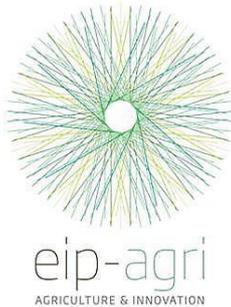




EUROPÄISCHE UNION  
Europäischer Landwirtschaftsfonds  
für die Entwicklung des  
ländlichen Raums



## **Projekttitlel**

**Stoffliche Verwertung von Gärresten und Produktion von Lignin durch Entwicklung eines innovativen Effizienz-Moduls für landwirtschaftliche Biogasanlagen**

Kurztitel: **GärProLi**

**Zuwendungsempfänger:** Forschungsinstitut Bioaktive

Polymersysteme e.V. Frau Prof. Dr. Birgit Kamm

Kantstr. 55, 14513 Teltow

[kamm@biopos.de](mailto:kamm@biopos.de)

[www.biopos.de](http://www.biopos.de)

Mitglieder der Operationellen Gruppe (OG) und assoziierte Partner:

### **Agro- Farm Nauen GmbH**

GF Herr Dirk Peters

Brandenburger Chaussee 19, 14641 Neukammer

Tel. 03321-48568, Fax 03321 455382

[service@agro-farm-nauen.de](mailto:service@agro-farm-nauen.de)

[www.agro-farm-nauen.de](http://www.agro-farm-nauen.de)

Herr Köneke, koeneke@mdp-group

### **Havelland Hof Ribbeck GbR**

Herr Peter Kaim

Alte Hamburger 25 , 14641 Nauen - OT Ribbeck

Tel.: (0 33 21) 4 79 38 FAX: (0 33 21) 45 90 72

[info@ribbeck-agrar.de](mailto:info@ribbeck-agrar.de)

[www.ribbeck-agrar.de](http://www.ribbeck-agrar.de)

### **Märkischer Hof Selbelang**

Detlef Wacker und Dietmar Lucke GbR  
Dorfstr. 21 , 14641 Paulinenaue  
Telefon: 033237/88523 Fax: 033237/88527  
[maerkischer.hof@t-online.de](mailto:maerkischer.hof@t-online.de)  
[www.maerkischerhof-paulinenaue.de](http://www.maerkischerhof-paulinenaue.de)

### **Agrargenossenschaft Hohenauen**

Herr Stöckel  
Spatzter Hauptstraße 1, 14715 Havelaue  
Telefon:033872 70234 Fax: 03387270154  
[i.alber@agr-ar-hohennauen.de](mailto:i.alber@agr-ar-hohennauen.de)

### **Kreisbauernverband Havelland**

GF Herr Johannis Funke  
Landkreis Havelland, Theodor Fontane Straße 10  
14641 Nauen OT Ribbeck  
Tel.: 03 32 37 / 8 98 91 o. 7 00 36  
[Kbvhavelland@t-online.de](mailto:Kbvhavelland@t-online.de)  
[www.kbv-havelland.de](http://www.kbv-havelland.de)

Pot. Biogas-Anlagenbauer für Aufbau Effizienzmodul wurden von Partnern der OG  
assoziiert: Herr Peter Keim (1) Bioconstruct Melle (bei Osnabrück), Herr Wacker: (2) Ökotech  
Fallwitz (bei Eilenburg)

### **Projektlaufzeit**

**13.06.2016 - 31.07.2019**

### **Budget**

**165.213,97 EUR**

### **Datum**

**31.07.2019**

### **Autoren**

Prof. Dr. Birgit Kamm, Dr.-Ing. Christoph Hille

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Kurzfassung in deutscher Sprache</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Kurzfassung in englischer Sprache</b> .....	<b>3</b>
<b>3 Situation zu Projektbeginn</b> .....	<b>4</b>
3.1 Ausgangssituation .....	4
3.2 Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens .....	5
<b>4 Projektverlauf</b> .....	<b>6</b>
<b>5 Projektergebnisse</b> .....	<b>7</b>
5.1 Ergebnisse .....	7
5.2 Diskussion der Ergebnisse .....	24
5.3 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen .....	32
5.4 Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen .....	36
5.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis .....	36
5.6 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen	36
5.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen .....	36
<b>6 Zusammenarbeit der operationellen Gruppe</b> .....	<b>38</b>
<b>7 Kommunikations- und Disseminationskonzept</b> .....	<b>38</b>
<b>8 Anhang</b> .....	<b>36</b>

**Aus Datenschutzgründen wird der Anhang nicht veröffentlicht.**

Abkürzungsverzeichnis .....	40
Tabellen und Abbildungsverzeichnis.....	40

## 1 Kurzfassung in deutscher Sprache

Es wurde ein innovatives Effizienzmodul entwickelt um Gärreste aus Biogasanlagen (BGA) einer Verwertung zuzuführen. Durch Auflösung der Faserstruktur des Gärrestes mit Hilfe des BIOPOS-AFEX-Verfahren (wässrige Ammoniaklösung) wird Cellulose vom Lignin getrennt. Das Lignin wird nach enzymatischer Hydrolyse der Cellulose zu einem Chemierohstoff weiterverarbeitet und die abgebaute Cellulose in den Biogas Prozess eingeschleust. Bei dem Verfahren entstehen keine Reststoffe und Emissionen. Die Vermarktung von Lignin in Reaktivasphalt und als Chemierohstoff wird aufgezeigt. Die Wärmeenergie für die Reaktion ist als Abwärme vom BHKW vorhanden. Zusätzliches Waschwasser wird nicht benötigt, da Wasser aus Gärresten zur Verfügung steht, das im Kreislauf gefahren wird. Das Innovative Effizienzmodul kann an vorhandene Anlagen (Operationelle Gruppe) und an Neuanlagen angeschlossen werden. Die Modellentwicklung im Havelland kann auf landwirtschaftliche BGA's im Land Brandenburg und in Europa übertragen werden. Das Problem mit Reststoff-

Endlagern im Land Brandenburg (394 BGA, Düngemittelverordnung) und auf europäischer Ebene wird entspannt.

## **2 Kurzfassung in englischer Sprache**

An efficiency module has been developed to recycle digestate from biogas plants (BGA). By dissolving the fiber structure of the digestate using the BIOPOS-AFEX process (aqueous ammonia solution), cellulose is separated from the lignin. The lignin is further processed after enzymatic hydrolysis of the cellulose to a chemical raw material and introduced the degraded cellulose in the biogas process. The process produces no residues and emissions. The commercialization of lignin in reactive asphalt and as a chemical raw material is shown. The heat energy for the reaction is available as waste heat from the CHP. Additional washing water is not needed, since water is available from digestate, which is circulated. The efficiency module can be connected to existing plants (Operational Group of EIP) and to new plants. The model development in Havelland can be transferred to agricultural BGAs in the state of Brandenburg and in Europe. The problem with waste repositories in the state of Brandenburg (394 BGA, Fertilizers Ordinance) and at European level is relaxed

## **3 Situation zu Projektbeginn**

### **3.1 Ausgangssituation**

Ausgangssituation des Projektes war der praktizierte wissenschaftlich-technische Stand in landwirtschaftlichen Biogasanlagen und hier die Nichtverwertung des Lignins in den anfallenden Reststoffen, an dem angeknüpft wurde. In Biogasanlagen werden verschiedenste Substrate eingesetzt, wie z. B. Gülle, Maissilage oder Biomüll. Diese enthalten Wasser und organische Verbindungen wie Kohlenhydrate (Zucker, Stärke, Hemizellulose, Zellulose), Proteine, Fette und andere Verbindungen in unterschiedlichen Anteilen. Ein großer Anteil dieser organischen Verbindungen wird während des anaerob stattfindenden Biogasprozesses von Mikroorganismen abgebaut. Im Biogas finden sich mit Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) die mengenmäßig wichtigsten Abbauprodukte. Daneben sind zunächst noch kleine Anteile wie Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) enthalten. Durch die Abbauprozesse wird aus dem zähflüssigen Substrat ein zähflüssiger Gärrest mit einem hohen Wasseranteil von ca. 90 bis 93%. Das Problem bzw. die „Innovationslücke“, die zum Zusammenschluss der OG und zur Durchführung des Innovationsprojektes anregten, basiert auf der Düngeverordnung, dass der Gärrest nur zu bestimmten Zeiten auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht werden darf. So ist in den

sogenannten Kernsperrfristen die Ausbringung von Gärrest auf Ackerland vom 1. November bis zum 31. Januar, die Ausbringung auf Grünland vom 15. November bis zum 31. Januar nicht erlaubt. In genehmigungspflichtigen Ausnahmefällen kann der Zeitpunkt der Kernsperrfrist, jedoch nicht die Länge der Frist verändert sein. Zweck der Verordnung und insbesondere der Kernsperrfristen ist der Gewässer- und Grundwasserschutz vor übermäßigem Nährstoffeintrag. Insbesondere in Regionen mit hoher Anlagen- und Viehdichte ist eine sinnvolle Düngung von Gärresten häufig nicht mehr gewährleistet. Für diese Fälle (1) wenn die Lagerkapazität für Gärreste unzureichend ist und (2) wenn auch das Ausbringen der Gärreste wegen Überdüngung verboten ist oder wenn wegen großer Entfernungen das Ausbringen der Gärreste unwirtschaftlich ist, da bei Biomethananlagen (2-3 MW elektr.) punktuell eine große Menge Gärreste anfällt, ist es zweckmäßig, nach weiteren Einsatzfällen für Gärreste zu suchen.

### **3.2 Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens**

Zielstellung des Projektes ist es, ein wirtschaftliches, praxistaugliches Verfahren zur Herstellung von Lignin für bestehende und neue BGA's zu entwickeln. Das Verfahren besteht aus einem innovativen Effizienz-Modul. Weiterhin wird aus der Zielstellung abgeleitet, dass bei dem innovativen Verfahren keine Reststoffe anfallen und keine Emissionen entstehen. Im Gärrest befinden sich noch Stoffe, die durch chemische und biologische Umwandlung für die Biogaserzeugung verwertet werden können und damit den Gesamtprozess effizienter gestalten. Weitere Zielstellung ist, das dabei separierte Lignin zum Einsatz als Chemierohstoff zu untersuchen, zum einen als funktionelles Produkt zum Einsatz im Asphalt, zum anderen für den selektiven Abbau zu monomeren und oligomeren Strukturen und deren Untersuchung auf antioxidative Wirksamkeit.

Daraus leiten sich die konkreten Aufgabenstellungen ab für die Mitglieder der Operationellen Gruppe ab:

(1) Koordinierung des gesamten Projektes, (b) Aufbau der operationellen Gruppe (OG), mit allen landwirtschaftlichen Unternehmen und dem Landesbauernverband (LBV), sowie Leitung der Operationellen Gruppe durch das FI Biopos e.V.

(2) Charakterisierung der Rohstoffe und der Gärreste

(a) Ermittlung der charakterisierenden Parameter, wie z. B. der Lignin- und Zellulosegehalt, für die Bewertung des Substrates und der Gärreste, gemeinsam mit den landwirtschaftlichen Unternehmen und dem LBV.

- (b) Bildung von ca. 5 Rohstoffgruppen und Bestimmung der Zusammensetzung des Substrates und der Gärreste pro Rohstoffgruppe, gemeinsam mit den landwirtschaftlichen Unternehmen und dem LBV.
  - (c) Zusammenstellung der Ergebnisse in Datenblättern
  - (d) Auf Grundlage der Rohstoffgruppen werden Korrelationen für die charakteristischen Parameter zwischen Substrat und Gärrest gebildet, gemeinsam mit den landwirtschaftlichen Unternehmen.
- (3) Ermittlung der Reaktionsbedingungen, der Verfahrensparameter und der Wirtschaftlichkeit
- (a) Ermittlung der optimalen Reaktionsbedingungen für das AFEX-Verfahren in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Gärrestes, z.B. Druck, Temperatur, Konzentrationen, Verweilzeiten.
  - (b) Berechnung der Verfahrensparameter zur Auslegung der Hauptabmessungen für den Reaktor und der Hauptapparate.
  - (c) Ermittlung der Enzymsorte und der optimalen Reaktionsbedingungen für die enzymatische Hydrolyse in Abhängigkeit der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe aus dem AFEX –Verfahren
  - (d) Berechnung der Verfahrensparameter zur Auslegung der Hauptabmessungen für die enzymatische Hydrolyse und der Hauptapparate.
  - (e) Durchführung einer Kosten- / Nutzenanalyse zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit des Gesamtverfahrens für eine Standard-BGA mit 500 kW<sub>ele</sub> Leistung, gemeinsam mit den landwirtschaftlichen Unternehmen und dem LBV unter Einbeziehung des marktfähigen Produktes Lignin

#### **4 Projektverlauf**

Zur Erreichung des Zieles, die Gärreste einer BGA effizient stofflich zu verwerten, werden 2 neue grundlegende Verfahrensschritte eingeführt und die Wirtschaftlichkeit erhoben. Dies wird in 3 Projektetappen realisiert.

##### **Etappe 1: (06/16 bis 02/17)**

Zunächst wird in der 1. Verfahrensstufe das AFEX-Verfahren so modifiziert, dass es den Zielen der Operationellen Gruppe erfüllt. Dazu werden im Labor und im Technikum beim FI BioPos entsprechende Versuche durchgeführt. Die Untersuchungen beziehen sich auf die Verfahrensschritte Pressen und Filtration sowie die Reaktion nach dem AFEX-Verfahren. Dazu gehört auch die Charakterisierung der Rohstoffe und der Gärreste. Es werden die

Reaktionsbedingungen und die Verfahrensparameter bestimmt. Die Untersuchungen werden so angelegt, dass diese Verfahrensstufe auch alleine betrieben werden kann.

### **Etappe 2: (03/17 bis 02/18)**

In der 2. Verfahrensstufe wird die Enzymatische Analyse ebenso an die Projektziele angepasst. Dazu werden im Labor und im Technikum entsprechende Versuche durchgeführt. Die Untersuchungen beziehen sich auf die Verfahrensschritte Pressen und Filtration sowie die enzymatische Reaktion. Dann erfolgt die Untersuchung der Verfahrensschritte Waschen und Filtrieren, um ein verkaufsfähiges Produkt zu erhalten. Es werden die Reaktionsbedingungen und die Verfahrensparameter bestimmt sowie die Reaktionsprodukte charakterisiert. Die Analysemethoden werden an das Verfahren angepasst. Das separierte Lignin wird einer hydrothermalen Abbaureaktion zur Herstellung von monomeren und Oligomeren Produktchargen unterworfen. Die Produkte werden analysiert und die Antioxidans Aktivität ermittelt.

### **Etappe 3: (03/18 bis 07/19)**

In der 3. Etappe werden die verfahrenstechnischen Grundlagen erarbeitet zur Umsetzung der im Labor und im Technikum erhaltenen Ergebnisse in die Praxis. Am Beispiel von 2 BGA wird ein Modul in Größe einer Pilotanlage projektiert. Diese beinhaltet die beiden Verfahrensstufen und die Ausrüstungen zum Pressen, Filtrieren und Waschen. Die Projektierung beinhaltet Apparateautomatisierung dass die Effektivitätserhöhung sicher und praxisrelevant gemessen werden kann. Weiter wird die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ermittelt in Andockung der Technologie an die Biogasanlage. Die Produktion des Chemieproduktes Lignin und die Rückführung der Kohlenhydrate und Anorganika in die Biogasanlage werden aufgezeigt.

## **5 Projektergebnisse**

### **5.1 Ergebnisse**

#### **5.1.1 Erhebung der Rohstoffe/Prozessparameter der Biogasanlagen der OG in**

##### **Datenblättern**

Es wurden die Inputstoffe der Biogasanlagen erhoben. Ebenso wurden die analytischen Daten nach internationaler Normierung (NREL-National Renewable Laboratories-Protokolle) zur Bewertung der Reststoffe der Biogasanlagen erhoben. Die Erhebung der Stoffgruppen der Biogasanlagen erfolgte in Form von Datenblättern. Die experimentelle Untersuchung der

Anlagen-Reststoffe nach NREL wird weiter unten in der Prozessentwicklung des Effizienzmodul dargestellt.

Die Stoffgruppen der Inputstoffe der Biogasanlagen lassen sich wie folgt zusammenfassen.

- (1) Lignocellulosehaltige Pflanzen, wie Blattwerk oder Stroh, Stärke-
- (2) Zuckerpflanzen, wie Zuckerrüben, Mais, Getreide,
- (3) Fermentationsrückstände aus der Ethanol- /Butanolherstellung,
- (4) Reststoffe aus der Tierhaltung, wie Gülle,
- (5) Grüne Pflanzen, Gras und ihre Fraktionierungsprodukte. Voraussetzung für eine Stoffgruppe ist, dass die Substrate eine gleiche oder ähnliche Zusammensetzung haben.

Die erstellten Datenblätter für das Substrat der Biogasanlagen aus den Stoffklassen (1) bis (5) werden im folgenden im Zusammenhang mit den technologischen Daten der BGA zusammengefasst. Die konstruktiven und technologischen Parameter der 5 Biogasanlagen wurden erfasst und die Ergebnisse in Tabelle 1-5 zusammengefasst:

**Tabelle 1: Ergebnisse konstruktive und technologische Parameter BGA Märkischer Hof Selbelang**

<u>Parameter</u>	<u>Leistung</u>		
Elektr. Leistung (kW)	360		
Verfahren	1 – stufig, 2 Fermenter in Reihe geschaltet		
<u>Rohstoffe</u>	<u>Menge</u>	<u>TS-Gehalt</u>	<u>Preis</u>
Maissilage (t/d)	10,0		35,0 €
Grassilage (t/d)	--		
Getreideschrot (t/d)	1,0		130,0 €
Ganzpflanzensilage (t/d)	2,5		
GPS (Getreide, Milchreife)			
Rindergülle (m <sup>3</sup> /d)	25	wird nicht bewertet, Durchlaufprodukt	
Rindermist	--		
Schweinegülle (m <sup>3</sup> /d)	--		
Schweinemist	--		
Gärreste,	4 %		
Prozesstemperatur	39 °C		
Beschickung	quasikontinuierlich , jede Std. wird 1x beschickt		

Größe der Behälter	2 x 900 m <sup>3</sup>
<u>Verweilzeit</u> (in Tagen)	55
Anmischgrube	--

Planer: Ökotech, Herr Wilhelm, Fallwitz, bei Eilenburg

Bauausführung: Planung und Bauausführung: BioConstuct in Melle

**Tabelle 2: Ergebnisse konstruktive und technologische Parameter BGA Agrargenossenschaft Hohennauen**

<u>Parameter</u>	<u>Leistung</u>		
Elektr. Leistung (kW)	370 + 190 = 560		
Verfahren	1 – stufig mit Anmischgrube		
<u>Rohstoffe</u>	<u>Menge</u>	<u>TS-Gehalt</u>	<u>Preis</u>
Maissilage (t/d)	19,0	35 %	35,- €
Grassilage (t/d)	3,5	35 %	30,- €
Getreideschrot (t/d)	0,8	86 %	130,- €
Ganzpflanzensilage (t/d)	--		
GPS (Getreide, Milchreife)			
Rindergülle (m <sup>3</sup> /d)	-		
Rindermist	--		
Schweinegülle (m <sup>3</sup> /d)	72	7 %	nicht bewertet, innerbetrieblich
Schweinemist	--		
Gärreste	6 %		
Prozesstemperatur (°C)	39,1		
Beschickung	quasikontinuierlich, jede Std. 1x wird beschickt		
Größe der Fermenter	Fermenter. 2330 m <sup>3</sup> , Lagerbehälter: 3.647 m <sup>3</sup> , Endlager: 3.647 m <sup>3</sup> ,		
<u>Verweilzeit</u>	in Tagen		
Fermenter	22		
Anmischgrube	2,5		

Planer: Herr Domenico, Freiheit 12 a/b, 12555 Berlin

Bauausführung: Anlagenbau Blume, Rhinow

Die konstruktiven und technologischen Parameter der beiden Biogasanlagen der Agrargenossenschaft Nauen werden als Ergebnisse in 2 Tabellen dargestellt:

**Tabelle 3: Ergebnisse konstruktive und technologische Parameter BGA Agro-Farm Nauen, Anlage AEV BGA Nauen GmbH & Co. KG**

<u>Parameter</u>	<u>Leistung</u>
Elektr. Leistung (kW)	537 + 537 = 1.074 kW elek Thermisch: 1.020 kW <sub>th</sub>
Verfahren	1 – stufig (mit Anmischgrube)
<u>Rohstoffe</u>	<u>Menge</u> <u>TS-Gehalt</u> <u>Preis</u>
Maissilage (t/d)	50
Grassilage (t/d)	--
Getreideschrot (t/d)	--
Ganzpflanzensilage (t/d)	--
GPS (Getreide, Milchreife)	
Rindergülle (m <sup>3</sup> /d)	30
Rindermist	--
Schweinegülle (m <sup>3</sup> /d)	--
Zuckerrübenschnitzel (t/d)	12
Gärreste (m <sup>3</sup> /d)	55 bei 20.000 m <sup>3</sup> pro Jahr
Prozesstemperatur (°C)	mesophil
Beschickung	quasikontinuierlich, jede Std. wird 1x beschickt
<u>Verweilzeit</u>	in Tagen
Fermenter	
Anmischengrube	
Vergärung	Nassvergärung

Planung und Bauausführung: BioConstuct in Melle

**Tabelle 4: Ergebnisse** konstruktive und technologische Parameter BGA Agro-Farm Nauen, Anlage Agro Nauen GmbH & Co. KG

<u>Parameter</u>	<u>Leistung</u>
Leistung	Einspeisung von Biomethan, entspricht 2,4 KWelek.
Verfahren	1 – stufig (mit Anmaischgrube )
<u>Rohstoffe</u>	<u>Menge</u> <u>TS-Gehalt</u> <u>Preis</u>
Maissilage (t/d)	100
Grassilage (t/d)	--
Getreideschrot (t/d)	--
Ganzpflanzensilage (t/d)	100
GPS (Getreide, Milchreife)	
Rindergülle (m³/d)	--
Rindermist	--
Schweinegülle (m³/d)	--
Zuckerrübenmus (t/d)	
Gärreste (flüssig)	83 m³/d bei 30.000 m³ pro Jahr
Gärreste (fest)	21 t/d bei 7.500 t pro Jahr
Prozesstemperatur (°C)	mesophil
Beschickung	quasikontinuierlich, jede Std. wird 1x beschickt
<u>Verweilzeit</u>	in Tagen
Fermenter	
Anmaischengrube	
Vergärung	Trockenvergärung

Planung und Bauausführung: BioConstuct in Melle

Die konstruktiven und technologischen Parameter der Biogasanlagen des Havelland Hof Ribbek wird als Ergebnis in Tab. 5 erfasst:

**Tabelle 5:** Ergebnisse konstruktive und technologische Parameter BGA Havelland Hof Ribbeck

<u>Parameter</u>	<u>Leistung</u>			
Leistung	380	Thermisch	430 kWth	
Verfahren	1 – stufig Fermenter mit Nachgärer, mit Vertikalmischer 40 m <sup>3</sup>			
<u>Rohstoffe</u>	<u>Menge</u>	<u>TS-Gehalt</u>	<u>Preis</u>	
Maissilage (t/d)	7,5	35%	35	bei 2.780 t/a
Grassilage (t/d)	6,8	35%	30	bei 2.503 t/a
Futterroggen (t/d)	3,9	20%		bei 1.396 t/a
Ganzpflanzensilage (t/d)	--			
GPS (Getreide, Milchreife)	---			
Rindergülle (m <sup>3</sup> /d)	9,3			
Rindermist (t/d)	5,71			
Schweinegülle (m <sup>3</sup> /d)	--			
Sudangras (t/d)	--			
Gärreste (flüssig)	24 m <sup>3</sup> /d	bei 8.872 m <sup>3</sup> pro Jahr		6,0% TS
Gärreste (fest)		3,4 t/d bei 1255t t pro Jahr		26,7%
Prozesstemperatur (°C)	45,2	mesophil		
Beschickung	quasikontinuierlich, jede Std. wird 1x beschickt			
<u>Verweilzeit</u>	in Tagen			
Fermenter	70			
Nachgärer	70			
Vergärung	Nassvergärung			
Planung und Bauausführung: BioConstuct in Melle				

### 5.1.2 Vorbehandlung des Gärrestes

Es wurde ein Verfahren für die Vorbehandlung von lignocellulosehaltiger Biomasse entwickelt, welches auf der Anwendung von wässrigem Ammoniak (25%ig) im Temperaturbereich von 180–200°C basiert. Die so vorbehandelte Biomasse ist nach einer Extraktion sehr gut enzymatisch hydrolysierbar. Dieses Aufschluss-Verfahren wurde für den

Gärrest aus einer BGA im Havelland (Brandenburg) angewendet, um zu untersuchen, ob die in der BGA nicht vollständig abgebaute Lignocellulose im Labormaßstab chemisch aufgeschlossen werden kann. Mit dem Ziel, bei einer darauffolgenden enzymatischen Hydrolyse monomere Kohlenhydrate aus den polymer vorliegenden Lignocellulose-Bestandteilen freizusetzen. Die Ergebnisse der NREL-Analyse dieser Proben (Mittelwert) (**Tab. 6**) zeigen, dass neben knapp 35% Lignin noch rund 28 % Kohlenhydrate im Gärrest vorliegen. Die Zusammensetzung der Gärreste schwankt je nach eingesetztem Substrat für jede BGA und ist deshalb hier nur ein Anhaltspunkt. Für eine umweltgerechte Verwertung sind betriebsspezifische Untersuchungen der Gärreste für die zukünftige industrielle Umsetzung unerlässlich. Eine generelle Überlegung dabei ist, die durch die Behandlung gewonnenen Einfach-Zucker entweder erneut der Biogasanlage zuzuführen, um eine Erhöhung der Biogausausbeute zu erreichen, oder in einem anderen Fermentationsprozess beispielsweise zu Ethanol oder energetisch höherwertigem Butanol als Kraftstoffe oder Chemikalien umzusetzen. Für die Herstellung von biobasierten Chemikalien durch biotechnologische Prozesse ist ein effektives und kostengünstiges Verfahren für die Vorbehandlung der Biomasse eine Grundvoraussetzung, um mit den etablierten erdölbasierten Produkten in eine Wettbewerbssituation treten zu können. Die Anwendung von wässrigem Ammoniak hat gegenüber anderen Vorbehandlungsmethoden den wesentlichen Vorteil, dass ein Einsatz in der Landwirtschaft und damit dezentral möglich ist. Um die Eignung des Gärrestes für biotechnologische Zwecke zu testen, wurde dieser einer enzymatischen Hydrolyse mit anschließender Fermentation unterzogen.

**Tabelle 6:** NREL-Analyse des Gärrestes der BGA Selbelang (Havelland) Mittelwerte der Chargen

Trockensubstanz (NREL/TP-510-42621):89,30%;

Gesamtasche (NREL/TP-510-42622): 14,76 %

NREL/TP-510-42619	NREL/TP-510-42618								
	AIL [%]	ASL [%]	total lignin [%]	Asche [%]	Glucan [%]	Xylan [%]	Galactan [%]	Arabinan [%]	Mannan [%]
<b>Extrakte (Soxhlet) [%]</b>									
<b>12,44 H<sub>2</sub>O</b>									
<b>4,63. EtOH</b>	32,73±0,19	2,05±0,04	34,79±0,21	4,57±0,20	10,92±2,78	13,66±2,29	0±0	3,18±0,28	0±0,18

### **5.1.3 Enzymatische Hydrolyse**

Für die enzymatische Hydrolyse wird der Gärrest nach der oben genannten Vorbehandlung mit heißem Wasser (80°C) t: 24 h, Biomasse (TS):Wasser Verhältnis 1:4. extrahiert, um eine Inhibierung der Enzyme zu verhindern. Zum extrahierten Feststoff wurde ein Gemisch aus drei Flüssigenzymen der Firma Novozymes A/S, Denmark: NS22086 (Cellulase Complex), NS22083 (Xylanase) und NS22118 ( $\beta$ -Glucosidase) zugegeben. Bei der enzymatischen Hydrolyse erfolgt die Spaltung der polymeren Kohlenhydrate in ihre Monomere unter Einbau von Wassermolekülen. Die Ansätze wurden 48 Stunden bei 50°C gerührt und Proben für die HPLC-Bestimmung der Konzentrationen der Monomere (Glucose, Xylose und Arabinose) entnommen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass eine Ausbeute von ca. 70 % an Gesamtzucker erreicht wird. Für eine anschließende Fermentation der Zuckerlösung ist eine Fest-/Flüssig-Trennung notwendig, um die ligninreichen Reststoffe zu separieren. Das so gewonnene Lignin stellt ein wichtiges „Nebenprodukt“ dar, welches als biobasierte Alternative in der chemischen Industrie oder für stoffliche Anwendungen zur Verfügung steht.

### **5.1.4 Fermentation der Zuckerlösung**

Für die Ethanolfermentation wurde eine Weinhefe Ethanol Red (Lesaffre) als Trockenhefe verwendet und neben der Glucosekonzentration auch der Ethanolgehalt per HPLC bestimmt. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen eine gute Fermentierbarkeit der Zucker aus dem Gärrest-Feststoff durch Hefen. Nach der erfolgreichen enzymatischen Hydrolyse des cellulosereichen Gärrestes wurde die gewonnene Zuckerlösung auch zur Butanolfermentation eingesetzt. Dazu wurde die Zuckerlösung unter Stickstoffatmosphäre bei 121°C 20 min autoklaviert und nach dem Abkühlen ebenfalls unter Stickstoffatmosphäre mit *Clostridium acetobutylicum* beimpft. Nach einer Kultivierung unter Luftabschluss über 5 Tage zeigte sich durch Farbumschlag, Gasbildung und HPLC-Bestimmungen, dass auch die Fermentation mit Bakterien erfolgreich war.

### **5.1.5 Beprobung der Gärreste aus den weiteren Biogasanlagen der OG zur Erhebung der stofflichen Zusammensetzung nach NREL**

Das entwickelte Verfahren aus den Biogasreststoffen mittels wässrigem Ammoniak monomere Kohlenhydrate (wässrige Hydrolysate) und festes Lignin herzustellen wurde in 5.1.2-5.1.4. niedergeschrieben Um das Verfahren zu entwickeln war es notwendig

ausschließlich Biogasreststoffe aus der Beprobung einer Biogasanlage zu verwenden. In der OG wurde entschieden, die Reststoffe aus der Beprobung der Biogasanlage Märkischer Hof Selbelang einzusetzen. Basis für die Auswertung der quantitativen Ergebnisse der Produkte aus dem Verfahren (umgesetzte Zuckerhydrolysate, umgesetztes Lignin) war die Durchführung der Rohstoff-Analyse nach Standard NREL (Tab.6). Es wurden Trockensubstanz, Asche, Lignin und der Kohlenhydratgehalt, alle Angaben in [%] bestimmt.

Nun war es notwendig, ebenso von den Reststoffen der weiteren Biogasanlagen der Mitglieder der OG, die betriebsspezifisch arbeiten (Tab. 1-5), diese Standardanalysen durchzuführen. Damit soll die Verarbeitung nach dem ausgearbeiteten Verfahrensregime des Effizienzmoduls sichergestellt werden. Es wurden NREL-Standardanalysen der Biogasreststoffe aus der Beprobung der Anlagen (1) Agrargenossenschaft Hohennauen eG (2) Agrofarm Nauen GmbH, (3) Havellandhof Ribbeck GbR durchgeführt.

Es wurde die Rohstoff-Analyse ebenso nach Standard NREL (\*National Renewables Energy Laboratories) durchgeführt. Es wurden Trockensubstanz, Asche, Lignin und der Kohlenhydratgehalt, alle Angaben in [%] bestimmt. Damit sind die Analysenwerte sowohl mit der durchgeführten Analyse aus der Biogasanlage Märkischer Hof Selbelang, als auch mit denen in der internationalen Bioraffinerie-Community (publizierte Daten in der Literatur) gut vergleichbar.

**Tabelle 7:** NREL-Analyse des Gärrestes der BGA Agrargenossenschaft Hohennauen, Mittelwerte der Chargen

**Trockensubstanz (NREL/TP-510-42621): 85,12%;**  
**Gesamtasche (NREL/TP-510-42622): 13,45 %**

NREL/TP-510-42619	NREL/TP-510-42618						
	AIL [%]	ASL [%]	total lignin [%]	Asche [%]	Glucan [%]	Xylan [%]	Arabinan [%]
<b>Extrakte (Soxhlet) [%]</b>							
<b>18,10 H<sub>2</sub>O</b>							
<b>2,45 EtOH</b>	28,98±0,15	4,37±0,33	30,35±0,48	5,12±13	11,25±0,20	9,25±0,31	3,39±0,21

**Tabelle 8:** NREL-Analyse des Gärrestes der BGA Agrofarm Nauen GmbH, Anlage AEV  
BGA Nauen GmbH & Co. KG, Mittelwerte der Chargen

Trockensubstanz (NREL/TP-510-42621): 89,25%; Gesamtasche (NREL/TP-510-42622):  
8,45 %

NREL/TP-510-42619	NREL/TP-510-42618						
Extrakte (Soxhlet) [%]	AIL [%]	ASL [%]	total lignin [%]	Asche [%]	Glucan [%]	Xylan [%]	Arabinan [%]
14,75 H <sub>2</sub> O 4,12 EtOH	30,12±0,20	4,87±0,33	34,99±0,53	3,88±15	10,78±0,20	12,23±0,22	4,57±0,12

**Tabelle 9:** NREL-Analyse des Gärrestes der BGA Havellandhof Ribbeck GbR  
Mittelwerte der Chargen

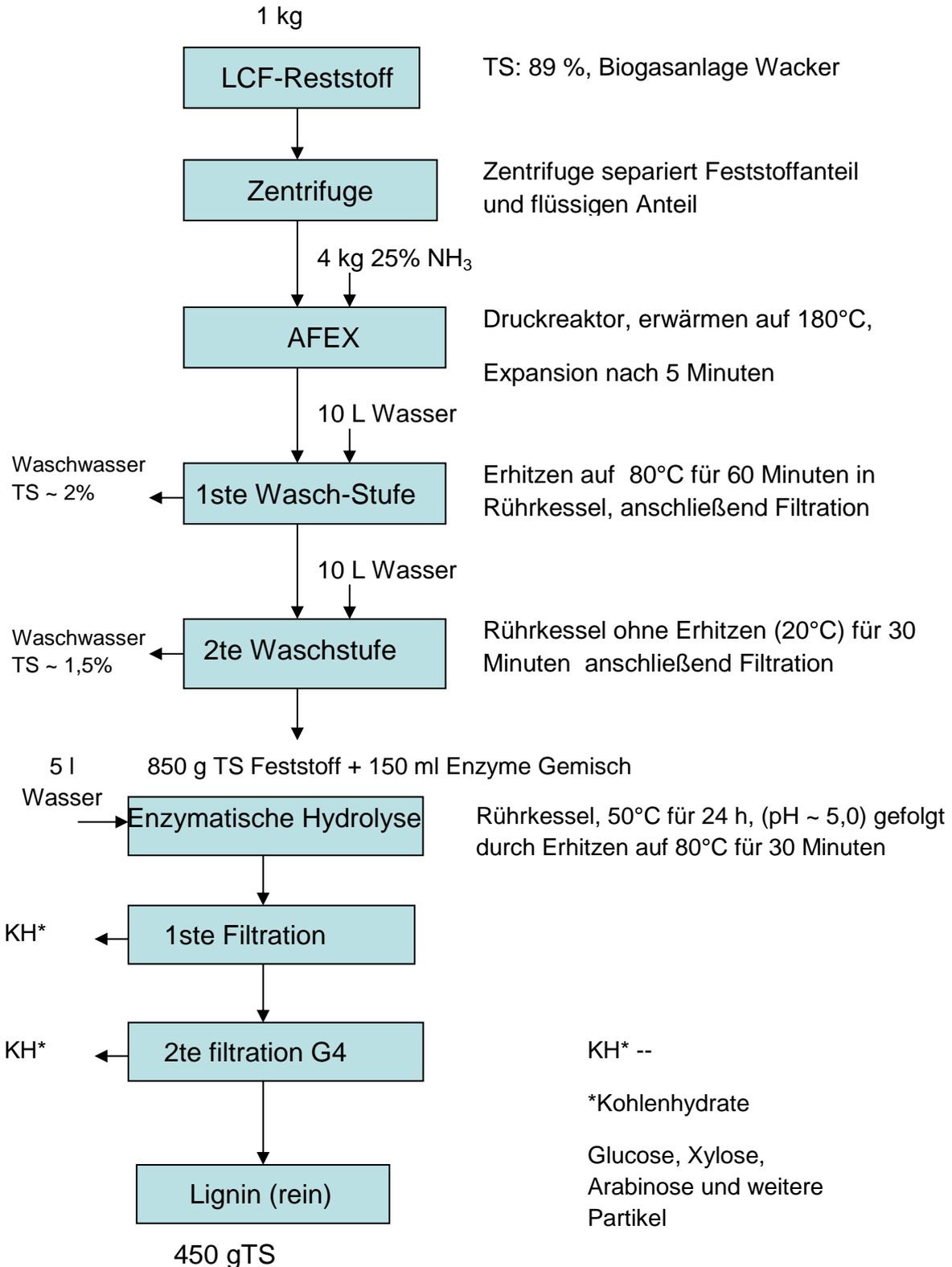
Trockensubstanz (NREL/TP-510-42621): 91,25%; Gesamtasche (NREL/TP-510-42622):  
11,15 %

NREL/TP-510-42619	NREL/TP-510-42618						
Extrakte (Soxhlet) [%]	AIL [%]	ASL [%]	total lignin [%]	Asche [%]	Glucan [%]	Xylan [%]	Arabinan [%]
13,36 H <sub>2</sub> O 3,190EtOH	34,22±0,20	1,95±0,18	36,17±0,38	4,32±25	9,78±0,08	12,06±0,31	2,18±0,28

### 5.1.6. Auswertung der Analysen und Aussagen aus den Ergebnissen zum Einsatz im Effizienzmodul

Die untersuchten Biogas-Reststoffe eignen sich aufgrund ihres ermittelten Kohlenhydrat-, Lignin-, Asche- und Extraktstoff-Gehaltes als Lignocellulosehaltige Reststoffe zum Einsatz im Effizienzmodul. Sie können entsprechend der ausgearbeiteten Schritte (wässriges AFEX Verfahren und Enzymatischer Kohlenhydratabbau) eingesetzt werden. Insbesondere die enthaltenen Extraktstoffe und Mineralien sind wertvoll für die Fermentation der Kohlenhydrate nach der enzymatischen Hydrolyse. Das Lignin wird nach Abtrennung von dem Kohlenhydrat-Hydrolysat im Effizienzmodul abgepresst und durch Heißwäsche gereinigt. Nach Filtration wird es getrocknet und als Pulver erhalten.

Für alle Prozessstufen wurde ein Fließschema erarbeitet. Die wichtigsten Prozessgrößen wurden darin beschrieben. Für den AFEX-Prozess wurden die Massen- und Energiebilanzen erarbeitet. Für alle Prozessstufen wurde ein Fließschema erarbeitet. Die wichtigsten Prozessgrößen wurden darin beschrieben (Abb.1).



**Abbildung 1** Fließschema mit Prozessbeschreibung, Effizienzmodul

Die Experimentellen Arbeiten zum AFEX Aufschluss der Reststoffe der Biogasanlagen wurden erfolgreich abgeschlossen. Daraus wurde eine Prozessführung abgeleitet und ein Technologieschema erarbeitet (siehe Abb.1, Effizienzmodul).

### **5.1.7 Verwertungswege für das hergestellte Lignin**

Zunächst war die Produktcharakterisierung des abgetrennten und mittels Heißwasser gewaschenen Lignins notwendig. Hierfür wird ebenso die NREL-Standardanalytik eingesetzt. Es wurden Trockensubstanz, Asche, Lignin und der Rest-Kohlenhydratgehalt, alle Angaben in [%] bestimmt. Aufgabe war es, das Lignin stofflich zu verwerten. Dazu sollten funktionelle Anwendungen sowohl durch Direkteinsatz von Lignin als auch nach Abbau zu oligomeren und monomeren phenolischen Verbindungen abgeleitet werden (Punkt 2, Verwertungswege für das hergestellte Lignin).

#### **5.1.7.1. Lignin als Antioxidans in Asphalt**

Asphalt unterliegt einer Langzeitoxidation welche zu einem Anstieg der Steifigkeit und einer verminderten Dehnbarkeit führt, dadurch kann der Belag reißen und zerbröseln. Durch Zusatz von Lignin können die, während des Alterungsprozesses des Asphaltes entstehenden Radikale abgefangen werden. Dabei wirken die Bausteine des Lignins, die Propenoylalkohol-Verbindungen aufgrund ihrer Mesomerie-Stabilisierung als Antioxidationsmittel. Die höchste Wirksamkeit wird in einem nicht-oxidativen Zustand des Lignins ( $T < 130$  °C bei Atmosphärendruck) erreicht. Dies bedeutet, dass die Mischtemperatur beim Zufügen des Lignins zum Asphalt kontrolliert werden muss, um die Oxidation des Lignins zu verhindern [1].

Es wäre lohnenswert, ein bereits entwickeltes „Reaktivasphalt“ Verfahren für die Herstellung dieser Mischungen einzusetzen. Die Bauausführung erfolgt bei dieser Technologie grundsätzlich kalt, das bedeutet einen erheblich niedrigeren Energieeinsatz im Vergleich zur derzeitig praktizierten Heißasphalt-Technologie. Es treten keine gasförmigen Emissionen auf, die Baumannschaft ist durch die Asphalttemperatur nicht belastet und keiner Verbrennungsgefahr ausgesetzt. Konkret wurde eine Versuchsfläche auf einer Ortsstraße mit typischem regionalen Verkehrsaufkommen von mehreren hundert Meter Länge über die gesamte Straßenbreite angelegt, deren Unterlage von einem starken Netzrissbild geprägt war (Abb.2).



**Abbildung 2:** Einbaubeispiel zur Reaktivasphalt-Technologie [2]

Auch nach einer Winterperiode schlagen die Risse nicht durch den Versuchsdeckschichtbelag durch und lassen auf eine zufriedenstellende Lebensdauer durch Anwendung der „Reaktivasphalt“ Technologie schließen [2].

[1] Pan, T. A first-principles based chemophysical environment for studying lignins as an asphalt antioxidant. *Construction and Building Materials* 36, 654–664 (2012).

[2] Österreichische Vialit-Gesellschaft m.b.H. (2012).

### 5.1.7.2 Definierter Abbau des Reststoff- Lignins zum Einsatz in der chemischen Industrie

Im Folgenden soll gezeigt werden, wie das aus dem wässrigen AFEX Verfahren und anschließender enzymatischer Hydrolyse separierte Lignin nach Reinigung durch Heißwäsche (Reinheit 96,84 %) hydrothermal abgebaut werden kann. Es werden die optimalen Bedingungen, die von Biopos e.V. für den hydrothermalen Abbau von LCF-Rohstoffen ausgearbeitet wurden, auf den Abbau des Lignins (T=250°C, t=0,5 h) experimentell angewandt. Für die Standardisierung des Lignin-Abbaus wurden GC-MS-Analysen hinsichtlich der Fraktionen Oligomere, Monomere und wasserlösliche Abbauprodukte durchgeführt. Es wird die Rohstoff-Analyse nach Standard NREL dargestellt. Es wurden Trockensubstanz, Asche, Lignin und der Kohlenhydratgehalt, alle Angaben in [%] bestimmt.

**Tabelle 10:** NREL-Analyse des produzierten Lignins, Mittelwerte der Chargen

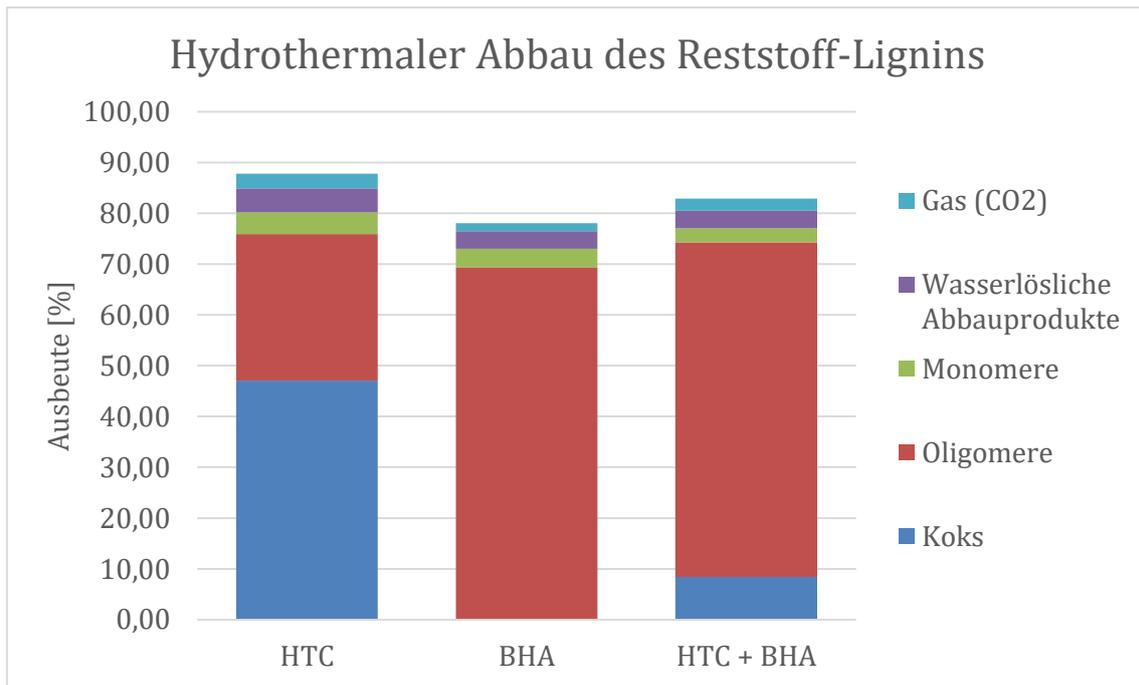
Trockensubstanz (NREL/TP-510-42621): 97,02%; Gesamtasche (NREL/TP-510-42622): 0,25%

NREL/TP-510-42619	NREL/TP-510-42618						
	AIL [%]	ASL [%]	total lignin [%]	Asche [%]	Glucan [%]	Xylan [%]	Arabinan [%]
1,68 H <sub>2</sub> O 4,63. EtOH	93,74±0,20	2,36±0,33	96,10±0,53	0,18±0,08	0,15±0,12	0,19±0,06	0,18±0,24

Neben Lignin [Säurelöslich: (2,36%) Säureunlöslich: (93,74%), darin Asche (0,18%)] wurden Spuren der Kohlenhydrate Glucan (0,15%, Xylan(0,19%), Arabinan (0,18%) gefunden).

#### Hydrothermaler Abbau bei optimalen Reaktionsbedingungen

Es wurden die Reaktionsbedingungen T=250°C und T= 0,5 h für die folgenden Experimente als zielführend angesehen. Um den hydrothermalen Abbau von dem Reststoff-Lignin zu untersuchen, erfolgte der hydrothermale Abbau unter diesen Bedingungen. Es wurde der Einfluss des Hydrotalcit (HTC), des Radikalfängers BHA und das Zusammenwirken dieser beiden Zusätze untersucht. Die aus dem Abbau des Reststoff-Lignins resultierenden Ausbeuten (jeweils Doppelversuche) sind in Abb. 3 grafisch dargestellt.



**Abbildung 3: Hydrothormaler Abbau von Rest--Lignin bei optimalen Bedingungen (Ausbeuten bezogen auf eingesetzte Masse Reststoff-Lignin (TS), HTC, RF=BHA, T=250 C und T= 0,5 h**

Anhand der vorliegenden Ergebnisse wird deutlich, dass der Einsatz von HTC, BHA und HTC+BHA zum Teil deutliche Unterschiede in den Ausbeuten aufweisen. Besonders auffällig ist, dass in dem Versuch mit BHA kein Koks bestimmt werden konnte. Im Gegensatz dazu, zeigt der Einsatz mit HTC eine Koks-Ausbeute von 47,04%. Als Ursache für den nicht bestimmten Koks kann die Unterbindung von Repolymerisationsreaktionen durch BHA angesehen werden. HTC begünstigt eine Vielzahl an Kondensationsreaktionen wodurch die Koksbildung begünstigt werden könnte. Dies wäre eine Erklärung für die hohe Koksausbeute. Durch Kombination von HTC und BHA wurde eine Koksausbeute von 8,42 % ermittelt, die deutlich geringer als bei den Versuchen mit HTC ist. Dies unterstreicht die Vermutung, dass BHA Repolymerisationsreaktionen unterbunden hat. Da somit reaktive Ligninfragmente gebunden werden, sind durch das HTC begünstigte Kondensationsreaktionen in geringerem Maße möglich. Dies würde die Koksausbeute im Fall des kombinierten Einsatzes von HTC+BHA erklären.

Die geringste Oligomerausbeute von 28,86 % ergaben die Versuche mit HTC. Dieser Wert unterstreicht die Vermutung, dass Repolymerisationsreaktionen während der Versuche verstärkt stattgefunden haben. Im Vergleich dazu, sind die Oligomerausbeuten von den Versuchen mit BHA (69,37 %) und HTC+BHA (65,85 %) sehr ähnlich. Die 65,85 % scheinen aufgrund der geringen Koksausbeute jedoch recht hoch, da sich die Oligomerausbeute verringern sollte, wenn die Koksausbeute steigt.

Hinsichtlich der gebildeten Monomere, ergaben die Versuche mit HTC eine Ausbeute von 4,31 %, gefolgt vom Einsatz mit BHA (3,63 %). Somit scheint HTC bzw. BHA keinen unterschiedlichen Einfluss auf die Bildung von Monomeren zu haben. In den Versuchen mit HTC+BHA hat sich die Monomerausbeute auf 2,8 % verringert.

Die Ausbeuten der wasserlöslichen Abbauprodukte zeigen nur geringe Unterschiede. So beträgt die Ausbeute bei der Nutzung von HTC 4,67 % und in den Versuchen mit BHA sowie HTC+BHA 3,49 % bzw. 3,41 %.

Bei Einsatz des Katalysators HTC resultiert die höchste Gasausbeute von 2,9 %, wohingegen die Gasausbeute in den Versuchen mit BHA 1,57 % beträgt. Die Versuche mit HTC+BHA ergeben eine geringere Gasausbeute von 2,4 %, im Vergleich zur Reaktion mit HTC jedoch sind die berechneten Mengen an CO<sub>2</sub> in den Versuchen mit HTC und HTC+BHA identisch (0,34g).

Die Erhöhung der Gasausbeute sollte nicht auf Decarboxylierungsreaktionen aus dem Koks zurückzuführen sein, da sich die ermittelten Koksausbeuten stark unterscheiden bzw. in der Reaktion mit BHA, ohne HTC kein Koks gefunden wurde. Wahrscheinlicher ist, dass durch die Anwesenheit des Katalysators Abbaureaktionen begünstigt wurden, durch welche wiederum mehr Gasprodukte entstanden sind.

### **Zusammenfassung des Abbaus des Reststoffes Lignin**

Es wurden gezielte Untersuchungen zum Einsatz von HTC und BHA als alleiniges Additiv als auch die Kombination HTC/BHA durchgeführt. Es wurde ein hochwirksamer Radikalfänger BHA eingesetzt, der reines Lignin sehr selektiv bei T=250°C und t=0,5 h in Oligomere (ca. 70%) und Monomere (ca. 6%, nach vollständiger Extraktion in Ethylacetat) unter Vermeidung von Koksbildung konvertiert. Im Fall des kombinierten Einsatzes von HTC und BHA wurden ca. 66 % Oligomere, ca. 8% Koks und ca. 6% Monomere (nach vollständiger Extraktion in Ethylacetat) ermittelt.

### **Analysen der erhaltenen Produkte aus dem Abbau des Reststoff-Lignins**

Die erhaltenen Monomere konnten mittels Ethylacetat nahezu vollständig aus den wässrigen Phasen extrahiert werden. Mittels GC-MS und UV-VIS Spektrometrie wurden in den wässrigen Phasen nach der Extraktion keine monomeren Produkte, lediglich undefinierte Spuren nachgewiesen. Die Anteile der monomeren Produkte aus den Ethylacetat-Phasen wurden semiquantitativ mittels GCMS ermittelt (Tab. 11-13).

**Tabelle 11: GC-MS der Monomerfraktion (Ethylacetat-Phase) aus dem Abbau des Lignins mittels HTC, (T=250°C, t=0,5 h)**

Ret.zeit min	Abbauprodukt	m/z	Anteil, %
22.69	2-methoxyphenol	109/124/81	7,64
29.06	2,6-dimethoxy-Phenol	139/154	42,28
30.17	Vanillin	151/152	
31.29	3-tert.Butyl-4-hydroxyanisole	137/165	16,47
32.06	Phenethanamin, 1-methyl-N-vanillyl	137/180	
33.75	4-hydroxy-3,5-dimethoxy-Benzaldehyd	182/181	17,86
34.66	Ethanon, 1,4 hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl	181/196	10,45
35.05	1-Butanone, 1-(2,4,6- trihydroxy-3-methylphenol)	167/210	

**Tabelle 12: GC-MS der Monomerfraktion (Ethylacetat-Phase) aus dem Abbau des Lignins mittels BHA, (T=250°C, t=0,5 h)**

Ret.zeit min	Abbauprodukt	m/z	Anteil, %
22.25	2-methoxyphenol	109/124/81	3,14
29.10	2,6-dimethoxy-Phenol	139/154	16,07
30.25	Vanillin	151/152	
31.32	3-tert.Butyl-4-hydroxyanisole	137/165	48,07
32.83	1,4-Benzenediol, 2-(1,1-dimethylethyl)	123/151	
36.00	4-hydroxy-3,5-dimethoxy-Benzaldehyd	182/181	12,61
37.21	Ethyliso-alcoholate	149/57	1,90
43.75	Phenol, 2,2-methylenbis-(6-1,1-dimethyl 3-4-methyl)	177/161/340	3,10

**Tabelle 13: GC-MS der Monomerfraktion (Ethylacetat-Phase) aus dem Abbau des Lignins mittels HTC/ BHA, (T=250°C, t=0,5 h)**

Ret.zeit min	Abbauprodukt	m/z	Anteil, %
22.67	2-methoxyphenol	109/124/81	4,38
29.06	2,6-dimethoxy-Phenol	139/154	28,45
30.16	Vanillin	151/152	
31.30	3-tert.Butyl-4-hydroxyanisole	137/165	43,21
32.28	1,4-Benzenediol, 2-(1,1-dimethylethyl)	123/151	
33.77	4-hydroxy-3,5-dimethoxy-Benzaldehyd	182/181	12,08
34.65	Ethanon, 1,4 hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl	181/196	0,00
35.03	1-Butanone, 1-(2,4,6- trihydroxy-3-methylphenol)	167/210	5,78
43.74	Phenol, 2,2-methylenbis-(6-1,1-dimethyl 3-4-methyl)	177/161/340	1,24

Die erhaltenen Oligomere konnten mittels THF weitgehend vollständig separiert werden. Die Anteile der oligomeren Produkte aus den THF-Phasen wurden qualitativ mittels GCMS ermittelt. Die erhaltenen Oligomeren Strukturen sind qualitativ identisch mit den monomeren Strukturen, die in Tab. 11-13 aufgelistet sind.

Um eine Basis für die Verwertung der hergestellten Strukturen als biobasierte Antioxidantien direkt im **Landwirtschaftlichen Betrieb** ableiten zu können und die Chancen für den Verkauf zu vergrößern, wurden Untersuchungen zur Antioxidans- Aktivität mittels 1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH)- Tests durchgeführt. Die Auswertung erfolgt mittels der einfachen Methodik UV-VIS-Spektroskopie (Tab. 14).

**Tabelle 14: Antioxidans-Aktivität und Phenolgehalt der Abbauprodukte aus Gärrest-Lignin im Vergleich zu Trolox (Standard)**

Päpariertes Produkt	Messung Präparat	Gemessene DPPH-Antioxidans Aktivität	Gemessener Phenolgehalt [UV-VIS]
Monomerfraktion aus Rest-Lignin	aus Tab.12	65%	46%
Monomerfraktion aus Rest-Lignin	aus Tab. 13	70%	49%
Oligomerfraktion aus Rest-Lignin		60%	42%
Standard	Trolox	95%	67%

Die ermittelte Antioxidans-Aktivität und der Phenolgehalt der produzierten Chargen im Vergleich zum Standard Trolox bestätigen die Verwertung des hergestellten Lignins als Chemierohstoff.

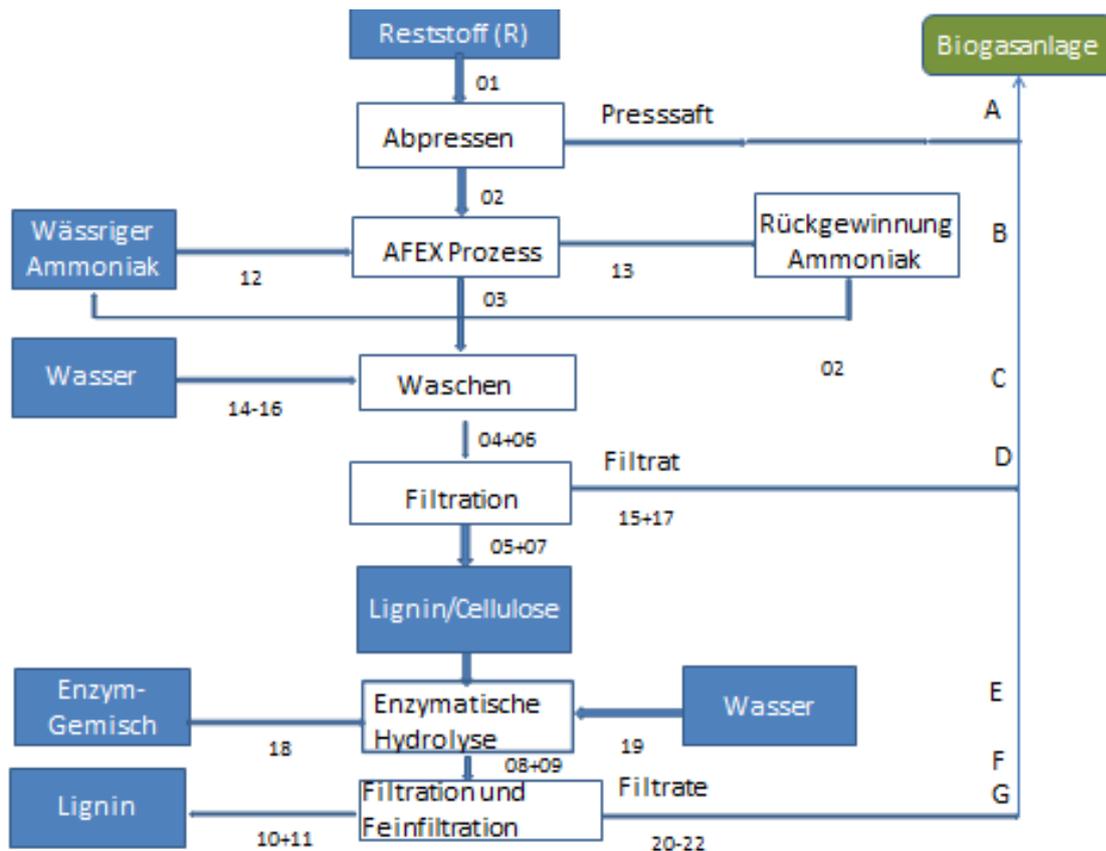
## 5.2 Diskussion der Ergebnisse

Auf Basis der experimentellen Ergebnisse des Projektes erfolgte die Ermittlung der ingenieurtechnischen Voraussetzungen zur Umsetzung des Effizienzmoduls. Dieses besteht aus dem Basismodul und dem Anbindungsmodul. Das Basismodul ist für alle BGA-Anlagen gleich. Das Anbindungsmodul berücksichtigt die örtlichen und verfahrenstechnischen Gegebenheiten der BGA. Es wurden die Basisparameter für die Verfahrenstechnik und die Stoffströme der Teilprozesse ermittelt (Mengenbilanzen). Es erfolgte eine Energiekostenabschätzung. Es erfolgte die Planung der Hilfsstoffe. Es wurde das Engineering für das Effizienzmodul erarbeitet. Projektierung des Effizienzmoduls unter Berücksichtigung von technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Das Engineering besteht aus folgenden Teilen: (a) Technologischer Teil: Erstellung der Mengen- und Energiebilanzen, sowie (b) ein Blockschaltbild (c) Auslegung des Reaktors, Investitionskosten (d) Ermittlung Verkaufspreis Lignin.

### 5.2.1. Auslegung der Technologie (Massen und Energiebilanzen)

Zur Bilanzierung des Gesamtprozesses wurden den einzelnen Masseströmen Nummern zugeordnet (01-22), um die Teilströme eindeutig beschreiben zu können. Bei der Ermittlung des Energieeintrages in den Prozess, wurden für die Zuordnung zu den Prozessen Großbuchstaben vergeben (A-G).



**Abbildung 4: Darstellung der Prozessstufen (A-G) und der Stoffströme (01-22) für die Herstellung von Lignin und fermentierbaren Zuckern**

Für die Aufstellung der Massenbilanzen wurden folgende Bedingungen zugrunde gelegt:

- 50% des wässrigen Ammoniaks können zurückgewonnen werden, die anderen 50% verbleiben in der Biomasse.
- Das Enzymgemisch verbleibt in der Hydrolyse und wird in die Biogasanlage geführt.
- Die Abtrennung der Feststoffe (Lignin) nach der enzymatischen Hydrolyse erfolgt mit einer Ausbeute von 95%, wobei der Feststoff Lignin eine Feuchtigkeit von 50% hat und anschließend Feinfiltriert wird.

Die Massenbilanzen der Teilströme 01 bis 22 sind in der folgenden Tabelle 15 dargestellt.

**Tabelle 15: Massenströme des integrierten Prozesses zur Herstellung von Lignin und fermentierbaren Zuckern**

Massenströme in [ kg]	01	02	03	04+06	05+07	08+09	10	11	12	13	14+16	15+17	18	19	20+21	22
Wasser	0,68	0,68	0,68	186,1	42,05	140,13	69,6	3,09	32,07	32,07	171,05	144,05	0	42,76	0,85	66,51
Reststoff TS	7,87	8,93	8,93	6,4	5,3	-	-	-	-	-	-	2,57	-	-	-	-
NH <sub>3</sub>									10,69	10,69						
Enzyme													1,28			
Glucose						2,52	2,48	2,48							0,03	
Xylose						2,58	2,37	2,37							0,02	
Arabinose						0,19	0,19	0,19								
Lignin						4,72	4,72	4,72							1,81	

Die Energieeinträge der Prozesse A-G sind in der Tabelle 16 dargestellt und mit den darunter aufgeführten Stoffwerten und Kennzahlen auf die Verarbeitung von 1 kg LCF-Reststoff berechnet.

**Tabelle 16: Energieströme des integrierten Prozesses zur Herstellung von Lignin**

**S.27**

Die Energieeinträge der Prozesse A - G sind in dieser Tabelle dargestellt und mit den darunter aufgeführten Stoffwerten und Kennzahlen, die Rechnungen wurden auf die Verarbeitung von **1 kg LCF-Reststoff** bezogen

	Prozessbeschreibung	Reststoff in kg	Betriebs- stoffe in kg	Wasser in kg	therm. E in kWh	elektr. E in kWh	E in kWh/kg LCF-Restst.
A	Zentrifuge	0,1	0	0	0	0,00285	0,0285
B	AFEX-Prozess	0,09	0	0	0,3205	0,3205	3,562
	Ammoniak (25%ig)	0	0,4	0	0	0	0
	Ammoniak Rückgew.	0	-0,2		0,156		1,733
C	Waschen	0,09	0,2	4	0,297		3,306
D	Filtration	0,0765		4,2014		0,000047	0,0005
E	Enzym. Hydrolyse 50°C	0,0765		0,5	0,1015	0,1015	0,1277
	Rühren	0		0,5		0,048	0,5333
F	Filtration	0,0249		0,5		0	0
G	Feinfiltration	0,0516		0,5		0	0
<b>Summe bez. auf 1 kg LCF-Reststoff</b>		<b>0,5095</b>	<b>0,4</b>	<b>10,2014</b>	<b>0,875</b>	<b>0,472897</b>	<b>9,291</b>

Berechnung der Kosten, bez. auf 1 Kg LCF-Reststoff		€ pro kg	€ pro kg NH3-25%	€ pro kg	therm. E € pro kWh	elektr. E in kWh	elektr. E pro kg LCF
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
	<b>Kosten pro Einheit:</b>	0	1	0	0	0	0,19
	<b>Kosten pro</b>	0,00 €	0,40 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	1,77 €
<b>1</b>	<b>kg/h LCF-Reststoff</b>						
	<b>Summe:</b>	<b>2,17 €</b>					
	<b>Kosten pro Std. bei</b>	0,00 €	38,40 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,34 €
<b>96</b>	<b>kg/h LCF-Reststoff</b>						
	<b>Summe:</b>	<b>207,87 €</b>					

**Kosten für Energie und Hilfsstoffe pro 1 Kg LCF-Reststoff betragen: 2,17 €**

**Kosten für Energie und Hilfsstoffe pro Std.**

**bei 96 kg/h LCF-Reststoff betragen: 207,87 €**

**Erläuterung:**

- (1) Die Menge sind Verluste für die Lignin und Zellulosegewinnung, Rückführung zum Biogasprozess
- (2) Wert vom Chemiehandel: 1 € für 25 % NH3
- (3) wird vom eigenen Brunnen gefördert, wird vernachlässigt
- (4) Durch Installation eine Abgaswärmeübertragers kann Abwärme genutzt werden, die dann Kostenlos zur Verfügung steht
- (5) Der Elektrotarif beträgt 0,19 €/kW/h

**Tabelle 17** Ingenieurtechnische Auslegung des AFEX Reaktors

<b>Reaktortyp: 1-stufiger Druckreaktor mit Rührwerk für 16 bar und 200°C</b>			
<b>1. Zentrifugieren der Gärreste</b>			
<b><u>Gärreste als Rohstoff:</u></b>			
<b>TS-Gehalt:</b>	6 %		
<b>Menge:</b>	1.600 kg/h		
<b>Feststoff:</b>	96 kg/h		
<b>Flüssigkeit:</b>	1.504 kg/h		
<b><u>Ausgang zum Reaktor:</u></b>			
<b>TS-Gehalt:</b>	89 %		
<b>Menge:</b>	<b>108</b> kg/h		
<b>Feststoff:</b>	96 kg/h		
<b>Flüssigkeit:</b>	12 kg/h		
<b><u>Ausgang zur BGA:</u></b>			
<b>Flüssigkeit:</b>	1.492 kg/h		
<b>Feststoff:</b>	0 kg/h		
<b>Menge:</b>	1.492 kg/h		
<b>2. Auslegung des AFEX-Reaktors</b>			
<b><u>Reaktorphasen</u></b>			
1. Befüllen, Aufheizen 180°C und Zugabe von NH <sub>3</sub> -Lsg		0,75 Std.	
2. Halten von		0,1 Std.	
3. und Druckausgleich			
4. Abkühlen		1 Std.	
5. Entleeren und zur 1. Washstufe		0,25 Std.	
<b>Summe Reaktionsphasen</b>		<b>2,1 Std.</b>	
<b><u>Durchsatz:</u></b>			
Menge von Zentrifuge		108 kg/h	
davon Feststoff		96 kg/h	
davon Flüssigkeit		12 kg/h	
Zugabe von NH <sub>3</sub> -Lsg		4 kg/Feststoffmenge	
Menge NH <sub>3</sub>		384 kg/h	
<b><u>Menge zum Reaktor</u></b>		<b>492</b> kg/h	
bei einem TS-Gehalt von		20 %	
Summe pro Reaktionsphase		1.033 kg	
Dichte des Reaktionsgases		900 kg/m <sup>3</sup>	
Reaktionsvolumen		1,15 m <sup>3</sup>	
Befüllungsgrad		75 %	
Reaktorgröße		1,53 m <sup>3</sup>	
<b>Empfohlene Reaktorgröße</b>		<b>2 m<sup>3</sup></b>	

**Tabelle 18** Ermittlung der Investitionskosten

Prozessbeschreibung		Hersteller / Firma	Durchsatz	Energiebedarf	Investkosten	Montage-Bulk/Kosten
1. Prozessstufe - AFEX-Verfahren			Ltr./h	kW	T€	T€
Gärrestpumpe	I/O	Bulk	1.600			
Zentrifuge	Gärreste	Flottweg (Richtpreisangebot)	1.600		79,20	19,8
Gärreste von Pumpe A-1	Input		1.600			
Feststoff zum Reaktor B-1	Output		96			
Feststoffpumpe		Bulk				
Flüssigk. zum Endlager	Output		1.504			
Gärrestpumpe, wie A-1		Bulk				
Förderer von Zentrifuge zum Reaktor			108			
Schüttgutförderer		Bulk				
AFEX-Reaktion	Input	Fulton Ltd.	108		600,00	150
Reaktor, DN 30bar, 180 °C, 2 m <sup>3</sup>						
NH3-Zugabe	Input		192			
Pumpe für NH3		Bulk				
Rückgewinnung NH3						
Gesamtmenge	Input	-	300			
zur 1. Wäsche	Output	-	300			
Zwischensumme:					679,20	169,8

Prozessbeschreibung		Hersteller / Firma	Durchsatz	Energiebedarf	Investkosten	Montage-Bulk/Kosten
1. Prozessstufe - AFEX-Verfahren			Ltr./h	kW	T€	T€
C-1	Fördern zur 1. Wäsche	Input/ Output	300			
	Feststoffpumpe	Bulk				
C-2	1. Waschstufe von A-2	Input	300			
	Rührkessel, 1bar , 80 °C, 1,5 m <sup>3</sup>	INOX Behälter GmbH			7,00	1,75
	Waschwasser	Input	960			
	Gesamtmenge	Input	1.260			
C-3	Filtern, 1. Wäsche	Input	1.260			
	Siebfilter	SWEKO (Siebmaschine)			27,00	6,75
	Feststoff zur 2. Wäsche	Output	300			
	Flüssigk. zum Endlager	Output	960			
	Pumpe für Flüssigkeiten	Bulk				
D-1	Fördern zur 2. Wäsche	Input	300			
	Feststoffpumpe	Bulk				
D-2	2. Waschstufe	Input	960			
	Rührkessel, 1bar , 80 °C, 1,5 m <sup>3</sup>	INOX Behälter GmbH			7,00	0,00
	Waschwasser	Input	960			
	Input gesamt		1.260			
	Siebfilter	SWEKO (Siebmaschine)	300		27,00	6,75
Zwischensummen:					68,00	15,25

			Hersteller / Firma	Durchsatz Ltr./h	Energie- bedarf kW	Invest- kosten T€	Montage- kosten T€
<b>1. Prozessstufe - AFEX-Verfahren</b>							
D-3	Filtern, 2. Wäsche	Input		1.260			
	Siebfilter		SWEKO (Siebmaschine)			27,0	6,8
	Feststoff zur Hydrolyse	Output	-	300			
	Flüssigk. zum Endlager	Output	-	960			
	Flüssigkeitspumpe		Bulk				
<b>2. Prozessstufe - Hydrolyse</b>							
E-1	Feststoff fördern zur Hydrolyse	Input		300			
	Feststoffpumpe		Bulk				
E-2	Enzymatische Hydrolyse	Input		1.800			
	Rührkessel 55 m <sup>3</sup>					40,0	10,0
F-1	Feststoffpumpen zum 1. Filter		Bulk	1.800			
F-2	Siebfilter		SWEKO (Siebmaschine)	1.800			
	Feststoff zur 2. Filtration		Bulk	300			
	Flüssigkeitspumpe zum Endlager		Bulk				
G-1	Feststoffpumpen zum 2. Filter			300			
	Feststoffpumpe		Bulk				
G-2	2. Filtration			300			
	Pumpe für Feststoff		Bulk				
	Siebfilter		SWEKO (Siebmaschine)			27,0	6,8
	Zwischensummen:					94,0	23,5
	Endsumme :					841,20	208,55
	Bulk und Montagekosten von den Investkosten	25%	Engineeringkosten von den Investkosten	20%		168,24	
	<b>Gesamtkosten (+/- 20%):</b>					<b>1.217,99</b>	

**Tabelle 19:** Ermittlung des Marktwertes von produziertem reinen Lignin, S. 31

<b>Voraussetzungen:</b>					
Menge an Gärresten,					
die zur Erzeugung von Lignin eingesetzt werden:				<b>1.600</b>	<b>kg/h</b>
TS-Gehalt der Gärreste:				<b>6</b>	<b>%</b>
Daraus ergibt sich eine Feststoffmenge von				<b>96</b>	<b>kg/h</b>
flüssige Gärreste:				<b>1.504</b>	<b>kg/h</b>
Laborversuche ergaben:		aus		<b>1</b>	kg Gärrest (Feststoff)
lassen sich				<b>0,45</b>	kg reines Lignin produzieren
<b>Marktwertermittlung:</b>					
Produzierte Ligninmenge aus Inmenge aus				<b>1.600</b>	kg/h Gärresten
reines Lignin pro Stunde:				<b>43,2</b>	kg/h
reines Lignin pro Tag:				<b>1.037</b>	kg/d
Marktpreis für 1 kg reines Lignin, am Produktionsstandort:				<b>1</b>	€/kg
Einnahmen aus Ligninverkauf pro Std.:				<b>43,2</b>	€/h
Einnahmen aus Ligninverkauf pro Tag:				<b>1.037</b>	€/d
Einnahmen aus Ligninverkauf pro Jahr.: (Es werden 8.000 Std. pro Jahr angesetzt)				<b>345.600</b>	€/a

Die Projektierung des Effizienzmoduls erfolgte unter Berücksichtigung von technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Es wurden die betrieblichen Module in Kombination mit den Biogasanlagen der OG festgelegt. Die Apparateile umfassen die Verfahrensstufen Aufschluß des Gärrestes, Pressen, Filtern und Waschen. Es erfolgte Festlegung der Betriebsfahrweisen für alle Prozessstufen des AFEX-Verfahren. Es erfolgte die Ermittlung der Investkosten und Ermittlung des Marktwertes des Produktes Lignin

Es wurden die Investitionskosten für alle Apparateile am Markt erhoben. Die Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen war das AFEX –Gesamt-Verfahrens. Die Ermittlung des Marktpreises für das verkaufsfähige Lignin wurde dargestellt. Es wurde durch Laborversuche ein Zusammenhang zwischen der Menge an Gärresten und der Menge an

verkaufsfähigem Lignin gefunden. Die Mengen beziehen sich auf 1 kg Gärrest mit 98% TS-Gehalt.

Ergebnis: Aus 1 kg Gärresten lässt sich 0,45 kg verkaufsfähiges Lignin nach dem AFEX-Gesamtverfahren herstellen.

Da der Gehalt an Lignin in den Gärresten, je nach Rohstoff schwankt, wurden Durchschnittswerte gebildet. Dazu wurden die erhobenen Daten von 2 typischen Biogasanlagen (BGA) der OG herangezogen. Die Werte wurden in Erhebungen (konstruktive und technologische Parameter) für die AG Hohennauen und den Märkischen Hof Selbelang dargestellt. Für die Verarbeitung an Gärresten wurde eine Menge von 1.600 kg/h mit einem TS-Gehalt von 6% festgelegt.

In weiteren Erhebungen wurden die Kosten für Betriebsstoffe und Energie dargestellt. Dazu wurden folgende Annahmen getroffen:

- Kosten für Frisch-, Abwasser und Abwärme aus der Biogaserzeugung sowie verarbeitete Gärreste wurden nicht zum Ansatz gebracht.
- Dagegen wurden die Produkte aus der Enzymatischen Hydrolyse (Zuckerlösung), die in Biogasprozess zugeführt und den Prozess effektiver gestalten, auch nicht bewertet.

So beinhalten die Betriebskosten die verbrauchte Elektroenergie und NH<sub>3</sub>-Lösung. Die Preise konnten realistisch ermittelt werden.

### **5.3 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen**

Es wurden Empfehlungen aus den experimentellen Untersuchungen für die Umsetzung des Effizienzmoduls an den Biogasanlagen ingenieurtechnisch abgeleitet und eine Kalkulation der Wirtschaftlichkeit der Ligninvermarktung vorgenommen. Empfohlen wird das Abpressen der Gärreste aus den Biogasanlagen, um einen konditionierten Ausgangsstoff zur Verarbeitung im Effizienzmodul einzusetzen.

- (1) Eine Analyse nach NREL wird nach der Separation des Lignins aus dem Effizienzmodul empfohlen, um das Lignin verkaufen zu können.
- (2) Die Rückführung der wässrigen Phase aus dem Effizienzmodul in die bestehende Biogasanlage wird empfohlen.
- (3) Kalkulation der Wirtschaftlichkeit und nähere Betrachtung Ligninvermarktung für Reaktivasphalt (Pkt. A)
- (4) Ausblick: Einsatz des hergestellten Lignins als Chemierohstoff (Pkt B.)

#### **(A) Reaktivasphalt**

Das produzierte Lignin soll im Produktrange Reaktivasphalt vermarktet werden. Dabei sind die speziellen Einsatzgebiete in der Straßensanierung und –erhaltung zu beachten.

Die Firma Vialit als Spezialist der Asphaltindustrie mit Standorten in der ganzen Welt sieht gute technische Voraussetzungen für das hergestellte Lignin, dieses in ein reaktives kalt hergestelltes Asphaltgemisch als antioxidativ wirksames Bindemittel einzubetten. Dieses reaktiv kalt hergestellte Asphaltmischgut kann nach geringen Sperrzeiten wieder befahren werden und hat eine Funktion über mehrere Jahre. Dafür ist es notwendig, dass der Untergrund frei von losen Bestandteilen und anhaftenden Verschmutzungen ist sowie fest und trocken ist. Die Außentemperatur bei der Verarbeitung soll über +10°C betragen. Für den Reparaturvorgang ist zunächst ein Ausblasen der Schadstelle mit Pressluft und anschließendes Einbringen des Lignin-Bindemittels zur optimalen Haftung des Mischgutes unabdinglich. Im weiteren Verlauf des Vorgangs verlegt eine Maschine direkt abbindendes Mischgut, das innerhalb kürzester Zeit aushärtet. Die Verlegung erfolgt zunächst leicht überhöht, um im nächsten Arbeitsschritt die gewünschte Einbaustärke zu erreichen. Nach dem Abstreuen mit Splitt erfolgt eine abschliessende Versichtung mit einer Walze.

Der Verkaufspreis von 1000 EURO/ Tonne wurde festgelegt. Dies geschah in Abstimmung mit der Firma Vialit als Annahme eines Verkaufs-preises im unteren Level im Rahmen der finalen Ergebnisse des EIP-Projektabschlusses. Die Firma Vialit geht von einem realistischen Verkaufspreis zwischen 1000 EURO/ Tonne und 2000 Euro/Tonne aus (abhängig vom Händler, der das Lignin ankaufen wird). Im weiteren wurde die Amortisierung der projektierten Anlage berechnet

#### **Berechnung der Amortisation der projektierten Anlage:**

Voraussetzungen für die Berechnungen sind die Tabellen 16-19 und Hochscalierung vom Laborprozess auf agrarindustriellen Prozess:

<b>Investkosten:</b>			<b>1.217,99</b>	<b>T€</b>
Betriebskosten pro Tonne LCF Rohstoff:			868	€/t
Betriebskosten bezogen auf Lignin, im LCF sind 45% Lignin enthalten				
Betriebskosten pro Tonne Lignin:			192	€/t
Produzierte Ligninmenge pro Jahr			345,6	t/a
Betriebskosten pro Jahr			66.555	€/a
Verkauf des Lignin pro Tonne:			1.000	€/t
Einnahmen aus Ligninverkauf pro Jahr			345.600	€/a

<b>Überschuß:</b>				<b>279.045</b>	<b>€/a</b>
(ist die Differenz					
zwischen Einnahmen und Betriebskosten)					
<b>Ermittlung der Amortisation</b>					
Laufzeit der Anlage					
		mit 5 Jahren		243.598	€/a
müssten so erwirtschaftet werden					
		mit 10 Jahren		121.799	€/a
müssten so erwirtschaftet werden					
<b>Break Even liegt bei</b>				<b>4,4</b>	<b>Jahren</b>

Es ist zu beachten, dass diese Kalkulation keine Steuern und Zinsen berücksichtigt und vom Verkauf der gesamten Menge des produzierten Lignins ausgeht. Weiter ist bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit in diesem frühen Entwicklungsstadium zu beachten, dass die Handelsspanne als Differenz zwischen Anschaffungskosten Selbstkosten und dem Verkaufspreis im vorliegenden EIP-Projekt nicht endgültig kalkuliert werden konnte. Der komplimentäre Wert der Handelsspanne ist die Wareneinsatzquote, während der einer Marge ähnelnde Kalkulationszuschlag der Aufschlag auf den Einstandspreis darstellt. Die Marge ist bei Handelsmarken in der Regel höher als bei Herstellermarken.

## **(B) Chemierohstoff**

Bei der Weiterverarbeitung des hergestellten Lignins als Spezialchemikalie (biobasierte Aromaten) ist eine höhere Wertschöpfung zu erwarten. [ Die deutsche chemische Industrie 2030, VCI-Prognos-Studie, 2013]

Insbesondere die Harzindustrie in Europa sucht nach biobasierten Phenolen als Bindemittel für die Plattenanwendung, Materialien, bei denen 50 Prozent des Phenols durch Lignin ersetzt werden. Bei der Verwendung beim Kunden bietet das Bindemittel die gleichen hohen Qualitäten wie herkömmliches Phenolharz.

Der Phenolharzmarkt wird voraussichtlich bis 2020 mit einer CAGR von 5,7% auf 7,2 Mio. t / Jahr und 19 Mrd. USD wachsen (Markt- und Marktbericht).

Die weltweite Marktgröße für Phenolharze wurde 2018 auf 11,17 Mrd. USD geschätzt und wird im Prognosezeitraum 2019-2025 voraussichtlich mit einer CAGR von 5,3% wachsen:

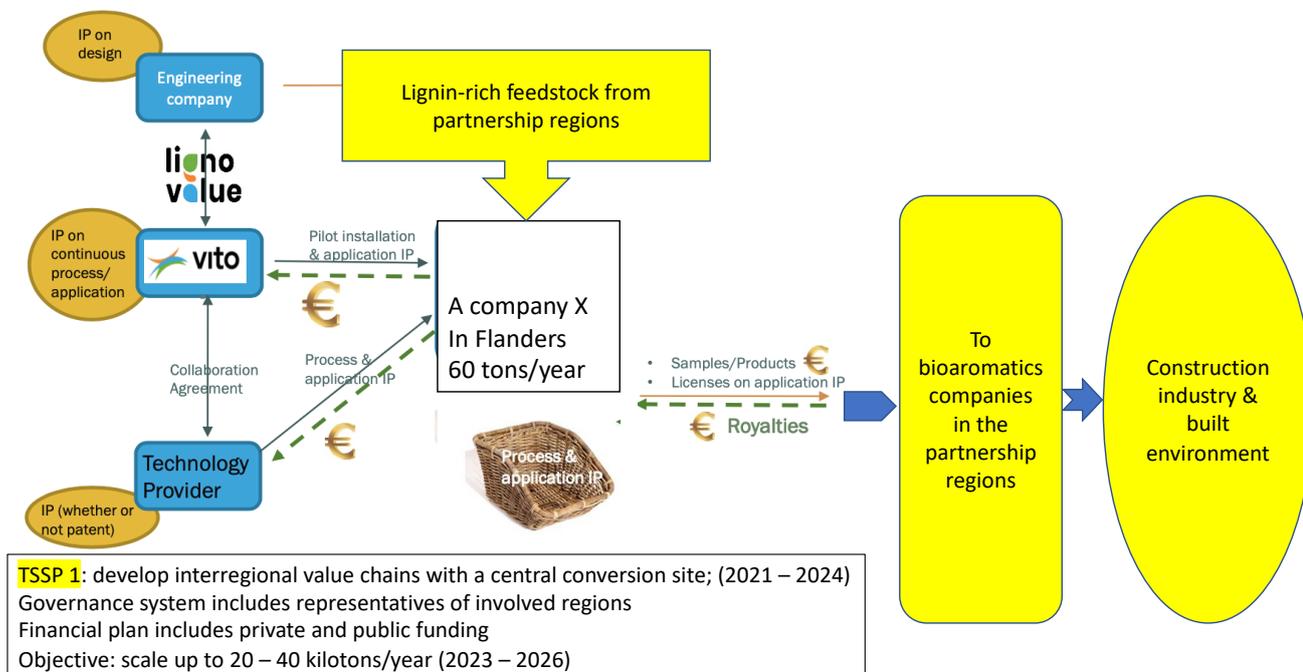
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/phenolic-resins-market>

Folgende Produktrange auf biobasierter Aromaten-Basis werden dazu aktuell entwickelt:

- (1) Verbundwerkstoffe
- (2) Phenolformaldehydharze und Schmelzklebstoffe
- (3) Urethane und Epoxidharze
- (4) Polyurethane, die in flexiblen Schäumen und Klebstoffen aufgetragen werden.
- (5) Duroplastische Epoxidharze

Die europäischen Regionen haben sich dazu in der Vanguard initiative organisiert, die aktuell für die Entwicklung des biobasierten Aromaten-Geschäftes einen Business-Plan erarbeitet. Dieser ist in folgender Abbildung am Beispiel der Region Flandern grob skizziert.

## Bio-aromatics business case/model



Die im EIP erarbeitete Produktion des Lignins an den Biogasanlagen der Operationelle Gruppe im Havelland haben Alleinstellungsmerkmal innerhalb der regionalen Aufstellung innerhalb der in der Vanguard Initiative organisierten Firmen in Europa.

#### **5.4 Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen**

Die Ergebnisse des Vorhabens sind ein Beitrag zu den förderpolitischen EIP-Zielen, da ein Innovatives Effizienzmodul zur Produktion von Lignin aus Gärresten der Biogasanlagen erfolgreich entwickelt wurde. Die Partnerschaft war somit auf eine spezifische gesellschaftliche Herausforderung fokussiert.

#### **5.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis**

Es wurde eine praxistaugliche Verwertung von Gärresten zur Produktion von Lignin experimentell erarbeitet und ingenieurtechnisch projektiert.

Die Experimente und ingenieurtechnischen Ableitungen sowie wirtschaftliche Abschätzungen zeigen, dass der Chemierohstoff Lignin aus 1 Tonne Biogas-Reststoff in einer Größenordnung von 0,45 t hergestellt und von den landwirtschaftlichen Betrieben mit einem Preis von 1000 EURO/Tonne verkauft werden kann. Der derzeitige Marktpreis von 1 t Lignin beträgt 3000 EURO. Es ist vorgesehen die Ergebnisse direkt an den Biogasanlagen der Operationellen Gruppe in die Praxis umzusetzen.

#### **5.6 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen**

Die im Projektantrag formulierten Projektziele wurden erreicht.

#### **5.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen**

Es gibt weitergehende wissenschaftliche Fragestellungen aus den Projektergebnissen, die zukünftig bearbeitet werden sollten. Insbesondere wäre eine Ökobilanzierung des Gesamtprozesses unter Einbeziehung der Folgeprodukte des Lignin-Abbaus im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Möglichkeiten des Transportes der Produkte wichtig zu untersuchen. Es werden Möglichkeiten zur Umsetzung dieser weiterführenden Fragestellungen z.B. im Rahmen der EU-Initiative Vanguard gesehen.

### **6 Zusammenarbeit der operationellen Gruppe**

Die Zusammenarbeit wurde im Einzelnen wie folgt gestaltet

## Aufgabenteilung innerhalb der OG

(a) Projektkoordinator und Leitung der experimentellen Arbeiten: FI Biopos e.V., Prof.

Dr. Birgit Kamm,

Stellvertreter für Organisation der Meetings im Havelland: Kreisbauernverband  
Geschäftsführer Herr Funke, laufende Kontakte zum Landesbauernverband und  
Bundesbauernverband,

Vor-Ort-Mitarbeit des FI Biopos e.V. im Havelland an den Biogasanlagen:

Prozeßingenieur Dr. Ing. Hille,

Abstimmung der technischen Arbeiten: Alle Mitglieder der OG in den laufenden  
Projektmeetings beim Kreisbauernverband Ribbeck/Havelland und in den folgenden  
Vor-Ort-Meetings an den Biogasanlagen,

Die existierenden Biogasanlagen wurden technisch analysiert und die Möglichkeiten  
für die Andockung des Effizienzmoduls wurden innerhalb von Einzelgesprächen von  
FI Biopos e.V. und den Mitgliedern in der Operationellen Gruppe erörtert.

b) Aufgaben des Projektkoordinators und Umsetzung im Projektzeitraum

Organisation der Projektmeetings und der weiteren technischen Meetings an den  
Biogasanlagen,

Zusammenarbeit mit der Europäischen Vanguard-Initiative (Agrarindustrielle  
Umsetzung von Bioraffinations-technologien und Produkten an den Biogasanlagen),  
Vernetzung mit dem Cluster Kunststoffe/Chemie des Landes Brandenburg,

(4) Auswertung der Agrarberichte in Zusammenarbeit mit dem LELF und Landesamt  
für Ländliche Entwicklung Teltow-Ruhlsdorf.

c) Organisation der Prozesse zur Entscheidung und Steuerung

Die fachlichen experimentellen Arbeiten wurden in den Laboratorien und Technika der  
OG sowie durch Vergabe von Aufträgen durchgeführt. Die Mitglieder der OG im  
Havelland stellten die Reststoffe der Biogasanlagen für die Arbeiten zur Verfügung. Die  
Mitglieder der OG stellten die technischen und wirtschaftlichen Daten ihrer  
Biogasanlagen zu technologischen und wirtschaftlichen Auslegung der Verknüpfung  
mit dem Effizienzmodul zur Verfügung.

Der besondere Mehrwert des EIP Projektes war die Möglichkeit der praktischen Verknüpfung  
des agrarwirtschaftlichen know hows des Betrieb der Biogasanlagen mit dem  
wissenschaftlich-technologischen know how des FI Biopos e.V.. Eine weitere

Zusammenarbeit der Mitglieder der OG nach Abschluss des geförderten Projekts ist im Rahmen der Europäischen Vanguard-Initiative vorgesehen.

Es wurden Kontakte mit anderen OGs geknüpft. Es fanden Gespräche zu den EIP Netzwerktreffen im Land Brandenburg und bei den Partnern der OG statt. Insbesondere sind als hilfreiche Kontakte zu nennen.

- (1) Bioenergie, Beratung Bornim GmbH, Geschäftsführer Dr. Matthias Plöchl,
- (2) LUTRA GmbH Lager, Umschlag, Transport, Dipl.-Ing. Frank Ewers, Dipl. Forstwirtin Gundula Teltewskaja Der Hafen könnte für den Transport der Produktentwicklungen aus den Biogasreststoffen eine wichtige Rolle spielen.

## 7 Kommunikations- und Disseminationskonzept

□

Für den Transfer der Ergebnisse in die landwirtschaftliche Praxis wurden experimentellen Arbeiten publiziert und die Ergebnisse des Gesamtprojektes auf Veranstaltungen der Landwirtschaft und der Bioraffinerie Community präsentiert. Die Vernetzung fand auf Veranstaltungen im Land Brandenburg und auf Bundesebene statt.

### Publikation

Petra Schönicke, Birgit Kamm, Miriam\_Padrock, Stoffliche Nutzung von Biogasabfällen, Biospektrum (2017) 23: 597-598. <https://doi.org/10.1007/s12268-017-0842-0> and 23: 718. <https://doi.org/10.1007/s12268-017-0860-y>

### Vernetzung

- (1) Vortrag: Technologische Umsetzung der integrierten Biomassenutzung, Lignoakademie, November 2016, Berlin-Adlershof
- (2) Vortrag: C.A.R.M.E.N. Forum 201, 13. März 2018, Straubing, Herzogschloss
- (3) Die Präsentation des Projektes fand am 07.03.2019 auf der Vollversammlung des Kreisbauernverbandes des Landkreises Havelland in Paaren-Glien statt. Für die Präsentation der Projektstufen wurde ein Übersichts-Poster für alle 3 Projektstufen ausgearbeitet und das Design (mit Ständer) gemeinsam mit einer Werbeagentur umgesetzt.
- (4) Es wurde auf Vorschlag des Bauernverbandes in der Operationellen Gruppe ein abstract für einen Vortrag zur Präsentation des Projektes auf dem Biogas-

Innovationskongress am Zentrum der eingereicht. Der eingereichte Vortrag wurde angenommen. Dazu wurde ein Proceeding angefertigt. Die Präsentation des Projektes fand auf dem Biogas-Innovationskongress 2019 beim Zentrum für Umweltkommunikation der Deutschen Bundesstiftung Umwelt statt. Dieser fand vom 21.-22.Mai 2019 in Osnabrück statt. Das Proceeding wurde im Tagungsband S.91-94 veröffentlicht .

- (5) Die Präsentation des Projektes fand am am 3.4.2019 im Kreisbauernverband Ribbeck durch die Partner der OG statt. Anlass war der Besuch von Staatssekretärin des Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg. Für die Präsentation der Projektstufen wurde ein Übersichts-Poster für alle 3 Projektstufen gezeigt. Parallel wurde eine Vortrag zum Stand des Projektes gezeigt und beispielhaft für die Umsetzung des Projektes der Havellandhof Ribbeck besucht. Die Ergebnisse des Projektes wurden in der gesamten Breite diskutiert.

Die Förderung des Vorhabens durch EIP-AGRI ist nach Meinung der Operationellen Gruppe, -sowohl der Wissenschaftler als auch der Landwirte- ein wichtiges Instrument um Innovationen in der Landwirtschaft zu fördern. Das konkrete Vorhaben konnte die Lücke zwischen Praxis und Wissenschaft schließen. Die Ausgestaltung des EIP-Förderung war ein sehr gutes Instrument und sollte im Rahmen der Entwicklung der Bioökonomie weiter eingesetzt werden.

## **8 Anhang**

**Aus Datenschutzgründen wird der Anhang nicht veröffentlicht.**

### **Abkürzungsverzeichnis**

AFEX	Ammonium Fibre Extraction
BGA	Biogasanlagen
HTC	Hydrotalcit
NREL	National Renewables Energy Laboratories
OG	Operationelle Gruppe

### **Abbildungsverzeichnis**

**Abbildung 1:** Fließschema mit Prozessbeschreibung

**Abbildung 2:** Einbaubeispiel zur Reaktivasphalt-Technologie [2]

**Abbildung 3:** Hydrothermaler Abbau von Rest--Lignin bei optimalen Bedingungen

**Abbildung 4:** Darstellung der Prozessstufen (A-G) und der Stoffströme (01-22) für die Herstellung von Lignin und fermentierbaren Zuckern

### **Tabellenverzeichnis**

**Tabelle 1:** Ergebnisse konstruktive und technologische Parameter BGA Märkischer Hof Selbelang

**Tabelle 2:** Ergebnisse konstruktive und technologische Parameter BGA Agrargenossenschaft Hohennauen

**Tabelle 3:** Ergebnisse konstruktive und technologische Parameter BGA Agro-Farm Nauen, Anlage AEV BGA Nauen GmbH & Co. KG

**Tabelle 4: Ergebnisse** konstruktive und technologische Parameter BGA Agro-Farm Nauen, Anlage Agro Nauen GmbH & Co. KG

**Tabelle 5:** Ergebnisse konstruktiven und technologischen Parameter BGA Havelland Hof Ribbeck

**Tabelle 6:** NREL-Analyse des Gärrestes der BGA Selbelang (Havelland) Mittelwerte der Chargen

**Tabelle 7:** NREL-Analyse des Gärrestes der BGA Agrargenossenschaft Hohennauen, Mittelwerte der Chargen

**Tabelle 8:** NREL-Analyse des Gärrestes der BGA Agrofarm Nauen GmbH, Anlage AEV BGA Nauen GmbH & Co. KG, Mittelwerte der Chargen

**Tabelle 9:** NREL-Analyse des Gärrestes der BGA Havellandhof Ribbeck GbR, Mittelwerte der Chargen

**Tabelle 10:** NREL-Analyse des produzierten Lignins, Mittelwerte der Chargen

**Tabelle 11:** GC-MS der Monomerfraktion (Ethylacetat-Phase) aus dem Abbau des Lignins mittels HTC, (T=250°C, t=0,5 h)

**Tabelle 12:** GC-MS der Monomerfraktion (Ethylacetat-Phase) aus dem Abbau des Lignins mittels BHA, (T=250°C, t=0,5 h)

**Tabelle 13:** GC-MS der Monomerfraktion (Ethylacetat-Phase) aus dem Abbau des Lignins mittels HTC/ BHA, (T=250°C, t=0,5 h)

**Tabelle 14:** Antioxidans-Aktivität und Phenolgehalt der Abbauprodukte aus Gärrest-Lignin im Vergleich zu Trolox (Standard)

**Tabelle 15:** Massenströme des integrierten Prozesses zur Herstellung von Lignin und fermentierbaren Zuckern

**Tabelle 16:** Energieströme des integrierten Prozesses zur Herstellung von Lignin

**Tabelle 17:** Ingenieurtechnische Auslegung des AFEX Reaktors

**Tabelle 18:** Ermittlung der Investitionskosten

**Tabelle 19:** Ermittlung des Marktwertes von reinem produziertem reinen Lignin