   | ng/kg TS*    | 1  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 1      |
| 1,2,3,7,8,9-HexaCDF                   | ng/kg TS*    | 1  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 1      |
| 2,3,4,6,7,8-HexaCDF                   | ng/kg TS*    | 1  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 1      |
| 1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF                | ng/kg TS*    | 3  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | 5,0      |
| 1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF                | ng/kg TS*    | 3  |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | < 3      |
| OctaCDF                               | ng/kg TS*    | 10 |     |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | 24       |
| Summe PCDD/PCDF (WHO)                 | ng TE/kg TS* |    | 100 |  | AbfKlärV, Anhang 1, 1.3.3.2 | 0,0821   |
| Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) (TÜ) | µg/kg TS*    | 2  |     |  | DIN 38414-S14               | < 4      |
| Perfluorooctansäure (PFOA) (TÜ)       | µg/kg TS*    | 2  |     |  | DIN 38414-S14               | < 4      |
| Summe PFOA/PFOS excl. BG (TÜ)         | µg/kg TS*    |    |     |  | DIN 38414-S14               | (n. b.*) |
| Flammpunkt (FG)                       | °C           |    |     |  | DIN EN ISO 3679             | > 300    |
| Fluor gesamt (FG)                     | mg/kg TS*    |    |     |  | analog DIN 15289            | 113      |
| Chrom(VI)                             | mg/kg TS*    | 1  |     |  | DIN 19734                   | < 1,0    |

**Mikrobiologische Parameter und Seuchenhygiene**

|                                                |         |     |  |  |                                         |                    |
|------------------------------------------------|---------|-----|--|--|-----------------------------------------|--------------------|
| Escherichia coli (§37)                         | KBE/g   |     |  |  | DIN 38411-6 (1991-06)                   | < 100              |
| mesophile sulfitreduzierende Clostridien (§37) | KBE/g   |     |  |  | DIN 10103 (1993-08)                     | 100                |
| Hefen (§37)                                    | KBE/g   |     |  |  | § 64 LFBG ASU L 01.00-37                | < 100              |
| Schimmelpilze (§37)                            | KBE/g   |     |  |  | § 64 LFBG ASU L 01.00-37                | 500                |
| Escherichia coli (§37)                         | KBE/g   | 100 |  |  | F. SCHINNER, Bodenbiol. Arbeitsmethoden | < 100              |
| Salmonellen                                    | je 50 g |     |  |  | gemäß BioAbfV                           | nicht nachgewiesen |

**Bestimmung aus dem Königswasseraufschluss**

|              |           |      |     |   |                    |         |
|--------------|-----------|------|-----|---|--------------------|---------|
| Blei         | mg/kg TS* | 2    | 900 |   | DIN EN ISO 11885   | < 2,0   |
| Cadmium      | mg/kg TS* | 0,1  | 10  | 5 | DIN EN ISO 11885   | < 0,10  |
| Arsen        | mg/kg TS* | 2    |     |   | DIN EN ISO 11885   | 5,9     |
| Chrom gesamt | mg/kg TS* | 1    | 900 |   | DIN EN ISO 11885   | 8,3     |
| Kupfer       | mg/kg TS* | 2    | 800 |   | DIN EN ISO 11885   | 29      |
| Nickel       | mg/kg TS* | 1    | 200 |   | DIN EN ISO 11885   | 7,2     |
| Quecksilber  | mg/kg TS* | 0,01 | 8   |   | DIN EN ISO 16772   | < 0,010 |
| Thallium     | mg/kg TS* | 0,1  |     |   | DIN EN ISO 17294-2 | < 0,10  |
| Bor          | mg/kg TS* | 1    |     |   | DIN EN ISO 11885   | 17      |
| Schwefel     | mg/kg TS* | 10   |     |   | DIN EN ISO 11885   | 4400    |

OS\*: Originalsubstanz

TS\*: Trockensubstanz (Trockenmasse)

BG\*: Bestimmungsgrenze

## A2: Datenblätter zur Wirtschaftlichkeit

In der folgenden Tabelle sind alle Annahmen und Positionen für die Gesamtrechnung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am Beispiel einer Biogasanlage mit und ohne ANAStrip®-Verfahren in einer **Gemischregion** dargestellt.

Tabelle 18: Annahmen und Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren im Vergleich zur Referenzanlage in einer Gemischregion

| BGA mit ANAStrip              |       |            |                      |               | BGA ohne ANAStrip |            |                      |              |
|-------------------------------|-------|------------|----------------------|---------------|-------------------|------------|----------------------|--------------|
| Leistungen                    |       | Einh.      | Menge                | Preis/Einheit | Summe             | Menge      | Preis/Einheit        | Summe        |
| Leistungen                    |       |            |                      |               |                   |            |                      |              |
| Methanertrag                  |       |            | 6.484.276            |               |                   | 6.484.323  |                      |              |
| Strom                         | kWh   | 27.233.960 | 0,16 €               | 4.458.199,30  |                   | 27.234.158 | 0,16 €               | 4.368.358,97 |
| Wärme gesamt                  | kWh   | 27.233.960 |                      |               |                   | 27.234.158 |                      |              |
| <i>Wärmenutzung</i>           | kWh   | 4.085.094  | 0,02 €               | 81.701,88     |                   | 4.085.124  | 0,02 €               | 81.702,47    |
| Dünger                        |       |            |                      |               |                   |            |                      |              |
| Gärprodukt fest (TM)          | t     | 2.737      | 37,45                | 275.787,20    |                   | 42.337     | 11,50                | 486.879,06   |
| Gärprodukt flüssig            | t     | 27.268     | -                    | 313.581,43    |                   |            |                      |              |
| ASL                           | t     | 5.857      | 30,00 €              | 175.718,70    |                   | -          | 30,00 €              | -            |
| Dünge­kalk                    | t     | 1.744      | 25,00 €              | 43.594,00     |                   | -          | 25,00 €              | -            |
| Heizmitteleinsparung          | l     | 2.176      | 0,84 €               | 1.827,84      |                   | 2.176      | 0,84 €               | 1.827,84     |
| Kosten                        |       |            |                      |               |                   |            |                      |              |
| Variable Kosten               |       |            |                      |               |                   |            |                      |              |
| Substrat                      |       |            |                      |               |                   |            |                      |              |
| Maissilage                    | t/a   | 45.771     | 38,00 €              | 1.739.298,00  |                   | 55.006     | 38,00 €              | 2.090.209,00 |
| HTK                           | t/a   | 14.454     | 21,00 €              | 303.534,00    |                   | 3.667      | 21,00 €              | 77.007,70    |
| REA-Gips                      | t/a   | 2.172      | 10,00 €              | 21.717,09     |                   |            |                      |              |
| Betriebsmittel                |       |            |                      | -             |                   |            |                      | -            |
| Strom                         |       |            |                      | -             |                   |            |                      | -            |
| <i>Eigenbedarf Anlage</i>     | kWh   | 2.151.483  | 0,16 €               | 352.197,75    |                   | 2.151.498  | 0,16 €               | 345.100,36   |
| <i>ANAStrip</i>               | kWh   | 332.873    | 0,16 €               | 54.491,26     |                   |            | 0,16 €               | -            |
| <i>Separator</i>              | kWh   | 23.338     | 0,16 €               | 3.820,50      |                   |            | 0,16 €               | -            |
| Wärme                         |       |            |                      | -             |                   |            |                      | -            |
| <i>ANAStrip</i>               | kWh   | 2.912.636  | - €                  | -             |                   |            | - €                  | -            |
| Wasser                        | m³    | 200        | 0,67 €               | 134,00        |                   | 200        | 0,67 €               | 134,00       |
| Zündöl                        | h     | -          | 0,80 €               | -             |                   | -          | 0,80 €               | -            |
| Schmieröl                     | l     | 2.520      | 2,00 €               | 5.040,00      |                   | 2.520      | 2,00 €               | 5.040,00     |
| Reparatur- und Wartungskosten |       |            |                      |               |                   |            |                      |              |
| <i>BGA</i>                    |       | 2%         | 3.087.750,60 €       | 61.755,01     |                   | 2%         | 3.087.750,60 €       | 61.755,01    |
| <i>Gas-Otto-Motor</i>         | kWh   | 27.233.960 | 0,02 €               | 408.509,40    |                   | 27.234.158 | 0,02 €               | 408.512,37   |
| <i>ANAStrip</i>               |       | 2%         | 1.835.000,00 €       | 36.700,00     |                   | -          | - €                  | -            |
| Laboranalysen                 | St./a | 6          | 120,00 €             | 720,00        |                   | 6          | 120,00 €             | 720,00       |
| Ausbringungskosten            |       |            |                      |               |                   |            |                      |              |
| <i>Gärprodukt flüssig</i>     | t/a   | 27.240     | - €                  | -             |                   | 42.141     |                      | -            |
| <i>Gärprodukt fest</i>        |       | -          |                      | -             |                   |            |                      | -            |
| Maschinenkosten               |       |            |                      |               |                   |            |                      |              |
| <i>Radlader (Anteil 50%)</i>  | h/a   | 833        | 20,00 € <sup>▼</sup> | 16.660,00     |                   | 625        | 20,00 € <sup>▼</sup> | 12.495,00    |
| Fixe Kosten                   |       |            |                      |               |                   |            |                      |              |
| Abschreibung                  |       |            |                      |               |                   |            |                      | -            |
| <i>BGA</i>                    | a     | 1          | 222.318,04 €         | 222.318,04    |                   | 1          | 222.318,04 €         | 222.318,04   |
| <i>ANAStrip</i>               | a     | 1          | 173.083,33 €         | 173.083,33    |                   | -          | - €                  | -            |
| Zinskosten                    |       |            |                      |               |                   |            |                      | -            |
| <i>BGA</i>                    | a     | 1          | 27.605,58 €          | 27.605,58     |                   | 1          | 27.605,58 €          | 27.605,58    |
| <i>ANAStrip</i>               | a     | 1          | 178.969,61 €         | 178.969,61    |                   | -          | - €                  | -            |
| Zinsansatz                    |       |            |                      |               |                   |            |                      | -            |
| <i>BGA</i>                    | a     | 4%         | 509.479              | 20.379,15     |                   | 4%         | 509.479              | 20.379,15    |
| <i>ANAStrip</i>               | a     | 1          | 11.010,00 €          | 11.010,00     |                   | -          | - €                  | -            |
| Versicherung                  |       |            |                      |               |                   |            |                      | -            |
| <i>BGA</i>                    |       | 0,5%       | 3.087.750,60 €       | 15.438,75     |                   | 0,5%       | 3.087.750,60 €       | 15.438,75    |
| <i>ANAStrip</i>               |       | 0,5%       | 1.600.000,00 €       | 8.000,00      |                   | 0,0%       | - €                  | -            |
| Lohnkosten/-ansatz            |       |            |                      |               |                   |            |                      | -            |
| <i>BGA</i>                    | Akh   | 12.351     | 17,50 €              | 216.142,54    |                   | 12.351     | 17,00 €              | 209.967,04   |
| <i>ANAStrip</i>               | h     | 1.760      | 17,50 €              | 30.800,00     |                   | -          | 17,50 €              | -            |
| Gemeinkosten                  |       |            |                      |               |                   |            |                      |              |
| Gemeinkostenzuschlag          |       | 3.088      | 10,00 €              | 30.877,51     |                   | 3.088      | 10,00 €              | 30.877,51    |

In der folgenden Tabelle sind alle Annahmen und Positionen für die Gesamtrechnung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am Beispiel einer Biogasanlage mit und ohne ANAStrip®-Verfahren in einer **Veredelungsregion** dargestellt.

Tabelle 19: Annahmen und Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren im Vergleich zur Referenzanlage in einer Veredelungsregion

| BGA mit ANAStrip                     |              |              |                      |              | BGA ohne ANAStrip                    |              |              |                      |              |                               |
|--------------------------------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|--------------------------------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|-------------------------------|
| Leistungen                           | Menge        | Einh.        | Preis/Einheit        | Summe        | Leistungen                           | Menge        | Einh.        | Preis/Einheit        | Summe        | Bemerkungen                   |
| <b>Leistungen</b>                    |              |              |                      |              | <b>Leistungen</b>                    |              |              |                      |              |                               |
| Methanertrag                         | 6.484,276    |              |                      |              | Methanertrag                         | 6.484,323    |              |                      |              |                               |
| Strom                                | 27.233,960   | kWh          | 0,16 €               | 4.458,199,30 | Strom                                | 27.234,158   | kWh          | 0,16 €               | 4.368,358,97 | 42% Wirkungsgrad              |
| Wärme gesamt                         | 27.233,960   | kWh          |                      |              | Wärme gesamt                         | 27.234,158   | kWh          |                      |              | 42% Wirkungsgrad              |
| Wärmenutzung                         | 4.085,094    | kWh          | 0,02 €               | 81.701,88    | Wärmenutzung                         | 4.085,124    | kWh          | 0,02 €               | 81.702,47    | 15% genutzt, 2ct/kWh VK-Preis |
| <b>Dünger</b>                        |              |              |                      |              | <b>Dünger</b>                        |              |              |                      |              |                               |
| Gärprodukt fest (TM)                 | 2.737        | t            | 25,87                | 70.808,06    | Gärprodukt f./fl.                    | 42,337       | t            | 11,50                | 486,879,06   |                               |
| Gärprodukt flüssig                   | 27.268       | t            | 11,50                | 313.581,43   | ASL                                  | -            | t            | 30,00 €              | -            |                               |
| ASL                                  | 5,857        | t            | 30,00 €              | 175.718,70   | Düngekalk                            | -            | t            | 25,00 €              | -            |                               |
| Düngekalk                            | 1,744        | t            | 25,00 €              | 43.594,00    | Heizmitteleinsparung                 | 2,176        | l            | 0,84 €               | 1.827,84     |                               |
| Heizmitteleinsparung                 | 2,176        | l            | 0,84 €               | 1.827,84     | <b>Kosten</b>                        | <b>Menge</b> | <b>Einh.</b> | <b>Preis/Einheit</b> | <b>Summe</b> | <b>Bemerkungen</b>            |
| <b>Kosten</b>                        | <b>Menge</b> | <b>Einh.</b> | <b>Preis/Einheit</b> | <b>Summe</b> | <b>Substrat</b>                      |              |              |                      |              |                               |
| <b>Variable Kosten</b>               |              |              |                      |              | Maissilage                           | 55,006       | t            | 38,00 €              | 2.090,209,00 | BM II S 139, C. Heitmann      |
| Substrat                             |              |              |                      |              | HTK                                  | 3,667        | t            | 21,00 €              | 77.007,70    | C. Heitmann                   |
| Maissilage                           | 45,771       | t/a          | 38,00 €              | 1.739,298,00 | <b>Betriebsmittel</b>                |              |              |                      |              |                               |
| HTK                                  | 14,454       | t/a          | 21,00 €              | 303.534,00   | Strom                                |              |              |                      |              |                               |
| REA-Gips                             | 2,172        | t/a          | 10,00 €              | 21.717,09    | Eigenbedarf Anlage                   | 2.151,483    | kWh          | 0,16 €               | 352,197,75   |                               |
| <b>Betriebsmittel</b>                |              |              |                      |              | ANAStrip                             | 332,873      | kWh          | 0,16 €               | 54,491,26    |                               |
| Strom                                |              |              |                      |              | Separator                            | 23,338       | kWh          | 0,16 €               | 3,820,50     |                               |
| Eigenbedarf Anlage                   | 2.151,483    | kWh          | 0,16 €               | 352,197,75   | Wärme                                |              |              |                      |              |                               |
| ANAStrip                             | 332,873      | kWh          | 0,16 €               | 54,491,26    | ANAStrip                             | 2.912,636    | kWh          | - €                  | -            |                               |
| Separator                            | 23,338       | kWh          | 0,16 €               | 3,820,50     | Wasser                               | 200          | m³           | 0,67 €               | 134,00       |                               |
| Wärme                                |              |              |                      |              | Zündöl                               | -            | h            | 0,80 €               | -            |                               |
| ANAStrip                             | 2.912,636    | kWh          | - €                  | -            | Schmieröl                            | 2,520        | l            | 2,00 €               | 5,040,00     |                               |
| Wasser                               | 200          | m³           | 0,67 €               | 134,00       | <b>Reparatur- und Wartungskosten</b> |              |              |                      |              |                               |
| Zündöl                               | -            | h            | 0,80 €               | -            | BGA                                  | 2%           | %            | 3.087.750,60 €       | 61.755,01    |                               |
| Schmieröl                            | 2,520        | l            | 2,00 €               | 5,040,00     | Gas-Otto-Motor                       | 27.234,158   | kWh          | 0,02 €               | 408.512,37   | 0,015 €/kWh                   |
| <b>Reparatur- und Wartungskosten</b> |              |              |                      |              | ANAStrip                             | -            |              | - €                  | -            |                               |
| BGA                                  | 2%           | %            | 3.087.750,60 €       | 61.755,01    | Laboranalysen                        | 6            | St./a        | 120,00 €             | 720,00       | BM II                         |
| Gas-Otto-Motor                       | 27.234,158   | kWh          | 0,02 €               | 408.509,40   | Ausbringungskosten                   |              |              |                      |              |                               |
| ANAStrip                             | -            |              | - €                  | 36.700,00    | Gärprodukt flüssig                   | 27,240       | t/a          | - €                  | -            |                               |
| <b>Laboranalysen</b>                 |              |              |                      |              | Gärprodukt fest                      | -            |              | - €                  | -            |                               |
| 6 St./a                              |              |              | 120,00 €             | 720,00       | Maschinenkosten                      |              |              |                      |              |                               |
| <b>Ausbringungskosten</b>            |              |              |                      |              | Radlader (Anteil 50%)                | 833          | h/a          | 20,00 €              | 16.660,00    |                               |
| Gärprodukt flüssig                   | 27,240       | t/a          | - €                  | -            | <b>Fixe Kosten</b>                   |              |              |                      |              |                               |
| Gärprodukt fest                      | -            |              | - €                  | -            | Abschreibung                         |              |              |                      |              |                               |
| Maschinenkosten                      |              |              |                      |              | BGA                                  | 1            | a            | 222.318,04 €         | 222.318,04   |                               |
| Radlader (Anteil 50%)                | 833          | h/a          | 20,00 €              | 16.660,00    | ANAStrip                             | 1            | a            | 173.083,33 €         | 173.083,33   |                               |
| <b>Fixe Kosten</b>                   |              |              |                      |              | <b>Zinskosten</b>                    |              |              |                      |              |                               |
| Abschreibung                         |              |              |                      |              | BGA                                  | 1            | a            | 27.605,58 €          | 27.605,58    |                               |
| BGA                                  | 1            | a            | 222.318,04 €         | 222.318,04   | ANAStrip                             | 1            | a            | 178.969,61 €         | 178.969,61   |                               |
| ANAStrip                             | 1            | a            | 173.083,33 €         | 173.083,33   | <b>Zinsansatz</b>                    |              |              |                      |              |                               |
| <b>Zinskosten</b>                    |              |              |                      |              | BGA                                  | 4%           | a            | 509.479              | 20.379,15    |                               |
| BGA                                  | 1            | a            | 27.605,58 €          | 27.605,58    | ANAStrip                             | 1            | a            | 11.010,00 €          | 11.010,00    |                               |
| ANAStrip                             | 1            | a            | 178.969,61 €         | 178.969,61   | <b>Versicherung</b>                  |              |              |                      |              |                               |
| <b>Zinsansatz</b>                    |              |              |                      |              | BGA                                  | 0,5%         |              | 3.087.750,60 €       | 15.436,75    |                               |
| BGA                                  | 4%           | a            | 509.479              | 20.379,15    | ANAStrip                             | 0,5%         |              | 1.600.000,00 €       | 8.000,00     |                               |
| ANAStrip                             | 1            | a            | 11.010,00 €          | 11.010,00    | <b>Lohnkosten/-ansatz</b>            |              |              |                      |              |                               |
| <b>Versicherung</b>                  |              |              |                      |              | BGA                                  | 12,351       | Akh          | 17,50 €              | 216.142,54   |                               |
| BGA                                  | 0,5%         |              | 3.087.750,60 €       | 15.436,75    | ANAStrip                             | 1,760        | h            | 17,50 €              | 30.800,00    |                               |
| ANAStrip                             | 0,5%         |              | 1.600.000,00 €       | 8.000,00     | <b>Gemeinkosten</b>                  |              |              |                      |              |                               |
| <b>Lohnkosten/-ansatz</b>            |              |              |                      |              | Gemeinkostenzuschlag                 | 3,088        |              | 10,00 €              | 30.877,51    |                               |
| BGA                                  | 12,351       | Akh          | 17,50 €              | 216.142,54   |                                      |              |              |                      |              |                               |
| ANAStrip                             | 1,760        | h            | 17,50 €              | 30.800,00    |                                      |              |              |                      |              |                               |
| <b>Gemeinkosten</b>                  |              |              |                      |              |                                      |              |              |                      |              |                               |
| Gemeinkostenzuschlag                 | 3,088        |              | 10,00 €              | 30.877,51    |                                      |              |              |                      |              |                               |

In der folgenden Tabelle sind alle Annahmen und Positionen für die Gesamtrechnung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am Beispiel einer Biogasanlage mit und ohne ANAStrip®-Verfahren in einer Ackerbauregion dargestellt.

Tabelle 20: Annahmen und Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage mit modifiziertem ANAStrip®-Verfahren im Vergleich zur Referenzanlage in einer Ackerbauregion

| BGA mit ANAStrip                     |              |              |                      |              | BGA ohne ANAStrip                    |              |              |                      |              |
|--------------------------------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|--------------------------------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|
| Leistungen                           | Menge        | Einh.        | Preis/Einheit        | Summe        | Leistungen                           | Menge        | Einh.        | Preis/Einheit        | Summe        |
| <b>Leistungen</b>                    |              |              |                      |              | <b>Leistungen</b>                    |              |              |                      |              |
| Methanertrag                         | 6.484,276    |              |                      |              | Methanertrag                         | 6.484,323    |              |                      |              |
| Strom                                | 27.233,960   | kWh          | 0,16 €               | 4.458.199,30 | Strom                                | 27.234,158   | kWh          | 0,16 €               | 4.368.358,97 |
| Wärme gesamt                         | 27.233,960   | kWh          |                      |              | Wärme gesamt                         | 27.234,158   | kWh          |                      |              |
| Wärmeeinsparung                      | 4.085,094    | kWh          | 0,02 €               | 81.701,88    | Wärmeeinsparung                      | 4.085,124    | kWh          | 0,02 €               | 81.702,47    |
| <b>Dünger</b>                        |              |              |                      |              | <b>Dünger</b>                        |              |              |                      |              |
| Gärprodukt fest (TM)                 | 2.737        | t            | 100,76               | 275.787,20   | Gärprodukt f./fl.                    | 42.337       | t            | 11,50                | 486.879,06   |
| Gärprodukt flüssig                   | 27.268       | t            | 11,50                | 313.581,43   |                                      |              |              |                      |              |
| ASL                                  | 5.857        | t            | 30,00 €              | 175.718,70   | ASL                                  | -            | t            | 30,00 €              | -            |
| Düngekalz                            | 1.744        | t            | 25,00 €              | 43.594,00    | Düngekalz                            | -            | t            | 25,00 €              | -            |
| Heizmitteleinsparung                 | 2.176        | l            | 0,84 €               | 1.827,84     | Heizmitteleinsparung                 | 2.176        | l            | 0,84 €               | 1.827,84     |
| <b>Kosten</b>                        | <b>Menge</b> | <b>Einh.</b> | <b>Preis/Einheit</b> | <b>Summe</b> | <b>Kosten</b>                        | <b>Menge</b> | <b>Einh.</b> | <b>Preis/Einheit</b> | <b>Summe</b> |
| <b>Variable Kosten</b>               |              |              |                      |              | <b>Variable Kosten</b>               |              |              |                      |              |
| <b>Substrat</b>                      |              |              |                      |              | <b>Substrat</b>                      |              |              |                      |              |
| Maissilage                           | 45.771       | t/a          | 38,00 €              | 1.739.298,00 | Maissilage                           | 55.006       | t            | 38,00 €              | 2.090.209,00 |
| HTK                                  | 14.454       | t/a          | 21,00 €              | 303.534,00   | HTK                                  | 3.667        | t            | 21,00 €              | 77.007,70    |
| REA-Gips                             | 2.172        | t/a          | 10,00 €              | 21.717,09    |                                      |              |              |                      |              |
| <b>Betriebsmittel</b>                |              |              |                      |              | <b>Betriebsmittel</b>                |              |              |                      |              |
| Strom                                |              |              |                      | -            | Strom                                |              |              |                      | -            |
| Eigenbedarf Anlage                   | 2.151,483    | kWh          | 0,16 €               | 352.197,75   | Eigenbedarf Anlage                   | 2.151,498    | kWh          | 0,16 €               | 345.100,36   |
| ANAStrip                             | 332,873      | kWh          | 0,16 €               | 54.491,26    | ANAStrip                             |              | kWh          | 0,16 €               | -            |
| Separator                            | 23,338       | kWh          | 0,16 €               | 3.820,50     | Separator                            |              | kWh          | 0,16 €               | -            |
| Wärme                                |              |              |                      | -            | Wärme                                |              |              |                      | -            |
| ANAStrip                             | 2.912,636    | kWh          | - €                  | -            | ANAStrip                             |              | kWh          | - €                  | -            |
| Wasser                               | 200          | m³           | 0,67 €               | 134,00       | Wasser                               | 200          | m³           | 0,67 €               | 134,00       |
| Zündöl                               | -            | h            | 0,80 €               | -            | Zündöl                               | -            | h            | 0,80 €               | -            |
| Schmieröl                            | 2.520        | l            | 2,00 €               | 5.040,00     | Schmieröl                            | 2.520        | l            | 2,00 €               | 5.040,00     |
| <b>Reparatur- und Wartungskosten</b> |              |              |                      |              | <b>Reparatur- und Wartungskosten</b> |              |              |                      |              |
| BGA                                  | 2%           | %            | 3.087.750,60 €       | 61.755,01    | BGA                                  | 2%           | %            | 3.087.750,60 €       | 61.755,01    |
| Gas-Otto-Motor                       | 27.233,960   | kWh          | 0,02 €               | 408.509,40   | Gas-Otto-Motor                       | 27.234,158   | kWh          | 0,02 €               | 408.512,37   |
| ANAStrip                             | 2%           | %            | 1.835.000,00 €       | 36.700,00    | ANAStrip                             | -            | %            | - €                  | -            |
| Laboranalysen                        | 6            | St./a        | 120,00 €             | 720,00       | Laboranalysen                        | 6            | St./a        | 120,00 €             | 720,00       |
| Ausbringungskosten                   |              |              |                      |              | Ausbringungskosten                   |              |              |                      |              |
| Gärprodukt flüssig                   | 27,240       | t/a          | - €                  | -            | Gärprodukt                           | 42,141       | t/a          |                      | -            |
| Gärprodukt fest                      | -            |              |                      | -            |                                      |              |              |                      |              |
| Maschinenkosten                      |              |              |                      |              | Maschinenkosten                      |              |              |                      |              |
| Radlader (Anteil 50%)                | 833          | h/a          | 20,00 €              | 16.660,00    | Radlader (Anteil 50%)                | 625          | h/a          | 20,00 €              | 12.495,00    |
| <b>Fixe Kosten</b>                   |              |              |                      |              | <b>Fixkosten</b>                     |              |              |                      |              |
| <b>Abschreibung</b>                  |              |              |                      |              | <b>Abschreibung</b>                  |              |              |                      |              |
| BGA                                  | 1            | a            | 222.318,04 €         | 222.318,04   | BGA                                  | 1            | a            | 222.318,04 €         | 222.318,04   |
| ANAStrip                             | 1            | a            | 173.083,33 €         | 173.083,33   | ANAStrip                             | -            | a            | - €                  | -            |
| <b>Zinskosten</b>                    |              |              |                      |              | <b>Zinskosten</b>                    |              |              |                      |              |
| BGA                                  | 1            | a            | 27.605,58 €          | 27.605,58    | BGA                                  | 1            | a            | 27.605,58 €          | 27.605,58    |
| ANAStrip                             | 1            | a            | 178.969,61 €         | 178.969,61   | ANAStrip                             | -            | a            | - €                  | -            |
| <b>Zinsansatz</b>                    |              |              |                      |              | <b>Zinsansatz</b>                    |              |              |                      |              |
| BGA                                  | 4%           | a            | 509,479              | 20.379,15    | BGA                                  | 4%           | a            | 509,479              | 20.379,15    |
| ANAStrip                             | 1            | a            | 11.010,00 €          | 11.010,00    | ANAStrip                             | -            | a            | - €                  | -            |
| <b>Versicherung</b>                  |              |              |                      |              | <b>Versicherung</b>                  |              |              |                      |              |
| BGA                                  | 0,5%         |              | 3.087.750,60 €       | 15.438,75    | BGA                                  | 0,5%         |              | 3.087.750,60 €       | 15.438,75    |
| ANAStrip                             | 0,5%         |              | 1.600.000,00 €       | 8.000,00     | ANAStrip                             | 0,0%         |              | - €                  | -            |
| <b>Lohnkosten/-ansatz</b>            |              |              |                      |              | <b>Lohnkosten/-ansatz</b>            |              |              |                      |              |
| BGA                                  | 12,351       | Akh          | 17,50 €              | 216.142,54   | BGA                                  | 12,351       | Akh          | 17,50 €              | 209.967,04   |
| ANAStrip                             | 1,760        | h            | 17,50 €              | 30.800,00    | ANAStrip                             | -            | h            | 17,50 €              | -            |
| <b>Gemeinkosten</b>                  |              |              |                      |              | <b>Gemeinkosten</b>                  |              |              |                      |              |
| Gemeinkostenzuschlag                 | 3,088        |              | 10,00 €              | 30.877,51    | Gemeinkostenzuschlag                 | 3,088        |              | 10,00 €              | 30.877,51    |