

BMWI-VERBUND-VORHABEN

OVALER BIOREAKT - SCHLUSSBERICHT

Demonstrationsvorhaben zur ökologisch und wirtschaftlich beispielhaften Gewinnung von Mehr-Biogas aus biogenen Reststoffen durch Einführung neuartiger ovaler Reaktorsysteme inklusive effizienter Mischtechnik und angepasster Substratvorbehandlung

Teilthema Fraunhofer IKTS: Verfahrenstechnische Auslegung, Bewertung und Optimierung ovaler Biogasreaktoren unter Praxisbedingungen



Unterauftragnehmer:
IWE-Ingenieurgesellschaft für Wasser und Entsorgung mbH
Biogastechnology V.B.T.S. GmbH & Co. KG

Förderkennzeichen: 03KB086 A
Projektlaufzeit: 01.08.2013 – 30.04.2017
Berichtszeitraum: 01.08.2013 – 30.04.2017

Teilthema ATG GmbH:



Anlagentechnische Entwicklung und Errichtung einer autarken, innovativen Pilot-Biogasanlage unter Nutzung ovaler Reaktoren

Förderkennzeichen: 03KB086 E
Projektlaufzeit: 15.12.2015 – 30.04.2017
Berichtszeitraum: 15.12.2015 – 30.04.2017

Dresden/Plauen, 31.10.2017



Gefördert durch



Projekträger



Programmbeileitung



1	Gesamtzielstellung und wissenschaftlich-technische Arbeitsziele	4
1.1	Motivation und Zielstellung	4
1.2	Wissenschaftliche-technische Arbeitsziele des Vorhabens Fraunhofer IKTS – ATG GmbH (Projektphase 3)	7
2	Voraussetzungen zur Vorhabendurchführung	10
2.1	Grundlagen zur Weiterführung des Vorhabens in der Projektphase 3	10
2.2	Kompetenzen zur Projektdurchführung	11
2.2.1	Fraunhofer IKTS	11
2.2.2	ATG GmbH	12
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	13
4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
5	Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn der Projektbearbeitung	16
5.1	Einfluss der Reaktorgeometrie auf den Mischprozess und die Biogasausbeute	16
5.2	Maßstabsübertragung von Mischprozessen	19
5.3	Substratvorbehandlung für den Einsatz lignozellulosehaltiger Substrate zur Biogaserzeugung	20
5.4	Online Messtechnik	21
5.5	Einsatz von Kunststoff für den Reaktorbau	22
5.6	Projektrelevante Ergebnisse Dritter während der bisherigen Bearbeitung des Verbundvorhabens (Phasen 1 und 2)	22
6	Darstellung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse	23
6.1	Vorbereitung der entwickelten Innovationen zur Überführung in den Praxisbetrieb	25
6.1.1	Erarbeitung von Kennziffern zur verfahrenstechnischen Maßstabsübertragung (Arbeitspaket 1.1)	25
6.1.2	Einsatzvorbereitung prozessbegleitender Messtechnik (Arbeitspaket 1.2)	26
6.1.2.1	Messtechnik zur Prozessüberwachung	26
6.1.2.2	Spezialmesstechnik zur Überwachung der Dynamik des Fermentationsprozesses	28
6.1.3	Stoffstrommanagement	30
6.1.3.1	Auswahl der einzusetzenden Substrate – Projektphase 1	30
6.1.3.2	Auswahl der einzusetzenden Substrate – Projektphase 3	32
6.1.4	Stoffstromkonzeption und technisch-technologische Verfahrensfestlegung (Arbeitspaket 1.3)	33
6.1.4.1	Verfahrensfestlegung der Modell- und Demonstrationsanlage (Projektphase 1)	33

6.1.4.2	Verfahrensfestlegung der Pilotbiogasanlage (Projektphase 3)	35
6.2	Errichtung der Pilot-Biogasanlage	41
6.2.1	Verfahrenstechnische/technologische Komponentenauswahl der Pilot-Biogasanlage (Arbeitspaket 2.1)	41	
6.2.1.1	Weitere Spezifizierung der Anlagengestaltung und Angebotseinholung.....	41	
6.2.1.2	Ermittlung von Maßnahmen zur Reduzierung der Anlagenkosten	43	
6.2.1.3	Prüfung von Alternativstandorten für die Pilot-Biogasanlage unter Beachtung veränderter Randbedingungen	43	
6.2.1.4	Einbindung des ovalen Reaktorsystems in die Pilot-Biogasanlage des IKTS.....	46	
6.2.2	Bautechnische Vorbereitung (Auslegung, Statik, Planung, Baugrund), Erstellung Steuerkonzept (Arbeitspaket 2.3)	47	
6.2.3	Bearbeitung genehmigungsrechtlicher Erfordernisse (Arbeitspaket 2.4).....	48	
6.2.4	Erstellung eines Sicherheitskonzeptes für die Pilot-Biogasanlage (Arbeitspaket 2.5)	49	
6.2.5	Fertigungstechnische Umsetzung sowie bauliche Errichtung der Pilot – Biogasanlage (Arbeitspaket 2.6)	50	
6.2.6	Einsatz von Kunststoff für den Reaktorbau	51	
6.3	AP 3, 4 und 5.....	51	
6.4	AP 6 Projektkoordination	51	
6.5	Zusammenfassung der Projektergebnisse	52	
7	Verwertung der Projektergebnisse	53	
8	Zahlenmäßiger Nachweis.....	53	
9	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	53	
10	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	54	
11	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei Dritten.....	57	
12	Veröffentlichungen	57	
13	Literaturverzeichnis.....	57	

1 Gesamtzielstellung und wissenschaftlich-technische Arbeitsziele

1.1 Motivation und Zielstellung

Im Rahmen des global bedeutsamen Umbaus der Energieversorgung von fossilen und atomaren Lösungen hin zu regenerativen Energieträgern sind flexible und effiziente Gesamtsysteme erforderlich, die aufgrund ihrer Nachhaltigkeit eine langfristige Perspektive für alle Bereiche der Wirtschaft garantieren und gleichzeitig dazu beitragen, wesentliche Klima-, Umwelt- und Ressourcenschutzziele zu erreichen. Ein wesentliches Ziel der Biomasse verarbeitenden Industrie ist daher die Etablierung neuer Technologien, durch die sich die Wirtschaftlichkeit der bestehenden und zukünftigen Anlagen steigern lässt.

Innerhalb mehrerer erfolgreich abgeschlossener, von der Europäischen Union (EFRE) und dem Freistaat Sachsen geförderter F&E-Verbundprojekte konnten durch die Stowasser Bau GmbH, die Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen (MFPA) Leipzig mbH und das Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme richtungsweisende Ergebnisse zur Entwicklung der Biogaserzeugung als Zukunftstechnologie gewonnen werden. Deutliche Verbesserungen in der Biogaserzeugung können durch die gezielte Veränderung der Reaktorgeometrie incl. einer angepassten Mischtechnologie und -technik erzielt werden (FRAUNHOFER IKTS, 2011 und 2012a). Eine neuartige Schalungstechnologie (STOWASSER, 2007) ermöglicht die Verarbeitung eines selbstverdichtenden Stahlfaserbetons mit dem Ergebnis, dass die erforderlichen Investitionskosten für den Bau von Rundbehältern für Biogasanlagen, Kläranlagen und Hochbehältern durch Materialeinsparungen und Einsparungen in der Bauzeit gesenkt werden konnten (STOWASSER, 2011 und 2012). Die Anwendung blieb bisher auf die Errichtung von zylindrischen Baukörpern beschränkt.

Mit der innovativen und neuartigen Reaktorbauweise können kostengünstig höhere und somit schlankere Reaktoren errichtet werden, wodurch die im Fermenter ablaufenden Mischprozesse und die Biogasbildung verbessert werden. In kleintechnischen Untersuchungen an Reaktoren mit einem Schlankheitsgrad, d. h. dem Verhältnis von Reaktorhöhe zu Reaktordurchmesser von 1,0 wurde gezeigt, dass der Anteil an Toträumen maximal 5 % beträgt (FRAUNHOFER IKTS 2011). Dagegen betragen diese Toträume in traditionell gestalteten Biogasfermentern mit einem Schlankheitsgrad von 0,5 bis zu 35 %. Die aus der besseren Durchmischung resultierende Reduzierung der effektiven Raumbelastung lässt eine Steigerung der Gasausbeute um circa 25 % erwarten.

Problematisch ist allerdings die Tatsache, dass die Einhaltung eines Reaktorschlankheitsgrades von 1,0 bei gleichzeitiger Realisierung praxisrelevanter Reaktorvolumina relativ hohe Reaktoren zur Folge hat. Daraus resultierende Bauhöhen für zylindrische Reaktoren von 14 – 20 m lassen sich in der Praxis jedoch nur begrenzt realisieren. Ein höherer Reaktorschlankheitsgrad als Voraussetzung zur weiteren Leistungssteigerung des Biogaserzeugungsprozesses kann durch die Einführung ovaler, mit Trennwänden unterteilter Reaktoren erzielt werden (FRAUNHOFER IKTS 2013). Neben einer verfahrenstechnischen Optimierung der Reaktorgeometrie und der einzusetzenden Rührsysteme mit den daraus resultierenden Effizienzsteigerungen des Biogasprozesses sollte der Einsatz von Stahlfaserbeton für ovale Reaktoren zur Verbesserung des ökologischen und wirtschaftlichen Gesamtkonzeptes der Biogaserzeugung beitragen (STOWASSER 2013).

Ziel des Verbundvorhabens war es, die Ergebnisse der industriellen Forschung (Technologieförderung Sachsen) in den technischen Maßstab zu skalieren und unter realen Praxisbedingungen zu überprüfen sowie weiter zu optimieren. Dazu war zunächst vorgese-

hen, die innovativen Anlagen- und Prozessteile in eine Biogasanlage 500 kW_{el} zu integrieren. Neben der verfahrenstechnischen Bewertung des Einflusses der Reaktorgeometrie auf den Biogasbildungsprozess sollten die innerhalb des SMWK-Projektes abgeleiteten Aussagen zur Langzeitstabilität bestätigt werden.

Aufbauend auf den von FRAUNHOFER IKTS (2011 und 2012) bereits erzielten Ergebnisse zum Einsatz von Stroh und Grasschnitt als Substrate für die Biogaserzeugung (kleintechnische und Pilotversuche) sollte eine weitere Leistungssteigerung der Biogaserzeugung durch den Einsatz hoch lignozellulosehaltiger biogener Reststoffe demonstriert werden.

Mit den im EEG 2014 getroffenen Veränderungen zur Förderung von Strom aus Biomasse konnte die geplante Errichtung der großtechnischen Biogasanlage nicht mehr wirtschaftlich dargestellt werden. Gleichzeitig war die geplante Vermarktung ovaler Biogas-Reaktoren aus Stahlfaserbeton nicht mehr gegeben, sodass die damaligen Verbundpartner Werner Stowasser Bau GmbH und die MFPA Leipzig GmbH im April 2014 aus dem Verbund ausschieden.

Trotz des vor allem 2014 geführten Diskurses zur Biogastechnologie kann diese aufgrund ihrer Flexibilität wichtige Aufgaben einer zukünftigen Energieversorgung übernehmen. Die Entwicklung und Erprobung umfassender technologischer Maßnahmen zur Schaffung wirtschaftlicher Lösungen der Biogaserzeugung erfordert somit die Fortsetzung der auf diesem Sektor begonnenen Forschungstätigkeiten, wobei besonders praxisrelevante Lösungen für die Gesamtprozesskette der Biogaserzeugung und -verwertung in den Vordergrund zu stellen sind. Aus diesem Grund wurde gemeinsam mit dem Projektträger entschieden, eine autarke 10-kW_{el}-Pilotbiogasanlage unter Nutzung von ovalen 30-m³-Reaktoren im Technologiepark Bioenergie in Helmsgrün/Vogtland gemeinsam mit dem neu gewonnenen Verbundpartner, der LEHMANN-UMT GmbH zu errichten und die oben genannten Vorteile zu demonstrieren.

Infolge aufgetretener Probleme beim Projektpartner LEHMANN-UMT sah sich dieser veranlasst, seine Mitwirkung im Verbund zum 30.06.2015 zu kündigen. Mit der ATG GmbH mit Sitz in Plauen wurde ein innovatives Unternehmen in den Bereichen Sondermaschinen- und Anlagenbau gefunden, mit der es möglich wurde, das Projekt weiterzuführen. Zielstellung war die Demonstration der innovativen Projektansätze in einer mobilen Pilot-Biogasanlage. Die bisher bei der LEHMANN-UMT angesiedelten Projektaufgaben wurden daher auf die ATG GmbH und das Fraunhofer IKTS entsprechend der bestehenden Kompetenzen übertragen.

Somit untergliedert sich das Gesamtvorhaben in drei Projektphasen. Die Projektziele der Projektphasen sind der Übersicht in Abb. 1 zu entnehmen.

- Projektphase 1

- Errichtung und Betrieb/Optimierung einer 500-kW_{el}-Biogasanlage mit einem ovalen Reaktorsystem als Modell- und Demonstrationsanlage,
- Projektbeantragung vom 29.04.2013,
- Verbund: Fraunhofer IKTS, Werner Stowasser Bau GmbH, MFPA Leipzig GmbH,
- Teilprojekte 03KB086 A – C;

- Projektphase 2

- Errichtung und Betrieb/Optimierung einer 10-kW_{el}-Pilotbiogasanlage mit einem ovalen 30-m³-Stahl-Reaktor und einem ovalen 9-m³- Reaktor als Sandwichbau,
- Projektbeantragung vom 14.08.2014,
- Verbund: Fraunhofer IKTS, LEHMANN-UMT GmbH,
- Teilprojekte 03KB086 A und 03KB086 D;

• Projektphase 3

- Errichtung und Betrieb/Optimierung einer mobilen 4-kW_{el}-Pilotbiogasanlage mit ovalen Reaktoren 6 m³ und 12 m³,
- Projektbeantragung vom 13.10.2015 und 16.11.2015,
- Verbundpartner: Fraunhofer IKTS, ATG GmbH,
- Teilprojekte 03KB086 A und 03KB086 E.

 Gesamtzielstellung und
 wissenschaftlich-technische
 Arbeitsziele

Projektphasen 1 und 2	Projektphase 3
Grundlegende Zielstellung	
Entwicklung strömungstechnisch optimierter Baukörper mit integrierter Mischtechnik, zur Steigerung der Biogasausbeute	Entwicklung strömungstechnisch optimierter Baukörper mit integrierter Mischtechnik, zur Steigerung der Biogasausbeute
Einführung ovaler, mit Trennwänden unterteilter Reaktoren	Einführung ovaler, mit Trennwänden unterteilter Reaktoren
Ausbildung Nachfermenter durch Konzept Reaktor-in-Reaktor; Errichtung einer mobilen Anlage in Container-Bauweise	Errichtung einer mobilen Anlage in Container-Bauweise
Verfahrenstechnische Zielstellung	
Überprüfung der aufgestellten Kennziffern zur Maßstabsübertragung	Überprüfung der aufgestellten Kennziffern zur Maßstabsübertragung
Steigerung Biogasausbeute um 25 % und Senkung Energieaufwand Mischen um 30 %	Steigerung Biogasausbeute um 25 % und Senkung Energieaufwand Mischen um 30 %
Nachweis der effizienten Biogaserzeugung aus lignozellulosehaltigen Reststoffen	Nachweis der effizienten Biogaserzeugung aus lignozellulosehaltigen Reststoffen
Technologische Anpassung der Verfahrenskette zur Substratvorbehandlung als Grundlage für einen störungsfreien Dauerbetrieb	Technologische Anpassung der Verfahrenskette zur Substratvorbehandlung als Grundlage für einen störungsfreien Dauerbetrieb
Realisierung kontinuierlicher Substratflüsse und Vermeidung von Störstoffeintrag	Realisierung kontinuierlicher Substratflüsse und Vermeidung von Störstoffeintrag
Einsatz von Spezialmesstechnik zur dynamischen Bewertung der chemisch/biologischen Prozesse	Einsatz von Spezialmesstechnik zur dynamischen Bewertung der chemisch/biologischen Prozesse
Bautechnische Zielstellung	
Errichtung des ovalen Reaktorsystem aus Stahlfaserbeton bzw. Fertigung der ovalen Reaktoren in einer Sandwich-Verbundbauweise	Überprüfung des Einsatzes von Kunststoff zur Reaktorfertigung zur Verbesserung der Korrosionseigenschaften

Abb. 1 Projektziele der Projektphasen

Die Ergebnisberichte zu den Teilprojekten 03KB086 B – D wurden von den ehemaligen Verbundpartnern separat erstellt. Der hier vorliegende Bericht dient vordergründig zur Vorstellung der Ergebnisse der Projektphase 3.

1.2 Wissenschaftliche-technische Arbeitsziele des Vorhabens Fraunhofer IKTS – ATG GmbH (Projektphase 3)

Der Projektansatz setzt die in unterschiedlichen Projekten begonnene Verbindung von technologieorientierten Themen aus den Gebieten von Bau- und Verfahrenstechnik fort, die unmittelbar zu einem weiteren Ausbau der regenerativen Energieerzeugung aus Biomasse führt. Im Rahmen des Projektes sollten die bisher – vorwiegend im kleintechnischen Maßstab – ermittelten Ergebnisse aufgegriffen und im Pilotmaßstab als Modellvorhaben nachgewiesen bzw. so qualifiziert werden, dass ein praxistaugliches, ökologisch und ökonomisch optimiertes Reaktorsystem zur Biogaserzeugung geschaffen wird. Gleichzeitig war durch eine vorzunehmende Verfahrensoptimierung die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen weiter zu verbessern.

Ausgehend von vorliegenden Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab bietet die Einführung ovaler, mit Trennwänden unterteilter Reaktoren eine verfahrenstechnisch vorteilhafte Reaktorgeometrie, mit der im Vergleich zu traditionell errichteten Biogasanlagen eine signifikante Steigerung der Biogausbeute erzielt werden kann.

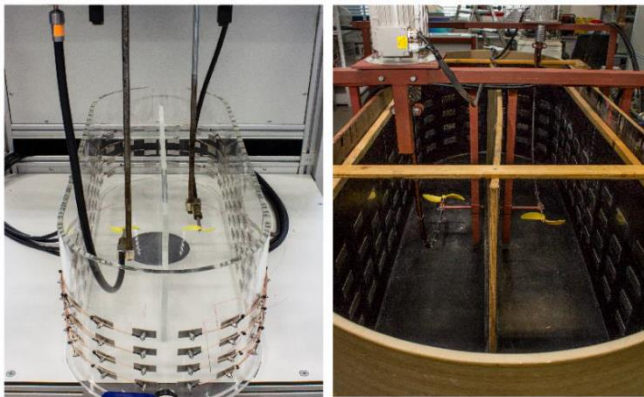


Abb. 2 Ovale Reaktoren im Labor- und Technikumsmaßstab

Diese Reaktorgeometrie einschließlich der dazugehörigen Rührtechnik war in den Pilotmaßstab zu skalieren und bildet das Kernstück der mobilen Pilot-Biogasanlage. Unter Beachtung des während der bisherigen Projektbearbeitung bekannt gewordenen Gebrauchsmusters DE 20 2008 017 612 U1 wurde entschieden, der ovalen Reaktorgeometrie einen oktogonal geformten Umlaufreaktor gegenüberzustellen. Im Unterschied zur bisher geplanten Aufteilung der Fermenter auf mehrere Container sollten aus Gründen der Kostenersparnis die Fermenter in nur einem Container untergebracht werden. Unter Beachtung der Abmaße von kommerziell zur Verfügung stehenden Containern können folgende Reaktoren in einem 40-ft-Container untergebracht werden

- ein ovaler Umlaufreaktor 6 m³ und
- ein oktogonaler Umlaufreaktor 12 m³.

Das geplante Konzept der Pilot-Biogasanlage wird schematisch in Abb. 3 gezeigt.

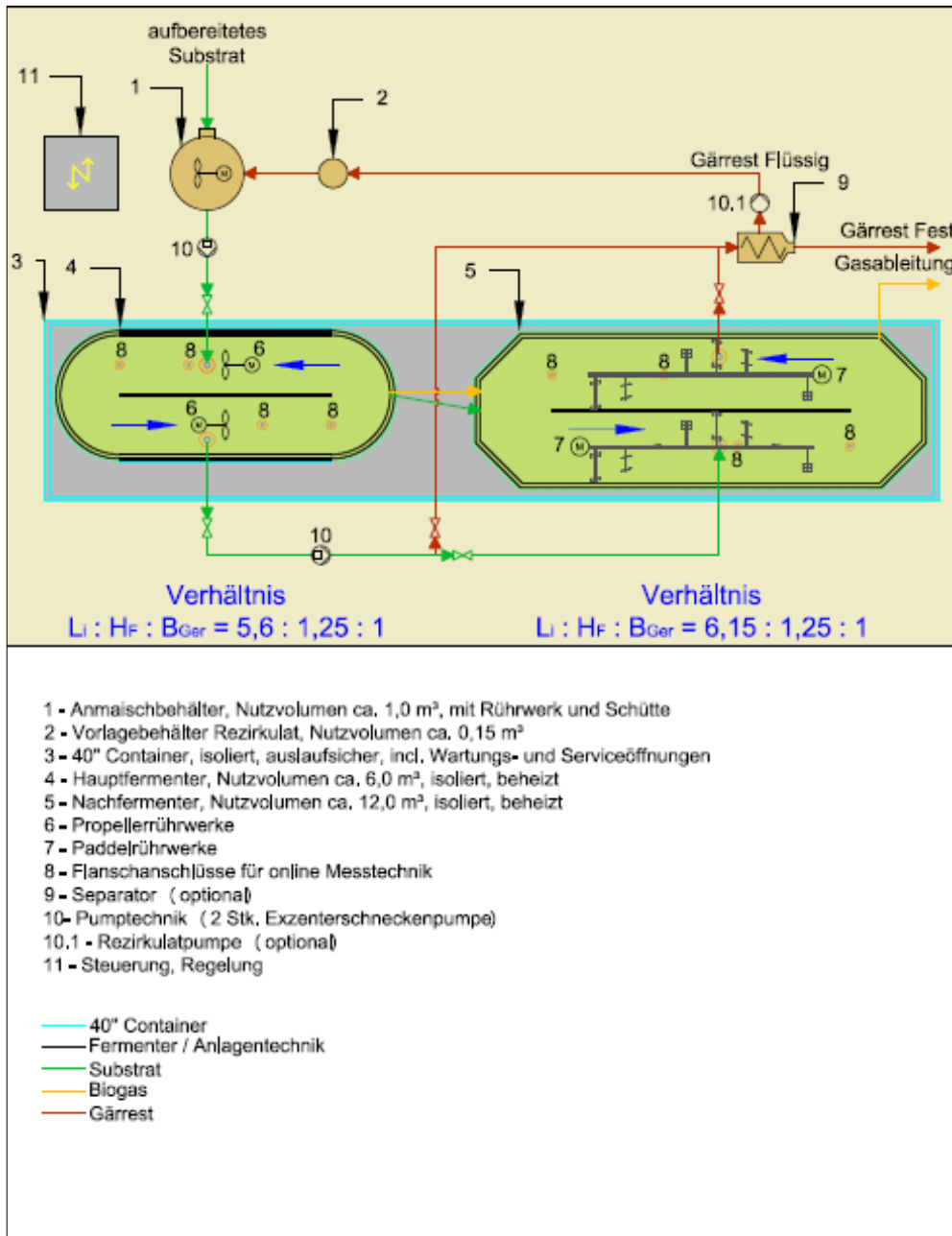


Abb. 3 Schematische Darstellung der mobilen Pilot-Biogasanlage (Quelle: IWE mbH)

Verfahrenstechnische Ziele

Als besondere Herausforderung erwies sich nach wie vor die Aufstellung geeigneter Kenngrößen zur Maßstabsübertragung von Mischprozessen, wobei dieses Problem für Biogasprozesse infolge der vorliegenden komplexen Substrateigenschaften noch erschwert wurde. Aufbauend auf bisherigen Erkenntnissen des FRAUNHOFER IKTS (2011 und 2014) sollten innerhalb des Projektes bisher abgeleitete Kennzahlen überprüft und angepasst werden. Infolge der direkten Auswirkungen des Mischprozesses auf das Ergebnis der Fermentation galt es, diese Kennziffern zur Maßstabsübertragung auch für den Fermentationsprozess abzuleiten.

Im Ergebnis der strömungstechnisch optimierten Reaktorgeometrie und angepasster Rührtechnik, sollte die Biogasausbeute um 25 % im Vergleich zu Anlagen mit traditioneller Bauweise gesteigert werden. Weiterhin wurde erwartet, dass der zum Mischen erforderliche Eigenenergieaufwand um circa 30 % gesenkt werden kann.

Eine weitere wesentliche Zielstellung des Projektes war es nachzuweisen, dass lignozellulosehaltige Reststoffe wie Stroh und Landschaftspflegematerial, effektiv zur Biogasfermentation eingesetzt werden können. Auf der Grundlage vorliegender Ergebnisse zur Substratvorbehandlung derartiger Einsatzstoffe war die Verfahrenskette zur Substratvorbehandlung technologisch so anzupassen, dass ein störungsfreier Dauerbetrieb unter Praxisbedingungen möglich wird. In Abänderung zum Projektantrag vom 14.08.2014 sollte zur Substratvorbehandlung der im Applikationszentrum Bioenergie Helmsgrün vorhandene Substratvorbehandlungscontainer des IKTS genutzt werden.

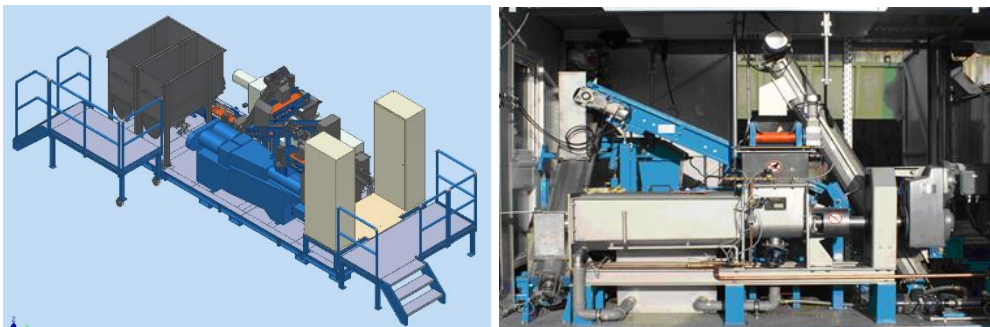


Abb. 4 Substratvorbehandlungscontainer im Applikationszentrum Bioenergie Helmsgrün (links: 3D-Aufstellungsplan, Quelle: LEHMANN Maschinenbau); rechts: installierte Technik im Container)

Weiterhin sollte zur Beurteilung der Dynamik des Fermentationsprozesses ein innovatives messtechnisches System in Form eines Gelöst-H₂-Messsystems (IWE, 2013) zum Einsatz kommen, welches innerhalb der Gär suspension die Online-Bestimmung relevanter Parameter (bspw. Essigsäure, FOS/TAC, H₂) erlaubt.

Bautechnische Ziele

Zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit der zum Fermenterbau eingesetzten Materialien sollte innerhalb des Projektes nach alternativen Werkstoffen recherchiert werden. Ausgehend von vorliegenden Erfahrungen im Trinkwasserbereich soll der Einsatz von Kunststoff für den Reaktorbau überprüft werden.

2 Voraussetzungen zur Vorhabendurchführung

2.1 Grundlagen zur Weiterführung des Vorhabens in der Projektphase 3

Die Grundlagen für die bisherige Bearbeitung des Verbundvorhabens Ovaler BioReakt in den Projektphasen 1 und 2 bildeten der Zuwendungsbescheid vom 31.07.2013 auf der Basis der Antragstellungen auf Gewährung einer Bundeszuwendung vom 29.04.2013 für die Unternehmen:

- Fraunhofer Gesellschaft e.V.; Fraunhofer IKTS, Dresden; FKZ: 03KB086 A
Teilthema: Verfahrenstechnische Auslegung, Bewertung und Optimierung ovaler Biogasreaktoren unter Praxisbedingungen
- Stowasser Bau GmbH, Roßwein; FKZ: 03KB086 B
Teilthema: Errichtung ovaler Biogasreaktoren aus Stahlfaserbeton und bautechnische Bewertung im Langzeitverhalten.
- MFPA Leipzig GmbH, Leipzig; FKZ: 03KB086 C
Teilthema: Monitoring bautechnischer Kennwerte und Optimierung der Materialeigenschaften bei Einsatz von Stahlfaserbeton in der Biogastechnik

und der Zuwendungsbescheid vom 29.09.2014 zum Antrag auf Neuorientierung des Projektinhaltes vom 14.08.2014 für die

- LEHMANN-UMT GmbH, Pöhl; FKZ: 03KB086 D
Teilthema: Errichtung und Betrieb einer autarken, innovativen Biogasanlage und bautechnische Bewertung der ovalen Reaktoren im Langzeitverhalten.

Im Focus der bewilligten Vorhaben A – C stand die Errichtung einer großtechnischen Demonstrations-Biogasanlage 500 kW_{el} zur Erprobung und Validierung einer neuartigen ovalen Reaktorgeometrie aus Stahlfaserbeton mit effizienter Mischtechnik. Zum Gelingen des Gesamtvorhabens wurde ein Investor in der Region Havelland gewonnen, der die geförderten Innovationen in eine 500-kW_{el}-Biogasanlage integrieren und betreiben wollte. Mit der Verabschiedung des EEG 2014 konnte die Investition vom Investor nicht mehr verantwortet und die zukünftige Vermarktung von derartigen Innovationen für Biogasanlagen keinesfalls gesichert werden. Infolge fehlender Verwertungschancen stiegen die Werner Stowasser Bau GmbH und die MFPA Leipzig GmbH im März 2014 aus dem Verbund aus.

Voraussetzungen für einen weiteren Ausbau der Biogastechnik sind umfassende Optimierungsmaßnahmen des verfahrenstechnischen Anlagenbetriebes zur Verbesserung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit. Die Errichtung und Erprobung einer wesentlich kleineren Demonstrationsanlage auf dem Gelände der Bioenergie Pöhl in Helmsgrün stellte somit einen sinnvollen Weg zur erfolgreichen Verbund-Projektfortsetzung dar. Geplant war die Errichtung einer autarken, innovativen Biogasanlage in Modulbauweise. Durch Einbeziehung umfassender technologischer Maßnahmen innerhalb der Gesamtprozesskette der Biogaserzeugung wie der Entwicklung verschleißarmer Technik zur Substratvorbehandlung für hoch lignozellulosehaltiger Substrate, dem Einsatz ovaler Reaktorgeometrien mit effizienter Mischtechnik und der Nutzung einer zweistufigen Gärrestentwässerung sollte die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung verbessert werden. Darüber hinaus wurden weitere wirtschaftliche Effekte durch Einsatz eines hoch dämmenden Leichtbetons in Sandwich-Bauweise angestrebt. Mit dem Projektträger wurde die Errichtung eines 9-m³-Reaktors in Sandwich-Betonbauweise und eines 30-m³-Reaktors in

Stahlbauweise abgestimmt. Gemäß Verbundarbeitsplan war für Juli 2015 die Inbetriebnahme der Pilot-Biogasanlage geplant. Infolge aufgetretener Probleme beim Projektpartner LEHMANN-UMT sah sich dieser veranlasst, seine Mitwirkung im Verbund zum 30.06.2015 zu kündigen.

Trotz vorhandener Akzeptanzprobleme bezüglich des weiteren Ausbaus von Biogasanlagen bleibt unumstritten, dass Biogas mit den gegebenen Möglichkeiten zur Speicherung und Flexibilisierung einen wichtigen Beitrag zur Energiewende bildet. BAUR und HAUSER (2015) betonen, dass die alleinige Reduzierung der Bioenergie auf ihre Wirkung im Bereich der Strompreisentwicklung nicht alle ökonomischen Aspekte berücksichtigt. Den Kosten aus der EEG-Vergütung stehen viele Positionen in der Landnutzung oder der Ökologie gegenüber, die zu höheren Wertschöpfungseffekten führen. Auf dem Entsorgungssektor biogener Reststoffe trägt das EEG maßgeblich zur Umsetzung des im Kreislaufwirtschaftsgesetz geforderten Hochwertigkeitsgebotes bei, indem diese Reststoffe einer energetischen und eventuellen stofflichen Verwertung zugeführt werden.

Diese Aussagen unterstreichen die oben genannte Notwendigkeit zur Entwicklung effizienter, wirtschaftlicher als auch nachhaltiger technologischer Konzepte für den Einsatz von Biogasanlagen. Als innovatives Unternehmen zur Weiterführung des Projektes stand die ATG GmbH zur Verfügung. Neben dem notwendigen Know-how zur inhaltlichen Gestaltung des Projektes verfügte die ATG GmbH als neuer Eigentümer der zur Errichtung der Pilot-Biogasanlage erforderlichen Grundstücksflächen gleichzeitig über die technisch-organisatorischen Voraussetzungen für eine termingerechte Umsetzung der Projektaufgaben.

Weiterhin ergab sich für die ATG GmbH mit der geplanten Vermarktung von Biogasanlagen < 100 kW_{el} für dezentrale Anwendungen ein relevantes Potenzial zur Verwertung der Projektergebnisse. Durchgeführte Wirtschaftlichkeitsrechnungen (FRAUNHOFER IKTS 2015) zur dezentralen Verwertung biogener Reststoffe in kleineren Biogasanlagen für Kommunen oder Ferienparks haben unter dem Ansatz nichtanfallender Substrat- und Entsorgungskosten eine Wirtschaftlichkeit für diese Anlagen gezeigt. Innerhalb des Projektes sollten diese Ergebnisse bestätigt und durch entsprechende Optimierungsmaßnahmen verbessert werden.

Auf Basis dieser Aussagen stand der Projektträger einer Projektfortsetzung offen gegenüber und forderte am 15.09.2015 die ATG GmbH zur Antragstellung auf. Gleichzeitig wurde Fraunhofer IKTS zur Stellung eines Antrages auf Aufstockung des bestehenden Teilprojektes 03KB086 A gebeten.

2.2 Kompetenzen zur Projektdurchführung

2.2.1 Fraunhofer IKTS

Das Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) ist seit vielen Jahren auf den Gebieten der Umweltverfahrens- und Energietechnik tätig. Die Verfahrens- und Systementwicklung auf den Gebieten Trinkwasseraufbereitung, Abwasser- und Schlammbehandlung für kommunale und industrielle Kläranlagen sowie zur regenerativen Energieerzeugung durch Fermentationsprozesse (z.B. Biogas) sind Forschungs- und Entwicklungsaufgaben der Abteilung »Biomassetechnologien und Membranverfahrenstechnik«. Im Team arbeiten Verfahrenstechniker, Siedlungswasserwirtschaftler, Bioverfahrenstechniker und Umwelttechniker interdisziplinär zusammen, um die innovative Verfahrens- und Systementwicklungen bis zur Anwendungsreife zu führen. Das Leistungsspektrum reicht von der Entwicklung, Optimierung und Planung über die Errichtung von Anlagen und deren Überführung in den dauerhaften Praxisbetrieb. Die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten mündeten in zahlreichen Patentanmeldungen auf den Gebieten der Klärschlamm-, NawaRo- und Gärrestbehandlung.

Mit dem Applikationszentrum Bioenergie (AZB) am Standort Pöhl verfügt das IKTS zudem über eine ausgezeichnete Infrastruktur, um FuE-Entwicklungen mit hoher Sichtbarkeit zu demonstrieren. Das AZB wird vom Fraunhofer IKTS als Versuchsfeld für die Entwicklung und Erprobung von Verfahren und Ausrüstungen zur Substratkonfektionierung und Biomassekonversion betrieben. Es verfügt über alle notwendigen Voraussetzungen von Versuchstechnik im kleintechnischen Maßstab für Gärversuche sowie einem Substratvorbehandlungscontainer mit Zerkleinerungs- und Entwässerungstechnik. Weiterhin sind unterschiedliche fermentationsgeeignete Rührreaktoren sowie Trocknungs- und Kompaktierungs-Anlagen für Inputsubstrate und Gärreste ebenso wie Gasreinigungsstufen einschließlich der erforderlichen Mess- und Analysetechnik verfügbar.

Fraunhofer IKTS verfügt über die personellen und materiellen Voraussetzungen zur Bearbeitung dieses Projektes. Für die Erbringung der Leistungen in diesem Projekt konnte folgende Anlagen- und Analysetechnik des IKTS genutzt werden:

- Substratvorbehandlungscontainer mit einem Bioextruder B22e und entsprechender Fördertechnik,
- statistisch hochauflösende bildgebende Partikelanalyse (QICPIC) und Laserbeugungsspektroskopie (Mastersizer) zur Bewertung der Partikelgrößen,
- Analysetechnik zur Bestimmung rheologischer Kenngrößen von hoch konzentrierten faserigen Stoffsystemen,
- Gasanalysetechnik (Gasmengenmessung, Gaschromatographie) zur Bewertung der Fermentationsprozesse und
- High Performance Liquid Chromatographie (HPLC) zur Bestimmung von organischen Säuren in der Flüssigphase und Beurteilung des Fermentationsprozesses.

Mit der IWE-Ingenieurgesellschaft für Wasser und Entsorgung mbH sowie der Biogas-technology V.B.T.S. GmbH & Co. KG standen zwei kompetente Unternehmen als Unterauftragnehmer zur Verfügung, die vor allem auf den Gebieten der planerischen Anlagenvorbereitung wesentlich zur Erfüllung der Projektaufgaben beitrugen. Die IWE mbH konnte zudem aufgrund der Standort spezifischen Kenntnisse zum Technologiepark „BioEnergie Pöhl“ (Helmsgrün) aus der Bauantragserarbeitung (2012) maßgeblich zur technologischen Gestaltung, zur Detail – Anlagenplanung (in Zusammenarbeit mit ATG) und zur Aufstellung der autarken Demonstrator Biogasanlage sowie zur Genehmigungsvorbereitung innerhalb der Verbundprojektphase 3 wesentliche Teilaufgabenbearbeitungen leisten.

2.2.2 ATG GmbH

Die Firma ATG mit Sitz in Plauen ist ein innovatives zertifiziertes Unternehmen in den Bereichen Sondermaschinen- und Anlagenbau. Als Kernkompetenzen ist die Entwicklung, Konstruktion und Herstellung von komplexen, automatisierten Transport-, Produktions- und Prüfsystemen hervorzuheben. Zum Firmenportfolio gehören weiterhin Arbeiten auf den Gebieten der Elektrotechnik und Automatisierung, des Stahlbaus, der mechanischen Fertigung und der Drucklufttechnik. Im Unternehmen sind circa 30 Mitarbeiter beschäftigt, wovon ein Teil der Mitarbeiter über ein hohes Know-how zur Herstellung und den Betrieb von Biogasanlagen verfügt. Das Unternehmen verfügt über ein zertifiziertes Managementsystem nach DIN EN ISO 9001:2008 und besitzt die Herstellerqualifikation für Stahltragwerke nach EN 1090 ECC3.

Im Einzelnen standen die folgenden technischen Voraussetzungen zur Erfüllung der Projektaufgaben zur Verfügung.

- Automatisierung – Steuerungsbau – Programmierung,
- Elektrotechnische Konstruktion mit CAD Software EPLAN P8,
- Schaltanlagenbau,

- Mechanische Fertigung in den Bereichen Fräsen, Drehen, Bohren und Sägen,
- Schweißdienstleistungen in den Bereichen Stahl, Aluminium und Edelstahl,
- Montagedienstleistungen für komplette Baugruppen,
- Entwicklung, Konstruktion und Zeichnungserstellung mit CAD Software INVENTOR 2015,
- Drucklufttechnik,
- Instandhaltung, Reparatur und Erneuerung von bestehenden Maschinen und Anlagen.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan zum Gesamtvorhaben nach erfolgter Anpassung des Projektinhaltes für die Projektphase 3 wird aus der Abb. 5 ersichtlich. In Anlehnung an den bisherigen Arbeitspläne der ehemaligen Verbünde wurden die notwendigen Arbeitsinhalte der Projektphase 3 in sechs Arbeitspakete mit bis zu sieben Unterpunkten eingeordnet.

Als Projektlaufzeit der Projektphase 3 war der Zeitraum Dezember 2015 bis Juli 2017 geplant. Die Inbetriebnahme der Pilot-Biogasanlage am Standort Helmsgrün war für September 2016 vorgesehen. Innerhalb eines sich anschließenden 10-monatigen Dauerbetriebes sollten die Leistungskennwerte der Anlage nachgewiesen werden.

Unter technologischen als auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten sollte die Pilot-Biogasanlage in unmittelbarer Nähe zum Applikationszentrum Bioenergie des IKTS auf dem Gelände der ATG GmbH in Helmsgrün errichtet werden. Die damit verbundene Grenzbebauung wurde durch den Besitzer des Nachbargrundstücks, der BioEnergie Pöhl e. K. als unproblematisch angesehen. Infolge des am 28.10.2016 eröffneten Insolvenzverfahrens der BioEnergie Pöhl und der Einwände des Insolvenzverwalters gegen diese Grenzbebauung wurde die Errichtung der Pilotanlage am geplanten Standort hinfällig.

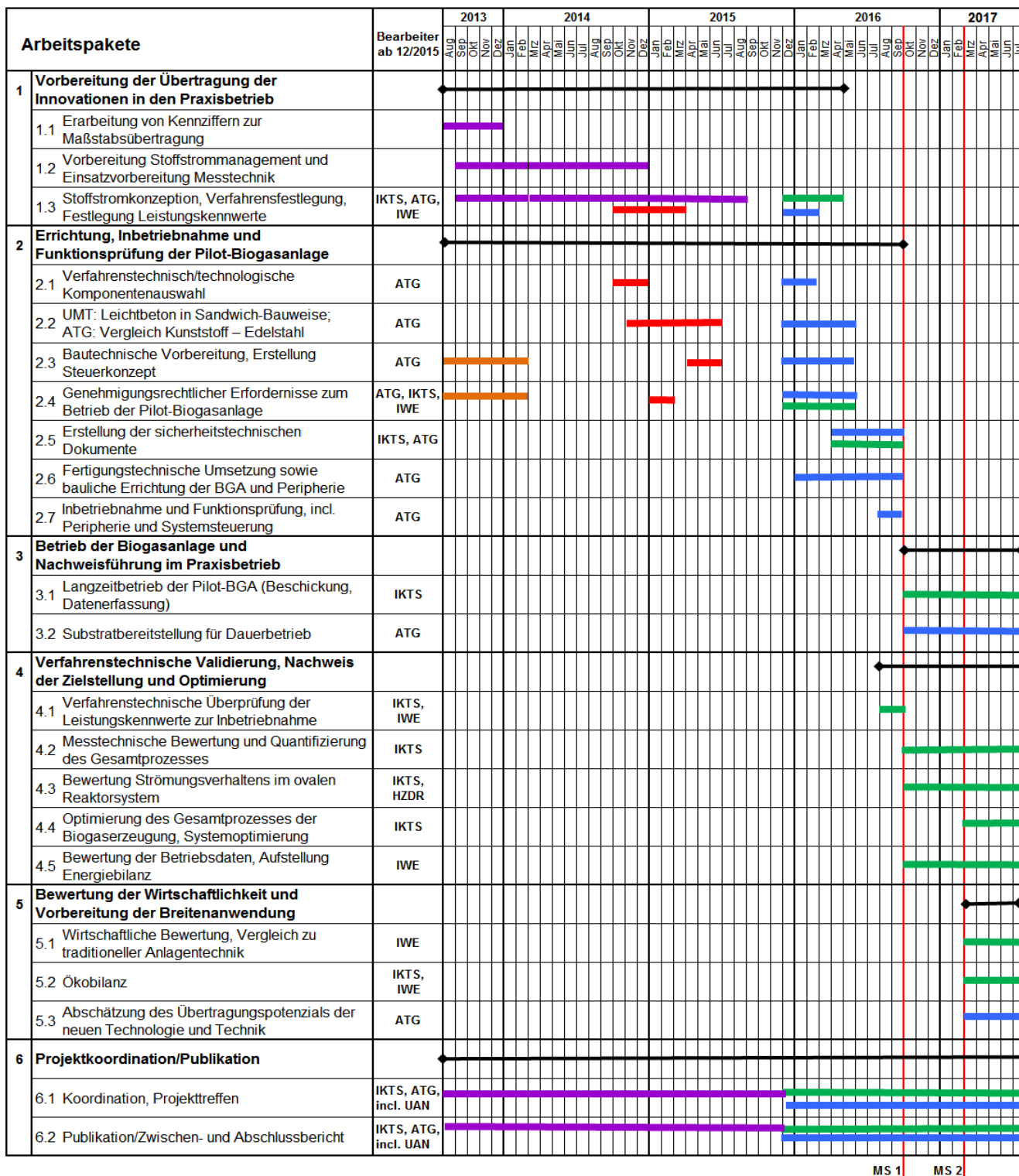
Um dennoch eine Erfüllung der Projektziele zu ermöglichen, verständigte sich der Verbund in der Arbeitsbesprechung am 03.02.2017 auf einen angepassten Projektinhalt in der Gestalt, dass das neu zu errichtende Reaktorsystem in den Bestand der IKTS-Pilotanlage im Applikationszentrum Helmsgrün eingebunden wird. Die Überprüfung des dazu für die ATG GmbH erforderlichen finanziellen Aufwandes hat jedoch ergeben, dass zur Realisierung dieser Alternativvariante erheblich mehr Kosten als angenommen benötigt werden. Hervorzuheben sind hier signifikant längere Rohrleitungen, Anpassungen des Baugrundes und erhöhte steuerungstechnische Aufwendungen zur Kopplung des Anlagenbestandes der IKTS-Anlage mit den neu zu errichtenden Anlagenteilen. Auch eine weitere verfahrens- und anlagentechnische Optimierung der geplanten Pilot-Biogasanlage führte zu keiner Reduzierung des erforderlichen Finanzaufwandes. Im Ergebnis der vorgenommenen Kalkulationen stellt sich bei der ATG GmbH ein Fehlbetrag von circa 100.000 EUR ein, der auch nicht durch das IKTS getragen werden konnte.

Insgesamt war festzustellen, dass das geplante Konzept mit den noch im Projekt vorhandenen finanziellen Mitteln nicht realisiert werden konnte. Andererseits hätte eine reduzierte Anlagenvariante durch Weglassen einzelner Anlagenteile und der damit verbundenen Einhaltung des Kostenrahmens die Funktionsfähigkeit der geplanten Pilot-Biogasanlage in Frage gestellt, sodass diese Variante abgewählt wurde.

Aus diesen Gründen beantragten Fraunhofer IKTS und die ATG GmbH einen vorzeitigen Projektabbruch zum 30.04.2017. Bis zu diesem Zeitpunkt erfolgte eine Bearbeitung der Arbeitspakete 1.1 – 1.3 sowie der Arbeitspakete 2.1 – 2.4. Mit der Umsetzung der Arbeitspakete 2.5 und 2.6 wurde begonnen.

Anpassung Projekthinhalte, Teilprojekt A: Fraunhofer IKTS
 Anpassung Projekthinhalte, Teilprojekt E: ATG GmbH
 Bearbeitung durch UMT gemäß Neuorientierung Projekthinhalte
 Bearbeitung durch Stowasser Bau GmbH und MFPA Leipzig GmbH
 Bearbeitung durch IKTS einschl. UAN

Antrag vom 13.10.2015
 Antrag vom 13.10.2015
 Antrag vom 14.08.2014
 Antrag vom 29.04.2013
 Anträge vom 29.04.2013 und 14.08.2014



MS 1 MS 2

MS 1 Erfolgreiche Inbetriebnahme der Pilot-Biogasanlage
MS 2 Nachweis des erfolgreichen Dauerbetriebes unter Praxisbedingungen und Darstellung des Optimierungspotenzials

Abb. 5 Arbeitsplan des Verbundes für die Projektphase 3 unter Beachtung der Gesamt-Projektlaufzeit

4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektaufgaben wurden in der Verantwortung von den Projektpartnern Fraunhofer IKTS und der ATG GmbH realisiert. Die projektbezogene inhaltliche Arbeitsteilung resultierte aus den spezifischen Kompetenzen der Projektpartner.

Die zur Erfüllung der Projektzielstellung erforderlichen verfahrenstechnischen Aufgaben wurden durch das Fraunhofer IKTS übernommen. Durch die zusätzliche Einbeziehung der Kompetenzen und des langjährigen Know-hows der UAN IWE GmbH und der Biogastechnology V.B.T.S. GmbH & Co. KG bei der Planung und Betreuung großtechnischer Anlagen im Bereich der Abwasser- und Schlammbehandlung und der Biogaserzeugung konnte einerseits der erforderliche Aufwand zur Erfüllung der gestellten Aufgaben minimiert werden. Andererseits wurde durch die Einbeziehung der genannten UAN die Sicherheit für einen voll funktionstüchtigen Anlagenbetrieb erhöht.

In Abhängigkeit der jeweiligen Projektphase erfolgte die Bearbeitung der Arbeitspakete 1.1 – 1.3 durch die in Abb. 6 ausgewiesenen Partner.

	Projektphase 1	Projektphase 2	Projektphase 3
AP 1.1	IKTS	--	--
AP 1.2	IKTS/IWE/V.B.T.S.	IKTS/IWE	--
AP 1.3	IKTS/IWE/V.B.T.S.	IKTS/IWE	IKTS/IWE

Abb. 6 Bearbeitung der Arbeitspakete 1.1 bis 1.3

Die IWE mbH war weiterhin maßgeblich an der Erfüllung genehmigungsrechtlicher Belange für die Errichtung und den Betrieb der Pilot-Biogasanlage beteiligt.

Die Verantwortung der ATG GmbH lag bei der technischen Vorbereitung zur Errichtung und dem Betrieb der Pilot-Biogasanlage. Zur Erstellung des Bauantrages wurde das Bauplanungsbüro Dipl.-Ing. Christian Suhr als bauvorlageberechtigter Ingenieur in die Bearbeitung des Arbeitspaketes 2.4 einbezogen. Die IWE mbH unterstützte mit der Grundlagenbearbeitung für die Erstellung der Antragsdokumente.

5 Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn der Projektbearbeitung

5.1 Einfluss der Reaktorgeometrie auf den Mischprozess und die Biogasausbeute

Neben einer optimalen Substratauswahl und -vorbehandlung hat vor allem die im Fermenter ablaufende Durchmischung einen entscheidenden Einfluss auf den entstehenden Gasanfall. Im praktischen Betrieb werden zur Umsetzung dieser Anforderungen hohe energetische Aufwendungen betrieben. Beispielsweise beträgt der Eigenstrombedarf für Mischprozesse innerhalb des Gesamtverfahrens zur Biogaserzeugung bis zu 55 % des Eigenstrombedarfs von Biogasanlagen. Trotz des hohen Energieaufwandes werden die verfahrenstechnischen Zielstellungen, das heißt ein homogen durchmischter Reaktor oftmals nur begrenzt erreicht. Toträume und die Ausbildung von Sink- und Schwimmschichten verhindern vor allem bei geänderten Substrateigenschaften (Wechsel der Inputstoffe) eine effiziente Biogaserzeugung.

Als Ursachen für dieses unzureichende Prozessergebnis sind neben falsch ausgewählten Rührertypen vor allem verfahrenstechnisch ungünstige Reaktorgeometrien zu nennen. Besonders kritisch sind insbesondere die in der Biogastechnik verbreitet anzutreffenden breiten Reaktoren mit geringer Reaktorhöhe. Aus verfahrenstechnischer Sicht (ZLOKARNIK 1999) gestalten sich Rührprozesse optimal, wenn das aus Reaktorhöhe H zu Reaktordurchmesser D gebildete Schlankheitsverhältnis $H/D = 1$ ist. Für $H/D < 1$ reduziert sich der Stofffluss proportional mit kleiner werdendem Schlankheitsverhältnis: $F \propto (H/D)^{1/3}$. Andererseits wächst bei $H/D > 1$ die zur Erzielung ausreichender Mischgüten erforderliche Mischzeit (ZLOKARNIK 1967).

Mit dem Arbeitsbericht der IWE mbH zum Verbundvorhaben »Ovales Reaktorsystem« (SMWK 1.00116914), wurden die Anforderungen einer optimierten Strömungsführung innerhalb ovaler Reaktorsysteme, an die bautechnische Reaktorgestaltung sowie die geeignete Misch- und Strömungsleittechnik und Energieeffizienz erarbeitet und dargestellt (IWE 2012). Die von STOWASSER BAU GMBH (2007) entwickelte neue Schalungsbauweise schafft die Voraussetzungen für eine verfahrenstechnisch verbesserte Reaktorgeometrie. Mit der entwickelten Schalungstechnologie lassen sich kostengünstig Fermenter mit einem Reaktorschlankheitsgrad bis zu 0,7 errichten. Durch die zusätzliche Entwicklung eines selbstverdichtenden Stahlfaserbetons (STOWASSER BAU GMBH, 2011) kann weiterhin der Stahleinsatz im Reaktorbau ohne Beeinträchtigung der Reaktorstatik drastisch reduziert werden. Die bisherige Anwendung dieser Entwicklungen bei Rundbehältern bestätigte die prognostizierten wirtschaftlichen Vorteile dieser Bauweisen im Vergleich zur traditionellen Vorgehensweise.

Auf der Basis der am FRAUNHOFER IKTS (2011 und 2012a) mittels Prozess-Tomographie durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das aktiv durchmischte Volumen von zylindrischen Biogasreaktoren zwischen 60 und 95 % beträgt, wobei bessere Mischgüten mit steigendem Schlankheitsgrad erzielt wurden. Bei den Untersuchungen variierte der Reaktorschlankheitsgrad zwischen dem üblicherweise anzutreffenden Schlankheitsgrad von 0,46 und dem als verfahrenstechnisch günstigem Verhältnis von 1,0. Nachteilig ist, dass in der Praxis oft nur Reaktoren mit eingeschränkter Bauhöhe und somit geringem Schlankheitsgrad errichtet werden können.

Eine kostengünstige Umsetzung der aus verfahrenstechnischer Sicht anzustrebenden Reaktorgeometrien (Schlankheitsgrad $> 0,7$) wird durch den Einsatz ovaler Reaktoren mit integrierten Trennwänden gesehen. Die Nutzung von Kenntnissen aus der Abwasserbehandlung zeigt sich hier als besonders vorteilhaft (Rundbecken mit Zonenabtrennung).

Mit der Zielstellung, Fermenter in vorgefertigter, standardisierter Modulbauweise zu nutzen, wurden langgestreckte, eckige Biogasreaktoren erstmalig von BÜRGER (2010) vorgestellt. Diese in Metallbauweise gefertigten Reaktoren verfügen über eine, in der Reaktormitte angeordnete Trennwand. Entsprechend vorliegender Informationen ist die Reaktorfüllhöhe bei diesem System auf 4,0 m beschränkt, so dass der angestrebte hohe Reaktorschlankheitsgrad nur bedingt erreicht werden kann.

Aus der Abwasserbehandlung sind ovale Reaktoren mit Trennwand als Umlaufbecken bekannt. Als Vorteile dieser Umlaufbecken sind unter anderem ein kaskadenförmiger Substratabbau (KUBIN 2004) und das Vermeiden von Kurzschlussströmungen (FREY 2010) hervorzuheben. Diese, in traditioneller Betonbauweise errichteten Reaktoren weisen in der Regel Reaktorhöhen von 5 m auf (HELLMANN UND RIEGLER, 2003). In Ausnahmefällen werden Beckentiefen bis zu 8 m erreicht (OTT SYSTEM GMBH, 2012), wofür jedoch bisher aufwendige Fertigungsverfahren angewendet werden müssen.

Untersuchungen des FRAUNHOFER IKTS (2013) bestätigten den Vorteil ovaler Reaktoren auf die Ausbildung geeigneter Strömungsprofile.

Abb. 7 stellt die Ergebnisse numerischer Strömungssimulationen von Reaktoren gleicher Bauhöhe und gleichem Volumen für Gärsubstrate mit gleichem Fließverhalten gegenüber. Trotz Einsatz von zwei Tauchmotorrührwerken mit einer Umfangsgeschwindigkeit von jeweils $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wird die Maissilage im zylindrischen Reaktor nur unmittelbar in der Röhrebene ausreichend eingemischt.

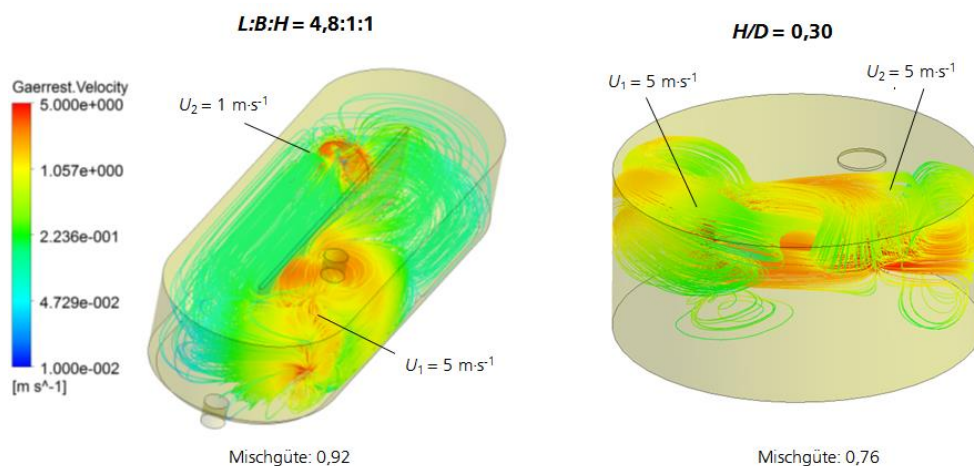


Abb. 7 Vergleich der Ausbildung des Strömungsprofils in einem ovalen bzw. zylindrischen Reaktor (Reaktorvolumen jeweils 1.100 m^3 ; Fluidhöhe 5 m)

Dagegen wird im ovalen System bereits mit einer Rührerumfangsgeschwindigkeit von $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in weiten Teilen des Reaktors eine Strömungsgeschwindigkeit von $> 0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ erzielt. Die bei Einsatz von zylindrischen Reaktoren mit geringem Schlankheitsgrad bekannte Ausbildung von Totzonen wird bei diesem Reaktor/Rührer-System vermieden.

Der zu erkennende Wechsel zwischen intensiv und weniger intensiv durchmischten Bereichen wirkt sich dabei positiv auf den Biogasbildungsprozess aus (FRAUNHOFER IKTS, 2012b). Untersuchungen zum Einfluss der Rührintensität auf den Biogasbildungsprozess haben gezeigt, dass eine Ruhephase nach erfolgter intensiver Substrateinmischung die Mikroorganismen positiv beeinflusst und so zu einer gesteigerten Biogasausbeute führt.

Vorgenommene Optimierungen (FRAUNHOFER IKTS 2013) wurden vor allem unter dem Gesichtspunkt der Reduzierung von Baukosten vorgenommen. Zur Minimierung vorzunehmender Tiefbauarbeiten wurde die Reaktorhöhe auf 6 m angehoben, was bei einem Reaktornutzvolumen von 1.100 m³ zu einer Reduzierung der Grundfläche um 17 % führt. Unter Einhaltung des Verhältnisses zwischen Gerinnebreite und Reaktorhöhe von 1:1 stellte sich für den betrachteten Fall das Verhältnis der geometrischen Hauptabmessungen zu $L:B:H = 3,2:1:1$ ein. Die Reduzierung der Reaktorlänge führte zu einem Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten in den Reaktorrandbereichen (siehe Abb. 8). Unter Ansatz oben genannter Vorteile des Wechsels von stärker und schwach durchmischten Bereichen sind die sich bauseitig abzeichnende Vorteile zurückzustellen.

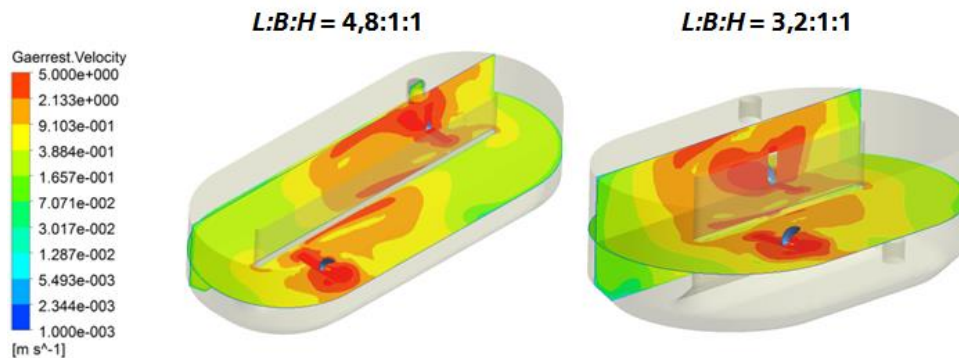


Abb. 8 Einfluss der Reaktorlänge auf die Ausbildung des Strömungsprofils (Rührerumfangsgeschwindigkeit jeweils 5 m·s⁻¹)

Mittels prozesstomographischer Untersuchungen (FRAUNHOFER IKTS, 2013) wurde das Einmischen von angemaischem Stroh in eine mit Weizenschrot angereicherte Polymerlösung (Xanthan/Wasser-Gemisch) bewertet. Diese Modellsuspension verkörpert den in großtechnischen Biogasanlagen bei 40 °C anzutreffenden Fermenterinhalt und weist ein vergleichbares Fließverhalten auf. Gleichzeitig wurde durch Einsatz der geschroteten Weizenkörner die geometrische Ähnlichkeit der partikulären Bestandteile des Reaktorinhaltes zur großtechnischen Anlage eingehalten.

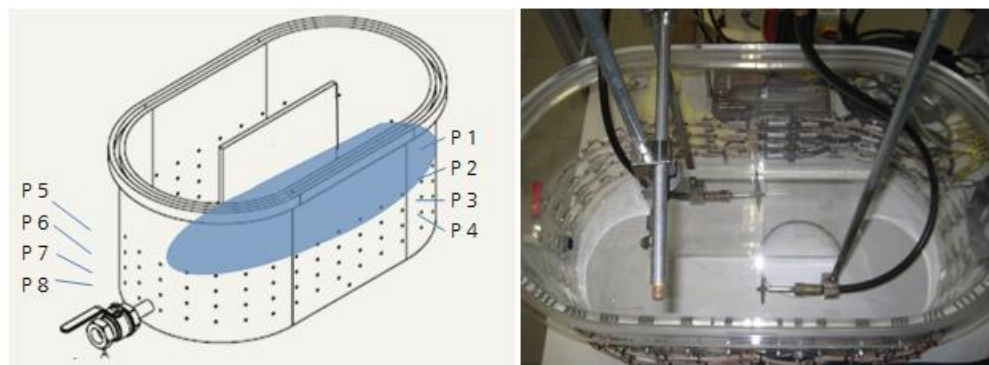


Abb. 9 Konzipiertes Reaktormodell mit den Messebenen P1 – P8 (links) und realisierter Versuchstand zur Prozess-Tomographie

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigten die Vorteile der ovalen Reaktorgeometrie auf die Ausbildung verbesserter Durchmischungen. Die in Abb. 10 dargestellten Tomogramme weisen auf eine relativ homogene Verteilung der dispersen Phase innerhalb des Reaktors hin. Als Mischgüte wurden 0,94 ermittelt, was im Vergleich zu zylindrischen Reaktoren eine Verbesserung um 10 – 25 % bedeutet.

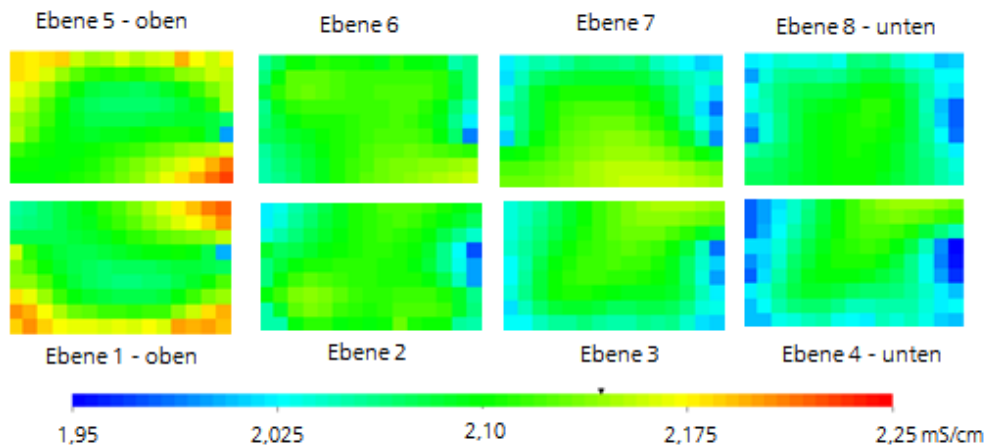


Abb. 10 Tomogramme zum Einmischen von Stroh/Xanthan in eine Xanthan/Schrot-Suspension (Frame 3500) bei außermittiger Anordnung der Rührer

Die aus einer Verbesserung der Mischgüte beispielsweise von 0,75 auf 0,95 resultierende Reduzierung der effektiven Raumbelastung führt nach NAEVE (2007) zu einer Steigerung der Biogasausbeute um circa 25 %. Ähnliche Aussagen wurden durch MAEHNERT (2007) zum Einfluss der Raumbelastung auf die Biogasausbeute getroffen. Untersuchungen am FRAUNHOFER IKTS (2011) zeigten ebenfalls den Einfluss der organischen Raumbelastung auf den Methanertrag und lieferten an einer Pilotbiogasanlage vergleichbare Ergebnisse.

Für die Effektivität des Biogasprozesses sind die Intensität (Stoffaustausch) sowie die Länge (Verweilzeit) des Kontaktes zwischen Substrat und der mikrobiellen Population entscheidend. Sie sind vorrangig eine Funktion des fluiddynamischen Regimes, also des Mischzustands in den Reaktoren (KARIM 2005). Erste Untersuchungen (FRAUNHOFER IKTS 2012b) zur Ableitung von Grenzwertigkeiten für eine optimale Biogasbildung haben gezeigt, dass eine Strömungsgeschwindigkeit von $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in weiten Teilen des Reaktors eingehalten werden sollte. Eine Bestätigung dieser Aussage ist durch weitere Versuche, vor allem auch im großtechnischen Maßstab abzusichern.

5.2 Maßstabsübertragung von Mischprozessen

Zielstellungen der Maßstabsübertragung sind die Nachstellung der Strömungsverhältnisse des großtechnischen Rührreaktors sowie die Ausbildung vergleichbarer Geschwindigkeitsverteilungen in der Modell- und Hauptausführung. Neben der Berücksichtigung der geometrischen Ähnlichkeit zwischen Modell M und großtechnischer Anlage (Hauptausführung H) wird das Einhalten gleicher Betriebsbedingungen erforderlich. Ausgehend von den Betrachtungen von BÜCHE (1937) galt das Kriterium einer konstanten volumenspezifischen Rührleistung lange Zeit als Grundlage für die Übertragung der Betriebsparameter zwischen Modell und großtechnischer Hauptausführung. Ausgehend von diesem Ansatz und der dazu von MERSMANN, EINENKEL UND KÄPPLER (1975) ermittelten Beziehung für das Verhältnis der Rührerumfangsgeschwindigkeiten zwischen Modell und Hauptausführung kann die Rührerumfangsgeschwindigkeit des Modells ermittelt werden. Darauf aufbauende experimentelle Bestimmungen des spezifischen Leistungsbedarfs ergaben Werte von circa $100 \text{ W}/\text{m}^3$ (FRAUNHOFER IKTS 2012a). Eine Übertragung auf den großtechnischen Bereich mit den für Biogasanlagen typischen Reaktorvolumina von 2.500 m^3 würde eine Rührerleistung bis 250 kW erfordern, was aus ökonomischen Gründen nicht zu rechtfertigen ist. Das heißt, dass diese weit verbreiteten Kriterien zur Maßstabsübertragung nicht zur Anwendung kommen können.

Die Anwendung des weiterhin aus der Strömungsmechanik bekannten Kriteriums gleicher Rührer-Reynolds-Zahlen (EKATO 2000) scheitert an der Tatsache, dass im Modell

höhere Rührerumfangsgeschwindigkeiten erforderlich werden, die bei nicht-Newton'schen Fluiden wiederum eine nicht zu quantifizierende Beeinflussung des Fließverhaltens hervorrufen. Die Forderung gleicher Strömungsverhältnisse in Modell und Hauptausführung wird nicht erfüllt.

Das im Rahmen der Projektarbeiten (FNR 22011611) genutzte Kriterium gleicher Rührerumfangsgeschwindigkeiten basiert auf einer von DECKER (2005) getroffenen Feststellung, dass sich bei Reynolds-Zahlen > 1 beim Umströmen der Partikel Wirbel ausbilden, die den Widerstand erhöhen und zu einer Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit beitragen, wobei die sich ausbildende Geschwindigkeitsänderung von der vorhandenen Partikelgröße bestimmt wird. Bei zusätzlicher Übertragung der für den Rührreaktor vorgenommenen geometrischen Skalierung auf die zu vermischende disperse Phase ergeben sich somit für das resultierende Schergefälle, das heißt für die aus der Widerstandskraft des Partikels hervorgerufene Geschwindigkeitsänderung im Modell und der großtechnischen Ausführung vergleichbare Verhältnisse (FRAUNHOFER IKTS 2011). Daraus wurde postuliert, dass für Stoffsysteme mit gleichem viskosem Verhalten in geometrisch ähnlichen Reaktoren gleiche Strömungsverhältnisse vorliegen. Eine Überprüfung des aufgestellten Kriteriums ist jedoch an die Durchführung experimenteller Untersuchungen in unterschiedlichen Maßstäben gebunden.

5.3 Substratvorbehandlung für den Einsatz lignozellulosehaltiger Substrate zur Biogaserzeugung

Für einen möglichst störungsfreien Einsatz von langfaserigen Substraten und insbesondere Stroh in Biogasanlagen (Nassvergärung) ist eine substratangepasste Vorbehandlung notwendig. Für eine effektive Ausnutzung der katalytischen Leistungsfähigkeit der anaeroben Mikroorganismen ist neben der optimalen Einstellung der Reaktionsbedingungen eine möglichst große Kontakthäufigkeit zwischen Enzym und Zielsubstrat zu gewährleisten. In der Offenlegung DE 198 45 207 A1 wird auf die Bedeutung des Kontaktes zwischen Enzym und zum Teil hydrophoben Substraten hingewiesen, wobei als Lösungsvorschlag der Einsatz oberflächenaktiver Substanzen angegeben wird.

Typischerweise werden jedoch physikalische (mechanisch, thermisch), biologische und chemische Vorbehandlungstechniken eingesetzt, um die von einer Ligninschicht vor dem Abbau im Fermenter geschützte Cellulose und Hemizellulose dem mikrobiellen Abbau zugänglich zu machen (ALVIRA et. al. 2010). Weiterhin sollte die Oberfläche für einen potenziellen enzymatischen Angriff deutlich erhöht werden. Andernfalls beträgt die Eindringtiefe von Enzymen für Lignozellulose nur 1 - 2 mm (PALATINUS et. al. 2007).

Laut SCHWARZ et al. (2011) ist die Notwendigkeit einer Substratvorbehandlungsstufe objekt- und substratkonkret zu bewerten. Empfehlenswert ist eine Anwendung bei biogenen Reststoffen mit erhöhtem Verholungsgrad wie z.B. Landschaftspflegematerial sowie für langfaserige Materialien wie z.B. Grassilage. Unabhängig von der Substratart kann für Anlagen mit Problemen bei der Substratmischung oder dem Substrattransport eine gezielte Vorbehandlung ebenfalls deutliche Verbesserungen bezüglich der Wirtschaftlichkeit erreichen. Abb. 11 zeigt die Möglichkeiten der Substratvorbehandlung für Biogassubstrate auf.

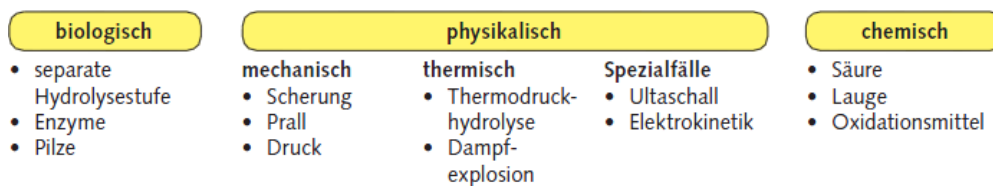


Abb. 11 Prinzipielle Möglichkeiten der Substratvorbehandlung (SCHWARZ et. al 2011)

Das Zerkleinerungsprinzip der Extrusion stellt nach gegenwärtigem Erkenntnisstand die robusteste und effektivste Technologie zur mechanischen Vorbehandlung von biogenen Substraten dar (FRAUNHOFER IKTS 2007). Mit Hilfe der Bioextrusion von Weizenstroh gelangen in Untersuchungen des IKTS Steigerungsraten von 20 % für die spezifische Biogasproduktion (FRIEDRICH et al. 2010).

Untersuchungen am Fraunhofer IKTS mittels Prozess-Tomographie (JOBST et al. 2012; JOBST et al. 2011; DEUTSCHMANN et al. 2012; LOMTSCHER et al. 2011) konnten eindeutig die Vorteile der Substratvorbehandlung auf den Mischprozess zeigen.

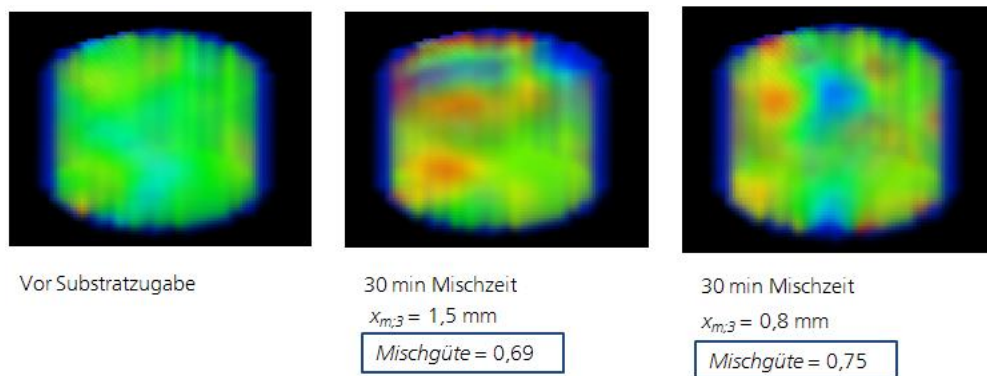


Abb. 12 Einsatz der Prozess-Tomographie zum Nachweis der Verbesserung der Mischgüte durch Substratzerkleinerung

Im Rahmen eines weiteren Projektes (FRAUNHOFER IKTS 2012) konnte mit Hilfe der Prozess-Tomografie nachgewiesen werden, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen dem granulometrischen Zustand und dem Fließverhalten gibt. Durch eine Substratvorbehandlung wird die Viskosität der eingesetzten Gärsubstrate deutlich verringert, so dass Stofftransport- und Stoffaustauschprozesse verbessert werden (FRAUNHOFER IKTS 2012).

5.4 Online Messtechnik

Zur Online-Bewertung der Dynamik der biologischen Prozesse in der Biogastechnologie werden bislang keine Systeme verbreitet eingesetzt. Als Stand der Technik kommen vorwiegend Systeme zur Überwachung der Gaszusammensetzung zum Einsatz. Aufgrund deren Charakteristika (v.a. elektrochemische Sensoren) werden dahingehende Messungen allerdings häufig nur semikontinuierlich (ein bis mehrmals täglich) durchgeführt. Innerhalb der Gärsuspension werden bislang nur Parameter zur Überwachung der Prozessstabilität erfasst (bspw. pH-Wert, Redoxpotenzial, Temperatur), welche nur bedingt Aussagen zur spezifischen Dynamik der mikrobiellen Abbaureaktion zulassen (IWE, 2013).

Messtechnische Systeme zur Online Beurteilung der Dynamik des Fermentationsprozesses innerhalb der Gärsuspension sind potentiell verfügbar, wobei für die spezifischen Einsatzanforderungen und die Langzeitstabilität nur begrenzte Erfahrungen vorliegen. Besonders die Nahinfrarotspektroskopie stellt eine vielversprechende Systemlösung dar, mit welcher ein Großteil der relevanten Parameter (bspw. org. Säuren, FOS/TAC, etc.) erfasst werden kann. Allerdings ist der Aufwand zur Kalibration recht hoch, wobei nur wenige Anbieter bereits über entsprechende Datenbanksysteme für Gärsubstrate der Biogasgewinnung verfügen, auf welchen aufgebaut werden kann. Ein weiteres messtechnisches System zur Online Beurteilung der Gärsuspension ist die Erfassung des Gelöst- H_2 , über ein extraktives Messverfahren, welches an eine gaschromatographische Bestimmung gekoppelt ist (IWE, 2013).

5.5 Einsatz von Kunststoff für den Reaktorbau

Thermoplastische Kunststoffe sind seit Jahrzehnten in der chemischen Industrie im Einsatz und werden als Behälter zur Lagerung von Flüssigkeiten eingesetzt. Der große Vorteil von thermoplastischen Kunststoffen ist die hohe Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit. Abhängig von den mechanischen Anforderungen können Anlagenteile dabei in Vollthermoplast- oder alternativ in Verbundbauweise mit einem glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK) oder Stahl als Trägermaterial hergestellt werden (THYSSENKRUPP 2015).

Absolute Beständigkeit gegen innere und äußere Einflüsse machen Fiberglas-Behälter universell einsetzbar. Von großen Tanklagern mit Durchmessern bis zu 8.000 mm und 800 m³ Inhalt bis zu kleineren Behältern für alle Industriezweige: Druckfestigkeit und Robustheit machen Fiberglass-Behälter zu attraktiven Komponenten im Anlagen- und Kraftwerksbau. GFK-Behälter sind für alle Betriebsstoffe ideale Aufbewahrungstanks: von voll entsalztem Wasser über Späne, Suspensionen, Lösungen und Säuren bis hin zu Rauchgasen. Die unempfindlichen Oberflächen lassen sich einfach reinigen. Die Behälter sind korrosionsfest, leicht und schnell montiert sowie besonders langlebig (FIBERPIPE 2015).

Ausgehend von den genannten Vorzügen sollte der Einsatz für Biogasanlagen aus technologischer und wirtschaftlicher Sicht überprüft werden.

5.6 Projektrelevante Ergebnisse Dritter während der bisherigen Bearbeitung des Verbundvorhabens (Phasen 1 und 2)

Während der Bearbeitung der Projektphasen 1 und 2 wurde ein Gebrauchsmuster (DE 20 2008 017 612 U1) bekannt, dessen Merkmale im Wesentlichen in einer »ringförmigen langgestreckten umlaufenden Endlos-Kanalstruktur des Langfermenters« bestehen. Die von IKTS vorgenommene patentrechtliche Überprüfung (RAUPAT, 2014) ergab, dass mit der Errichtung einer Versuchsanlage noch keine patentgemäße Benutzungshandlung für das Gebrauchsmuster besteht und die geplante ovale Reaktorgeometrie innerhalb des Forschungsprojektes uneingeschränkt umgesetzt werden kann. Im Hinblick auf eine spätere wirtschaftliche Nutzung der Projektergebnisse durch den Projektpartner ATG GmbH sollten jedoch im Projekt Lösungen ermittelt werden, die eine Abgrenzung zum Schutzzumfang des Gebrauchsmusters zulassen. Eine Möglichkeit dazu bot die Errichtung des Reaktors in oktogonaler Bauweise (siehe Abb. 13). Die Vorzüge der Umlauf-Kanalstruktur bleiben in jedem Fall erhalten. Der Einfluss der Reaktorgeometrie auf das sich im Reaktor ausbildende Geschwindigkeitsprofil ist ebenfalls Abb. 13 zu entnehmen. Durchgeführte Rechnungen mittels numerischer Strömungssimulation ergaben bei gleichen Prozessbedingungen, d. h., gleichen Substrateigenschaften und gleichen Rührerumfangsgeschwindigkeiten vergleichbare Strömungsprofile. Entsprechend früherer Untersuchungen (FRAUNHOFER IKTS, 2013a) beeinflussen Strömungsgeschwindigkeiten von circa $7 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ positiv den Stofftransportprozess. Diese Bedingung wird von beiden Reaktortypen in weiten Bereichen des Reaktors eingehalten. Die bei der oktogonalen Bauform geringfügig vorhandene Ausbildung von Totzonen bzw. auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten $< 1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ sollte durch eine Optimierung der Rührerpositionierung (Veränderung des Anstellwinkels) und geometrische Anpassungen der oktogonalen Bauform reduziert werden.

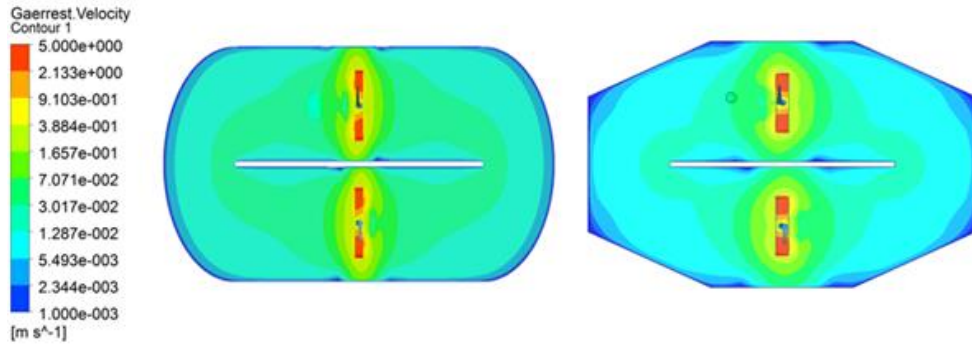


Abb. 13 Geschwindigkeitsverteilung im Reaktor für strukturviskose Gärsubstrate ($K = 7 \text{ Pa}\cdot\text{s}^m$; $m = 0,5$) und Rührerumfangsgeschwindigkeiten von $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

.....
 Darstellung der
 wissenschaftlichen und
 technischen Ergebnisse

Besonders bei der Errichtung der Reaktoren in Metallbauweise versprach die eckige Bauform fertigungstechnische Vorteile und sollte daher innerhalb der weiteren Projektbearbeitung getestet werden.

6 Darstellung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse

Wie bereits dargestellt, untergliederte sich das Gesamtvorhaben in drei Projektphasen. Neben der Anlagengröße unterscheiden sich die Anlagen bezüglich der geplanten Bauweise. Unter Beachtung der gegebenen Besonderheiten der Errichtung aus Stahlfaserbeton sollte innerhalb der Projektphase 1 die Modell- und Demonstrationsanlage als Reaktor-in-Reaktor errichtet werden (Abb. 15). Infolge vorhandener Unsicherheiten nach Einführung des EEG 2014 konnte die geplante Errichtung der Modell- und Demonstrationsanlage nicht vorgenommen werden.

Unter Beachtung der möglichen Verwertung der Projektergebnisse stand in den Projektphasen 2 und 3 der mobile Anlagencharakter im Vordergrund. Die Anlagengröße und Reaktorgestaltung wurde daher in Anlehnung der Größen handelsüblicher Container vorgenommen. Unter Beachtung der gegebenen Containermaße konnten die Pilotanlagen nicht in einer Reaktor-in-Reaktor-Bauweise errichtet werden. Hauptfermenter (HF) und Nachfermenter (NF) wurden daher als separate Reaktoren ausgebildet. Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der in den drei Projektphasen geplanten Biogasanlagen werden in folgender Übersicht zusammengestellt. Die in der Projektphase 1 geplante Reaktor-in-Reaktor-Bauweise veranschaulicht Abb. 15. Die schematische Anordnung der Reaktoren der geplanten Pilotanlagen innerhalb der Projektphasen 2 und 3 wurde bereits in Abb. 3 dargestellt.

	Projektphase 1	Projektphase 2	Projektphase 3
Anlagentyp	Großtechnische Modell- und Demonstrationsanlage	Pilotanlage	Pilotanlage
Anlagengröße	500 kW _{el}	10 kW _{el}	4 kW _{el}
Bauweise	Stationär Reaktor in Reaktor	Mobile Container- anlage	Mobile Container- anlage
Reaktorgeometrie	Ovale Umlaufbecken	HF: ovales Umlauf- becken; NF: Umlaufbecken in Oktaederform	HF: ovales Umlauf- becken; NF: Umlaufbecken in Oktaederform
Bauart HF	Stahlfaserbeton	Sandwich-Leichtbe- ton	Stahlbau
Bauart NF	Stahlfaserbeton	Stahlbau	Stahlbau
Nutzvolumen HF	1.700 m ³	9 m ³	6 m ³
Nutzvolumen NF	2.700 m ³	30 m ³	12 m ³

Abb. 14 Geplante Biogasanlagen innerhalb der drei Projektphasen

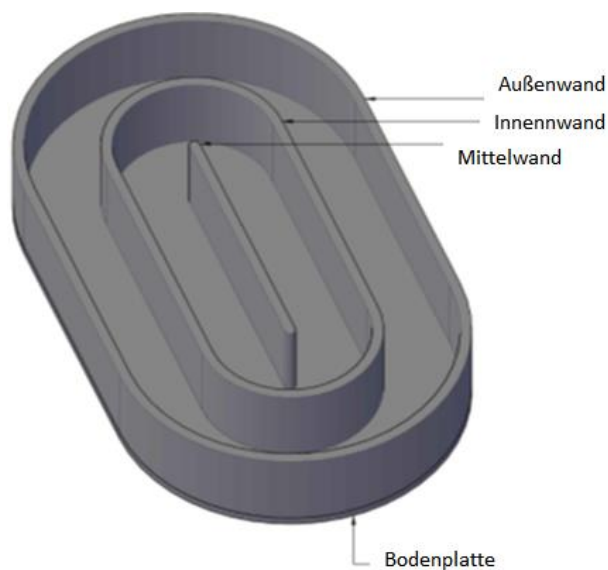


Abb. 15 Reaktor-in-Reaktor-System der geplanten Modell- und Demonstrationsanlage (Quelle: IWE mbH)

Im Rahmen der folgenden Ergebniszusammenstellung werden schwerpunktmäßig die Ergebnisse der Projektphase 3 vorgestellt. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse und aus Gründen einer möglichen Vergleichbarkeit stationärer und mobiler Biogasanlagen werden relevante Ergebnisse aus der Projektphase 1 in diesen Bericht mit aufgenommen.

6.1 Vorbereitung der entwickelten Innovationen zur Überführung in den Praxisbetrieb

6.1.1 Erarbeitung von Kennziffern zur verfahrenstechnischen Maßstabsübertragung (Arbeitspaket 1.1)

Auf der Basis zu erarbeitender Kennziffern waren die bisher im kleintechnischen und Pilotmaßstab ermittelten Anlagen- und Prozessgrößen (FRAUNHOFER IKTS 2013) in den großtechnischen Maßstab zu transferieren.

Zur Maßstabsübertragung mussten die in der Fluidodynamik geltenden Ähnlichkeitsgesetze berücksichtigt werden. Neben einer geometrischen Ähnlichkeit sind die kinematische und die dynamische Ähnlichkeit zwischen Modell (M) und Hauptausführung (H) zu beachten.

Erste grundlegende Voraussetzung für ein Scale-down bzw. ein Scale-up ist die geometrische Ähnlichkeit zwischen Modell und Hauptausführung. Zur Erfüllung der geometrischen Ähnlichkeit müssen alle Abmessungen L der betrachteten Reaktoren und der eingesetzten Rührer im Modellmaßstab (M) im festen Verhältnis mit den Abmessungen der Hauptausführung (H) stehen und eine konstante Maßstabszahl M_L bilden.

Gleichung 1
$$M_L = \frac{L_H}{L_M} = konst.$$

Unter Ansatz der im Pilotmaßstab mittels Prozess-Tomographie und numerischer Strömungssimulation erzielten Ergebnisse zum Einfluss der Reaktorgeometrie auf das sich ausbildende Strömungsprofil (FRAUNHOFER IKTS 2013) wurde die Reaktorgeometrie abgeleitet. In Abstimmung mit den Projektpartnern konnten daraufhin die Hauptabmessungen des Reaktors wie folgt festgelegt werden

$$L:B:H = 5,6 : 1 : 1,$$

wobei L die Reaktorlänge, B die Gerinnebreite und H die Fluidhöhe bezeichnet.

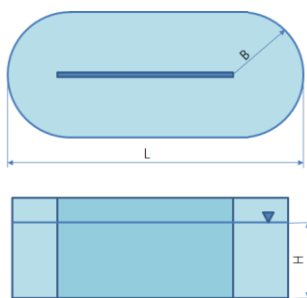


Abb. 16 Hauptabmessungen des Reaktorsystems

Die kinematische Ähnlichkeit fordert eine Ähnlichkeit des Strömungsfeldes in Modell und Hauptausführung. Kinematische Ähnlichkeit liegt vor, wenn Zeitintervalle t , in denen Partikel geometrisch ähnliche Strecken zurücklegen, in einem konstanten Verhältnis M_t stehen.

Gleichung 2
$$M_t = \frac{t_H}{t_M} = konst.$$

Die dynamische Ähnlichkeit ist der geometrischen und kinematischen Ähnlichkeit übergeordnet und beschreibt die Ähnlichkeit der im Modell und der Hauptausführung wirkenden Kräfte F . Für die Bedingungen der vollen dynamischen Ähnlichkeit zwischen Modell und Hauptausführung müssen die Maßstabszahlen aller Kräftearten M_F gleich sein. Eine volle dynamische Ähnlichkeit ist nur für $M_L = 1$ erreichbar und damit in der Praxis selten realisierbar (HILLEBRAND 2008).

Da eine vollständige Ähnlichkeit fluiddynamischer Prozesse zwischen Modell (M) und großtechnischer Hauptausführung (H) praktisch nicht erreicht werden kann, muss eine Maßstabsübertragung auf prozessrelevante Parameter beschränkt werden. Unter der Voraussetzung, dass die Partikel im Modell und der Hauptausführung der gleichen Scherströmung ausgesetzt sind, wird die Nutzung gleicher Rührerumfangsgeschwindigkeiten in Modell und Hauptausführung sinnvoll. Das bedeutet, dass das gebildete Produkt aus Rührerdrehzahl n und Rührerdurchmesser d in den zu betrachtenden Maßstäben als konstant anzusetzen ist.

Gleichung 3
$$n_H \cdot d_H = n_M \cdot d_M.$$

Das beste Rührergebnis im Pilotmaßstab wurde mit axialfördernden Propellerrührern bei einer Umfangsgeschwindigkeit von $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ erzielt. Eingesetzt wurden zwei mittig angeordnete Propeller (FRAUNHOFER IKTS 2013). Für den großtechnischen Einsatz wurden langsam laufende Propellerrührer ausgewählt, wobei der Rührerdurchmesser analog der Reaktorgeometrie durch die Geometrie Kennzahl M_L bestimmt wird.

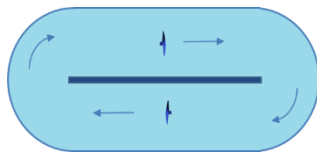


Abb. 17 Anordnung der Rührer im Reaktor

Unter Nutzung der hier dargestellten Kenngrößen wurde im Arbeitspaket 1.3 die Erstbemessung der Modell- und Demonstrationsanlage vorgenommen. Die abgeleiteten Kenngrößen dienen ebenfalls zur Auslegung der Rühr- und Reaktortechnik in den Projektphasen 2 und 3.

6.1.2 Einsatzvorbereitung prozessbegleitender Messtechnik (Arbeitspaket 1.2)

6.1.2.1 Messtechnik zur Prozessüberwachung

Notwendige Messwerterfassung

Zur Prozessüberwachung und Bilanzierung im Rahmen des Projektes waren folgende Parameter bzw. Betriebszustände zu erfassen und schriftlich und/oder digital zu dokumentieren (IWE 2016):

- Tägliche Mengenerfassung der Inputsubstrate (Grassilage, Rezirkulat, Überschuss Dünnstoff, Dickstoff mittels Wägung bzw. Füllstandskontrolle).
- Kontinuierliche Gasvolumenstrommessung (Trommelgaszähler Fa: Ritter) der abgehenden Gasleitungen der Behälter, incl. Datenaufzeichnung (Haupt-/Nachfermenter).
- Tägliche Füllstandsmessung der Behälter (Anmischbehälter, Haupt-/Nachfermenter).
- Kontinuierliche Temperaturmessung (Messfühler in Suspension und Wärmeübertrager/Behälterwand) in den Behältern, incl. Datenaufzeichnung (Anmischbehälter, Haupt-/Nachfermenter) sowie Signaleinbindung in die Steuerung der Reaktorbeheizung.

- Erfassung der Gasqualität, über Probenahme (Gasbeutel) an den Gasleitungen (Haupt-/Nachfermenter) und Analyse über EHEIM-Messgerät IKTS (Parameter CH₄, CO₂, H₂, O₂).
- Erfassung des pH-Wertes des Gärrestes, mit mobilem pH-Sensor IKTS.
- Erfassung der TR-Gehalte der Grassilage und der Gärreste über Probenahme und Laboranalyse IKTS.
- Erfassung der oTR-Gehalte der Grassilage und Gärreste über Probenahme (Probebeutel) und Laboranalyse IKTS.
- Täglich-kontinuierliche Erfassung der Betriebszustände und zeitkonkreten Leistungsaufnahme der Bioextrusion (Leistungsmesser mit Datenaufzeichnung an Antriebsaggregaten).
- Kontinuierliche Erfassung der Betriebszustände und zeitkonkreten Leistungsaufnahme aller Rührwerke, incl. Datenaufzeichnung (Leistungsmesser mit Datenaufzeichnung an Antriebsaggregaten).
- Kontinuierliche Erfassung der Betriebszustände und zeitkonkreten Leistungsaufnahme der Gärrestseparation (Leistungsmesser mit Datenaufzeichnung an Antriebsaggregaten, während Versuchsdurchführung).

Bei Auswahl und Installation der messtechnischen Komponenten war darauf zu achten, dass eine Anbindung an die zentrale speicherprogrammierte Steuerung ermöglicht wird. Durch die SPS sind alle Daten und Messwerte für eine externe Auswertung zu speichern.

Einsatzbedingungen für die Messtechnik

- Bei Auswahl und Installation der messtechnischen Komponenten ist auf Zugänglichkeit von außen zu achten, um Aufwand bei Störungen oder Wartung zu minimieren.
- Messtechnischen Komponenten sind soweit möglich außerhalb von Ex-Schutz-Zonen zu installieren.
- Witterungsberührende messtechnische Komponenten haben eine Eignung für Umgebungstemperaturen von -20 bis +40 °C aufzuweisen.
- Messtechnische Komponenten, die frostfreie Bedingungen benötigen, sind innerhalb von Gebäuden oder witterungsgeschützt/temperierter Schutzkästen unterzubringen.
- Messtechnische Komponenten, die nicht innerhalb von Gebäuden oder witterungsgeschützter Schutzkästen installiert werden können, sind auf eine entsprechende Witterungsbeständigkeit zu prüfen.
- Medienberührende messtechnische Komponenten haben eine Eignung für Prozesstemperaturen von < 50 °C aufzuweisen.
- Vorliegende Gasdrücke < 5 mbar.

Messintervalle der separaten Online-Messtechnik

Die Messintervalle lagen nach Angaben des KSI-Meinsberg bei ca. 20 Minuten/Messung. Nach Vorlage des exakten Steuer- und Regelkonzeptes wäre eine zeitliche Adaption der Messwerterfassung an die Beschickungszyklen vorzunehmen.

Anforderungen der separaten Online-Messtechnik an das Steuer-/Regelsystem

Aufgrund der eigenständigen Steuereinheit der beigegebenen online – Messtechnik ergaben sich keine direkten Anforderungen an das Steuer- und Regelsystem der ATG während der durchzuführenden Messkampagne (KSI-Meinsberg). Für den Fall der dauerhaften Einbindung der innovativen Messtechnik in das Steuer und Regelkonzept, wären ent-

sprechende Signale/Anschlüsse vorzusehen. In Absprache mit dem Hersteller (KSI-Meinsberg), wäre ggf. eine Signalgabe/Ansteuerung der Extraktoren (v.a. Start Rührwerke) vorzusehen, um eine Beeinträchtigung der Messtechnik durch Druckschwankungen zu vermeiden.

6.1.2.2 Spezialmesstechnik zur Überwachung der Dynamik des Fermentationsprozesses

Auswahl möglicher Spezialmesstechnik

Das Ziel des Messtechnikeinsatzes innerhalb des Verbundprojektes lag vor allem in der prozessbegleitenden Überwachung der Dynamik des Fermentationsprozesses im ovalen Reaktorsystem. Demnach sollte eine Messtechnik zur Online-Analyse von grundlegenden Reaktionen des Substratabbaus, ablaufender Veränderungen der Biozönose sowie relevanter Suspensionseigenschaften (H₂, CO₂, CH₄, organische Säuren, FOS/TAC, TR, oTR, Viskosität) zum Einsatz kommen.

Es wurden die Nahinfrarot-Spektroskopie sowie Gelöst-Wasserstoff-Sensoren als geeignete messtechnische Systeme vorausgewählt. Mit entsprechender Anpassung der Messorte und -intervalle wäre der Einsatz sowohl in einer 500-kW_el-Biogasanlage als auch in den Pilot-Biogasanlagen möglich.

In Vorbereitung einer Messgeräteauswahl wurden mehrere Termine mit den Messgeräteherstellern zur Präsentation der Messtechnik durchgeführt. Neben Arbeitsbesprechungen und Demonstrationsmessungen mit den Geräteherstellern

- zur Gelöst-H₂-Messung (Kurt-Schwabe-Institut KSI Meinsberg) und
- NIRS-Technik (Fa. Bruker Optics GmbH)

im Fraunhofer IKTS wurde gemeinsam mit der IWE mbH eine Anlagen- und Messtechnik-Besichtigung im Biogaspark Bitterfeld durchgeführt. Auf dieser Biogasanlage wird die

- TENIRS-Messtechnik der Firma m-u-t GmbH

eingesetzt.

Im Folgenden sind die wesentlichen Vor- und Nachteile der Messsysteme zusammenfassend dargestellt.

Messverfahren	Vorteile	Nachteile
NIR	<ul style="list-style-type: none"> • sehr kurze Messdauer • hohe räumliche und zeitliche Auflösung <ul style="list-style-type: none"> • auch bei alternierender Messung nahezu Echtzeitabbildung • Vielzahl von Parametern erfassbar (bspw. FOS/TAC, TR/oTR, Säurespektrum (v.a. Essigsäure, Propionsäure), N/K/P/NH₄, CH₄/CO₂) <ul style="list-style-type: none"> • gute Rückschlüsse auf Dynamik Fermentationsprozess 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Kalibrierungsaufwand • hohe Kosten (Dauer) der Referenzanalysen <ul style="list-style-type: none"> • ggf. relative Fehler der Messwertfassung durch Rauschen der Spektren (v.a. bei geringen Stoff-Konzentrationen) • hohe Kosten Messtechnik <ul style="list-style-type: none"> • → Begrenzung Messstellen durch räumliche Nähe Messstelle – Probenahmeöffnung

**Mess-
verfah-
ren****Vorteile****Nachteile**

.....
Darstellung der
wissenschaftlichen und
technischen Ergebnisse
.....

Mess- verfah- ren	Vorteile	Nachteile
Gelöst- H₂	<ul style="list-style-type: none">• Mietoption zur Budgeteinhaltung	
	<ul style="list-style-type: none">• Dienstleistungsoption (Messkampagne KSI) zur Budgeteinhaltung• Anpassungserfordernisse (Messwerterfassung, Installation etc.) durch KSI gut umsetzbar• Parameter H₂, CH₄, O₂ erfassbar• ggf. Kamera zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit integrierbar	<ul style="list-style-type: none">• vergleichsweise lange Messintervalle• v.a. bei alternierender Messung, geringere Vergleichbarkeit zwischen Messstellen• wenige Parameter erfassbar• geringere Aussagekraft zur Dynamik des Fermentationsprozesses• Anfälligkeit gegenüber Druckänderungen (v. a. Rührwerke)

Abb. 18 Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der Messsysteme (IWE 2014)

Aufgrund der hohen Aufwendungen zur Kalibration eines NIRS-Messsystems, der Anforderungen an die räumliche Nähe von Mess- und Probenahmestelle sowie dem begrenzten Budget für den Einsatz innovativer Messtechnik innerhalb des Verbundprojektes wurde das Gelöst-H₂-Messsystem des Kurt-Schwabe-Institutes (KSI) Meinsberg für den Einsatz innerhalb des Projektes favorisiert.

Die NIRS-Technologie stellt dennoch eine vielversprechende messtechnische Methode zur Beurteilung der Dynamik des Fermentationsprozesses dar und sollte in künftigen Projekten genutzt werden.

Festlegung der Messstellen zur prozessbegleitenden Online-Messtechnik

Da die Dynamik des Fermentationsprozesses innerhalb der Gärsuspension beurteilt werden sollte, ergaben sich vier Messstellen mit alternierender Parametererfassung:

- Messstelle 1: Substratzufuhr (in Strömungsrichtung nach Rührwerk, Abstand Rührwerk ca. 0,5 m)
- Messstelle 2: Substratabzug (in Strömungsrichtung vor Rührwerk, Abstand Rührwerk ca. 0,5 m)
- Messstelle 3: Mischzone (in Strömungsrichtung nach Rührwerk, Abstand Rührwerk ca. 2,5 m)
- Messstelle 4: Reaktionszone (in Strömungsrichtung nach Rührwerk, Abstand Rührwerk ca. 2,5 m)

Die Anordnung dieser vier Messstellen wird aus Abb. 19 ersichtlich.

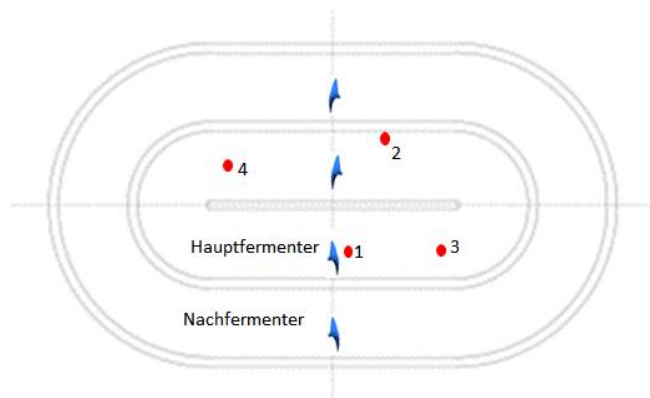


Abb. 19 Anordnung der Messstellen im Reaktorsystem innerhalb der Projektphasen 1 und 2 (IWE 2014)

.....
 Darstellung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse

Die Anordnung der Messstellen im Hauptfermenter der mobilen Pilotanlagen innerhalb der Projektphasen 2 und 3 wäre analog vorzunehmen.

Festlegung der Messintervalle zur prozessbegleitenden Online-Messtechnik

Die Messintervalle pro Messstelle betragen gemäß dem Angebot des KSI-Meinsberg circa 20 Minuten je Messstelle. Die Messstellen wären alternierend zu beproben. Die maximale Messwertanzahl pro Messstelle und Tag würde demnach bei 18 liegen. Nach Vorlage des Steuer- und Regelkonzeptes wäre eine zeitliche Adaption der Messwerterfassung an die Beschickungszyklen vorzunehmen.

Anforderungen der Messtechnik an das Steuer- und Regelsystem

Aufgrund der geplanten extern durchzuführenden Messkampagne ergeben sich durch die prozessbegleitende Online-Messtechnik keine direkten Anforderungen an das Steuer- und Regelsystem. Für den Fall einer dauerhaften Einbindung der innovativen Messtechnik in das Steuer- und Regelkonzept wären entsprechende Signale/Anschlüsse vorzusehen. In Absprache mit dem Hersteller (KSI-Meinsberg) war ggf. eine Signalgabe/Ansteuerung der Extraktoren (v. a. Start Rührwerke) vorzusehen, um eine Beeinträchtigung der Messtechnik durch Druckschwankungen zu vermeiden.

6.1.3 Stoffstrommanagement

6.1.3.1 Auswahl der einzusetzenden Substrate – Projektphase 1

Es war geplant, die Modell- und Demonstrationsanlage in Havelberg zu errichten. In enger Zusammenarbeit mit den Unterauftragnehmern des IKTS, der IWE-Ingenieurgesellschaft für Wasser und Entsorgung mbH und der Biogastechnology V.B.T.S. GmbH wurde für diesen Standort das einzusetzende Substratgemisch ausgewählt.

Unter Einbeziehung des vor Ort ansässigen Betreibers und Investors der Anlage sollten auf der Anlage vorwiegend Grassilagen unterschiedlichster Herkunft eingebunden werden. Das Spektrum reicht dabei von extensiv bewirtschafteten Landschaftspflegeflächen über Naturschutzgrünland bis zu intensiv bewirtschafteten Herkunftsflächen. Darüber hinaus war ein geringer Anteil an Maissilage und Rindergülle vorgesehen.

Abb. 20 zeigt beispielhaft mögliche Silagen. Bei der Silage des Silos aus Garz handelt es sich um ein Landschaftspflegematerial (extensiv bewirtschaftet, maximale Faserlänge circa 8 mm). Die Silagen aus Warnau wurden aus unterschiedlich zerkleinertem Naturschutzgrünland erzeugt. Bei der mit dem Zusatz »oben« bezeichneten Probe wurden maximale Faserlängen von 8 mm gemessen. Dagegen wies die Probe »unten« Faserlängen bis 15 mm auf. Die mittels Batch-Analysen bestimmten Gaspotenziale sind aus Abb.

21 ersichtlich. Die erreichten Unterschiede im Gasertrag der Silagen aus Warnau korrelieren mit dem Zerkleinerungsgrad und bestätigen die Notwendigkeit einer Vorzerkleinerung beim Einsatz von Grassilagen.

.....
 Darstellung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse



Abb. 20 Silagen von Landschaftspflegematerial der Region der geplanten Modell- und Demonstrationsanlage (Projektphase 1)

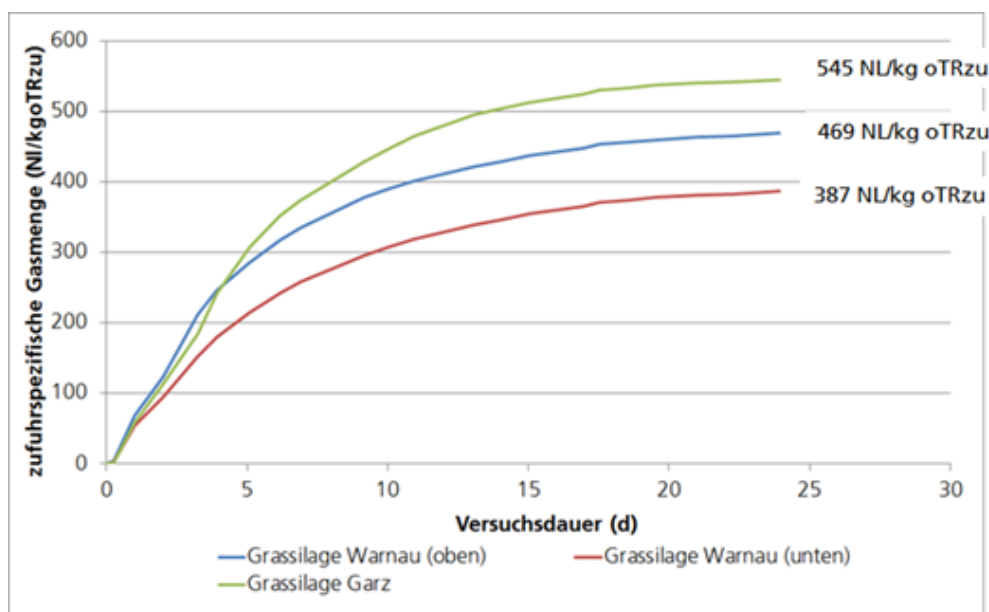


Abb. 21 Biogasertrag von standortspezifischen Silagen

Auf der Basis der beim Betreiber vorliegenden Erfahrungen bezüglich regional typischer Stoffwerte der zum Einsatz kommenden Grassilagen und der, durch Einsatz der Substratvorbehandlung und der ovalen Reaktorgeometrie zu erwartenden Steigerungsraten der Biogasausbeute wurden gemeinsam mit allen Projektpartnern die in Abb. 22 aufgelisteten Daten zur Anlagenauslegung abgeleitet.

Unter Ansatz dieser Stoffdaten und der geplanten Substratmengen wird ein Biogasanfall von 6.650 m³/d mit einem mittleren Methangehalt von 53 % erzielt. Damit ließe sich bei einem Wirkungsgrad des BHKW von 41,1 % im Dauerbetrieb von 489 kW_{el} erzielen. Unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit des BHKW von 92 % wird ein Aggregat der Nennleistung 527 kW_{el} erforderlich.

Substrat	Menge (t/d)	TR- Gehalt (% FM)	oTR-Ge- halt (% TR)	Spezifischer Gasanfall (NL/kg oTR _{zu})	Methan- Gehalt (%)
Rindergülle	5,0	8,0	80	400	55
Maissilage	3,0	34,0	93	720	53
Grassilage intensiv (Feldanbau)	4,6	40,0	90	650	53
Grassilage extensiv (Landschaftspflege)	4,5	45,0	82	560	53
Grassilage späte Ernte (Naturschutz)	13,0	45,0	85	520	53

Darstellung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse

Abb. 22 Einzusetzendes Stoffgemisch für die Modell- und Demo-Anlage 500 kW_{el} (Projektphase 1)

6.1.3.2 Auswahl der einzusetzenden Substrate – Projektphase 3

Entsprechend den Festlegungen im Verbund sollte die Pilotbiogasanlage innerhalb der Projektphase 3 mit Grassilage als lignozellulosereichem Substrat betrieben werden. Zur besseren Handhabung wurde Ballensilage favorisiert. Unter Berücksichtigung der geplanten Anlagengröße wurden auf Basis der von der KTBL empfohlenen spezifischen Biogasausbeuten die erforderlichen Einsatzmengen berechnet. Wöchentlich würden somit circa 500 kg Grassilage erforderlich. Bei der Berechnung der Einsatzmengen (siehe Abb. 23) wurde der als Projektzielstellung formulierte Biogasmehrertrag von 25 % berücksichtigt. Diese Steigerung wurde aus einer verbesserten Reaktorvermischung und der damit verbundenen Vermeidung von Totzonen im Reaktor abgeleitet. Entsprechend den in Projektphase 1 gezeigten Vorteilen einer Substratvorzerkleinerung auf die Biogasausbeute hochzellulosehaltiger Substrate soll auch im Pilotmaßstab eine derartige Vorbehandlung genutzt werden.

		Gras- silage	Rückführung Prozesswasser	Gesamtsubstrat	
Datenquelle		KTBL	Erfahrungswert	KTBL/Erfahrung	Projektzielstellung
Menge	(kg FM/d)	68,5	265	333,5	333,5
	(kg FM/d _{AT})	59,9	371	466,9	466,9
	(t FM/a)	25,0	97		
TR-Gehalt	(% FM)	35,0	6,0	12,0	12,0
oTR-Gehalt	(% TR)	88,0	65,0	78,8	78,8
Gasanfall	(NL/kg oTR _{zu})	560		560	700
Methangehalt	(%)	54,0		54,0	54,0
Biogasertrag	(NL/d)	11.800		11.800	14.800
Methanertrag	(NL/d)	6.370		6.370	7.990
Steigerung Biogasausbeute	(%)				25,0

Abb. 23 Bilanzierung des Biogasprozesses - Projektphase 3

6.1.4 Stoffstromkonzeption und technisch-technologische Verfahrensfestlegung (Arbeitspaket 1.3)

.....
Darstellung der
wissenschaftlichen und
technischen Ergebnisse
.....

6.1.4.1 Verfahrensfestlegung der Modell- und Demonstrationsanlage (Projektphase 1)

Für die geplante Anlagengröße von 500 kW_el und unter Ansatz der oben genannten Einsatzstoffe wie Landschaftspflegematerial war ein Fermenter mit einem Nutzvolumen von circa 1.700 m³ erforderlich. Unter Beachtung der innerhalb des Arbeitspaketes 1.1 aufgestellten Maßstabszahlen und der im kleintechnischen Maßstab bereits vorliegenden Ergebnisse (FRAUNHOFER IKTS 2013) wurden die Parameter in den großtechnischen Maßstab überführt. Abb. 24 zeigt die geometrischen Abmessungen des zu errichtenden ovalen Fermenters und der einzusetzenden Rührer.

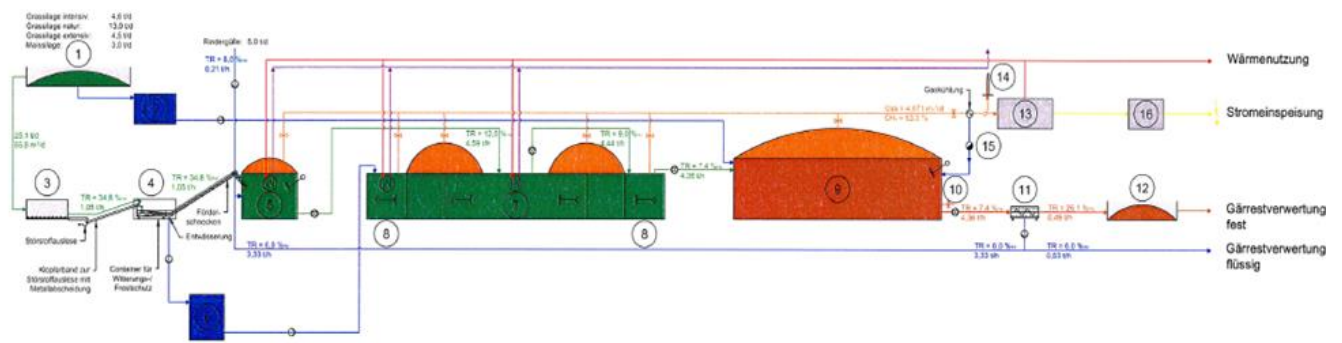
Ausgehend von diesen Bemessungswerten wurde von der IWE mbH das Behältersystem planerisch vorbereitet (Abb. 25). Auf Grundlage der erstellten Zeichnungen konnte der damalige Verbundpartner MFPA eine detaillierte Anlagenplanung und die erforderlichen statischen Berechnung vornehmen. Im Ergebnis dessen wurden durch den Partner Stowasser Bau GmbH die bautechnischen Vorbereitungen präzisiert. Einzelheiten sind den gesondert angefertigten Berichten zu den Teilprojekten 03KB086 B und C zu entnehmen.

	Kleintechnischer Maßstab	Modell- und Demonstrationsanlage
Reaktorlänge	3,08 m	31 m
Gerinnebreite	0,55 m	5,5 m
Fluidhöhe	0,55 m	5,5 m
Rührerdurchmesser	0,24 m	2,5 m
Rührerdrehzahl	400 min ⁻¹	38 min ⁻¹
Rührerumfangsgeschwindigkeit	5 m·s ⁻¹	5 m·s ⁻¹

Abb. 24 Skalierung in den großtechnischen Maßstab

Die innovativen Anlagenteile wurden von der V.B.T.S. GmbH in das Gesamtkonzept eingebunden und den ortsspezifischen Gegebenheiten angepasst (siehe Abb. 26).

Daraufhin konnte durch die IWE mbH die technisch-technologische Vorplanung der innovativen Anlagenteile erarbeitet und eine Technologie- und Stoffstromkonzeption erstellt werden. Zusammenfassend zeigt Abb. 27 das von der IWE mbH aufgestellte Verfahrensflißbild mit allen relevanten Stoffströmen. Durch die V.B.T.S. wurde anschließend die Steuerung der innovativen Anlagenteile geplant und deren Einbindung in das Steuer- und Regelungskonzept der Gesamtanlage vorbereitet.



- 1 Fahr silo
- 2 SSS-Grube \varnothing 6 m, h 4 m
- 3 Kratzketten-Annahmedosierer 50 m³
- 4 Bioextruder B 74 E
- 5 Substratvorbehandlungsreaktor \varnothing 8 m, h 6 m
- 6 Pufferbehälter für Nachfermenter \varnothing 5 m, h 6 m
- 7 Hauptfermenter oval L:B:H = 31,5 m : 11,75 m : 6,0 m
- 8 Nachfermenter oval L:B:H = 43,0 m : 23,25 m : 6,0 m
- 9 Endlager \varnothing 30 m, h 8 m
- 10 Faßabfüllstation
- 11 Separator
- 12 Gärrestlager (fest)
- 13 BHKW 500 kW
- 14 Notfackel
- 15 Kondensatwasserschacht
- 16 Transformator

- Anlagentechnik
- Substratstrom
- Fluidstrom
- Gasstrom
- Gärreststrom
- Wärmetstrom
- Elektroenergie

Abb. 27 Stoffstrom-Fließbild der Modell- und Demonstrationsanlage (IWE 2014)

6.1.4.2 Verfahrensfestlegung der Pilotbiogasanlage (Projektphase 3)

Standort und Prozessstufen der Pilot-Biogasanlage

In Abstimmung aller Verbundpartner sollte die Pilot-Biogasanlage auf dem Gelände der ATG GmbH in Helmsgrün in unmittelbarer Nähe zum Applikationszentrum Bioenergie (AZB) des IKTS errichtet werden (siehe Abb. 29 und Abb. 30).

Die Auslegung der Anlage basierte auf einer Raumbelastung für den Hauptfermenter von 3,5 kg oTR/(m³·d) bzw. von 1,2 kg oTR/(m³·d) über die Gesamtanlage. Ausgehend von der in Abb. 23 vorgenommenen Bilanzierung der einzusetzenden Stoffströme und den genannten Raumbelastungen wurden Nutzvolumina für den Hauptfermenter von 6 m³ und für den Nachfermenter von 12 m³ ermittelt. Die Prozessdaten werden zusammenfassend aus Abb. 28 ersichtlich.

		Anmisch- behälter	Hauptfer- menter	Nachfer- menter
Menge mit Prozesswasser- rückführung aus Separation	(kg/d)	333,5	333,5	333,5
Verweilzeit	(d)	2,0	18,0	37,0
Erforderliches Nutzvolumen	(m ³)	0,7	6,0	12,0
oTR-Fracht ohne Prozess- wasserrückführung	(kg oTR/d)		21,1	54,0
Raumbelastung	(kg oTR/(m ³ · d))		3,5	1,2

Abb. 28 Prozessdaten entsprechend Stoffstromkonzept

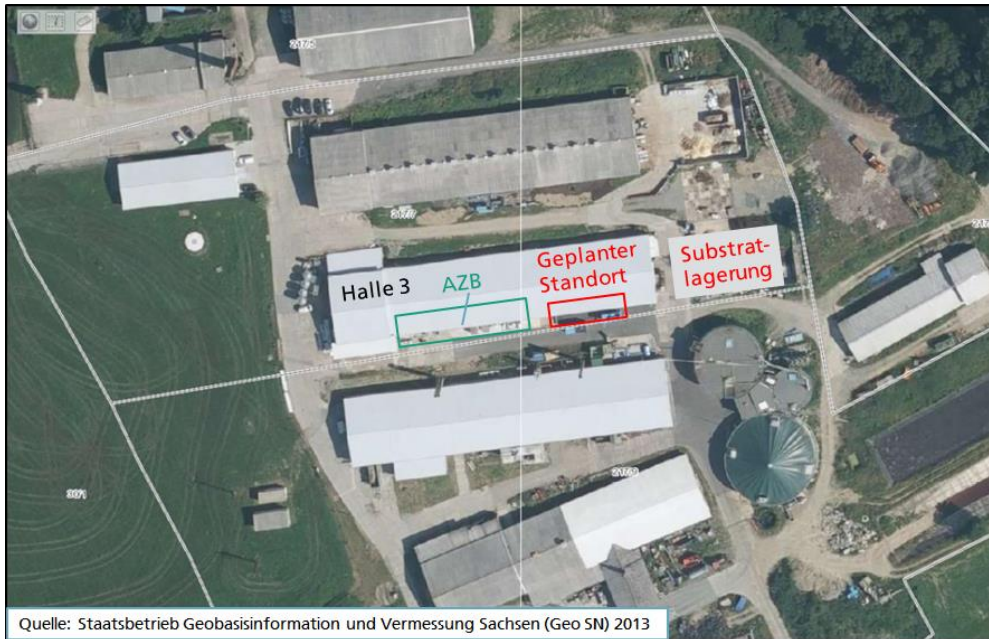


Abb. 29 Standort der Pilotbiogasanlage auf dem Flurstück 217/7 in Helmsgrün

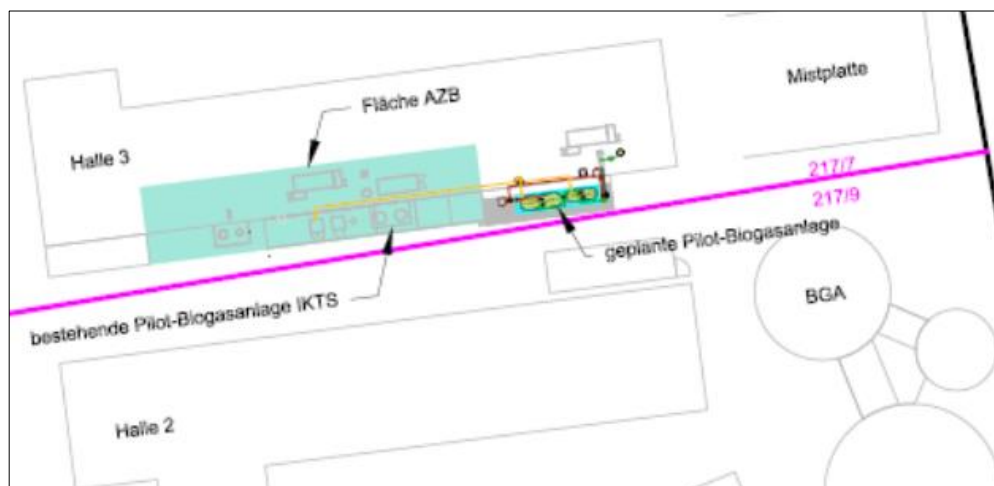


Abb. 30 Einordnung der Pilot-Biogasanlage zum bestehenden Anlagentechnik des IKTS (IWE 2016)

Beide Fermenter sollten auf einer maßstäblichen Grundplatte eines 40" Containers incl. verbindender Rohrleitungen, Armaturen und Pumpen mit entsprechender Abflussicherung montiert werden. Die Ausbildung der Fermenter wird in Abb. 31 und Abb. 32 dargestellt.

Darstellung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse

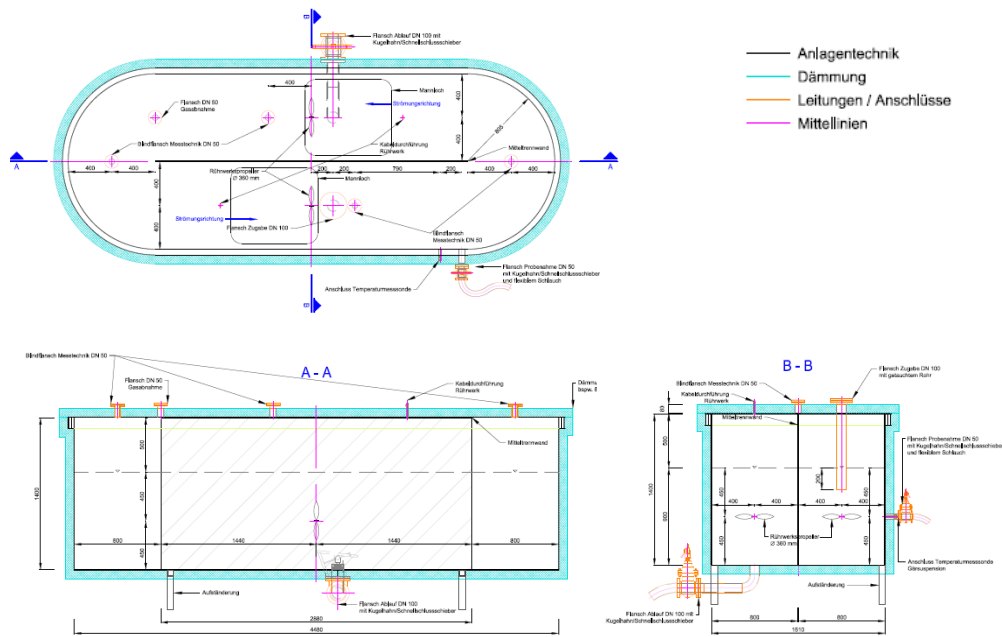


Abb. 31 Hauptfermenter (IWE 2016)

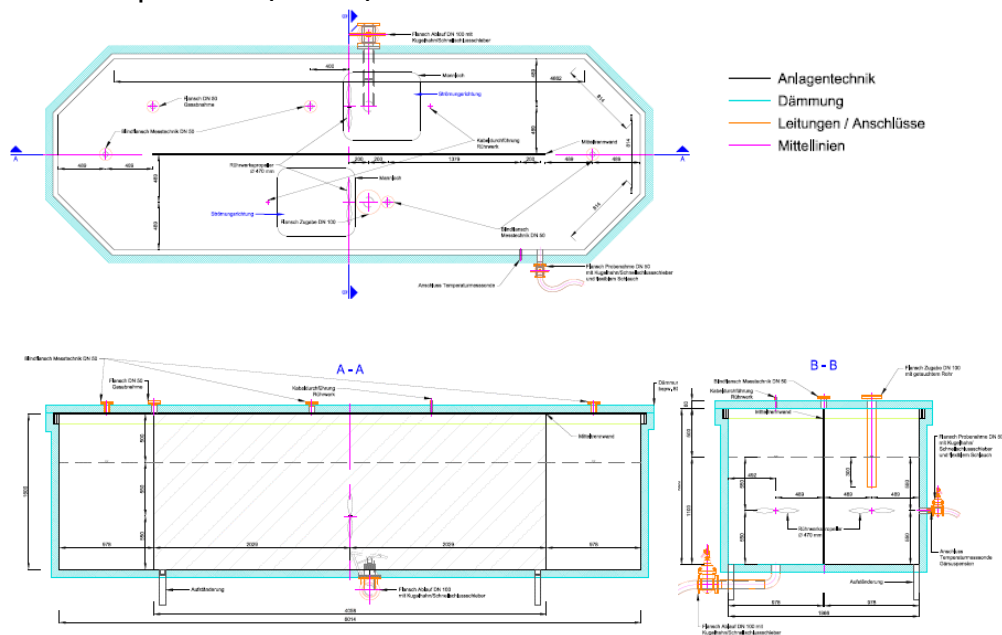


Abb. 32 Nachfermenter (IWE 2016)

Von diesen Grundlagen ausgehend wurde ein erstes Layout für die skalierten Reaktoren auf einer 40-ft-Container-Grundplatte in 3-D-Darstellung von ATG entwickelt (Abb. 33) und bildete die Diskussionsbasis für die weitere Verfahrensgestaltung.

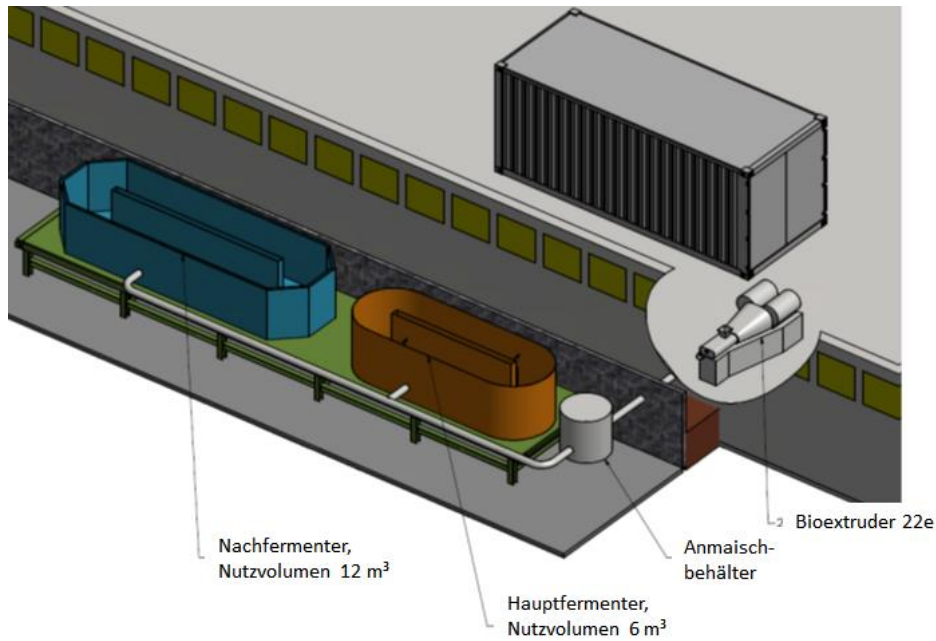


Abb. 33 Layout des Reaktorsystems der Pilot-Biogasanlage (ATG 2016)

Auslegung der Rührtechnik

Analog den bisherigen Untersuchungen sollten die beiden Fermenter mit Propeller-Rührwerken ausgerüstet werden. Entsprechend der jeweils vorliegenden Reaktorgeometrie werden großtechnische Rührwerke (Propellerdurchmesser 2500 mm) nachgebildet. Die Skalierung bisher eingesetzter Rührtechnik (Propellerdurchmesser 70 – 240 mm) zeigt Abb. 34.



Abb. 34 Skalierung großtechnischer Rührtechnik (Quelle: www.ksb.com) in den Labor- und kleintechnischen Maßstab (IKTS 2014)

Unter Beachtung der geometrischen Ähnlichkeit wurde die Rührtechnik an die hier im Projekt vorliegenden Reaktorgeometrien angepasst (siehe Abb. 35). Zur Einhaltung einer fluiddynamischen Ähnlichkeit wird das Kriterium gleicher Rührerumfangsgeschwindigkeiten ($u = \text{const.}$) herangezogen. Die daraus abgeleiteten Rührerdrehzahlen sind ebenfalls in der Abb. 35 mit aufgeführt.

	Reaktor 6 m ³	Reaktor 12 m ³
Rührertyp	horizontal angeordnete Propeller Nachbildung Amaprop 2500	
Anzahl Rührer im Reaktor	2 Stück	2 Stück
Propellerdurchmesser	370 mm	480 mm
Rührerdrehzahl $u = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	260 min ⁻¹	220 min ⁻¹
Drehzahlbereich	200 – 300 min ⁻¹	150 – 250 min ⁻¹
Anordnung im Reaktor	mittig, höhenverstellbar	mittig, höhenverstellbar
Leistung je Rührwerk	300 – 700 W	500 – 1000 W
Antrieb	Tauchmotor	Tauchmotor

.....
Darstellung der
wissenschaftlichen und
technischen Ergebnisse
.....

Abb. 35 Parameter der einzusetzenden Rührtechnik

Präzisierung der Prozessstufen

Basierend auf den erforderlichen Substratmengen, den genannten Reaktorgößen und unter Beachtung der geplanten arbeitstägigen Beschickung der Anlage wurden die technologischen Prozessstufen im Verbund präzisiert. Zusammenfassend sind folgende Anlagenkomponenten hervorzuheben.

- Silierung/Substratlagerung
 - Lagerfläche hinter dem Technikums-Gebäude 3.
 - Einsatz von Ballensilage (TR = 25 %; oTR = 88 %; 95,9 kg/d_{AT}).
- Substratzerkleinerung/Substrattransport zum Anmischbehälter
 - Nutzung des Extruders B22e des IKTS.
- Anmischbehälter
 - Nutzvolumen $\geq 0,7 \text{ m}^3$.
 - Einsatz Zentralrührwerk unter Beachtung der zu erwartenden Viskosität.
 - Anmischen der Grassilage mit Rezirkulat (Prozesswasser aus Gärrestentwässerung).
 - Feststoffeintrag (95,9 kg/d_{AT}) mittels Stopfschnecke.
 - Eintrag Flüssigphase (371 L/d_{AT}) und Substratabzug mittels Exzentrerschneckenpumpe.
 - Temperatur im Anmischbehälter 38 °C.
 - Heizung durch Heizmatten.
- Fermenter/Nachfermenter
 - Hauptfermenter 6 m³ als volldurchmischer, ovaler Umlaufreaktor mit Mitteltrennwand.
 - Nachfermenter 12 m³ in Oktaeder-Bauform als volldurchmischer Umlaufreaktor mit Mitteltrennwand.
 - Substrateintrag über Zugabeleitung DN 100.
 - Substratabzug über Grundablass DN 100.
 - Arbeitstägige Beschickung.
 - Über-/Unterdrucksicherung an jedem Fermenter durch Wassertasse.
 - Installation der Fermenter auf einer 40-ft-Containerplattform.
 - Je Fermenter 2 Propeller-Tauchmotorrührwerke, drehzahleregelt (FU).
 - Heizung durch Heizmatten.
- Gärrestseparation
 - Nutzung der Separation zur Gewinnung von Prozesswasser zum Anmischen der Substrate.

- Arbeitstägiger Einsatz der Separation.
- Durchsatz circa 450 L/d_{AT}.
- Feststoff nach Separation (140 kg/Woche) wird direkt auf offenen Anhänger oder in Container befördert.
- Flüssigphase (circa 370 L/d_{AT}) läuft im Freigefälle in Vorlagebehälter
- Überschüssiger flüssiger Gärrest (circa 40 L/d_{AT}) läuft im Freigefälle direkt in weiteren Sammelbehälter.
- Gaserfassung/Gasableitung
 - Gasstrecke je Fermenter bestehend aus Gasleitung, Kondensatwasserabscheidung, Gasmengenmessung und Sicherheitsarmaturen.
 - Einbindung in die vorhandene Gasleitung der Pilotanlage des IKTS.
 - Gasanfall in Summe circa 15 m³/d bzw. 20,6 m³/d_{AT}.

.....
 Darstellung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse

Der technologische Ablauf der Gesamtanlage ist Abb. 36 zu entnehmen.

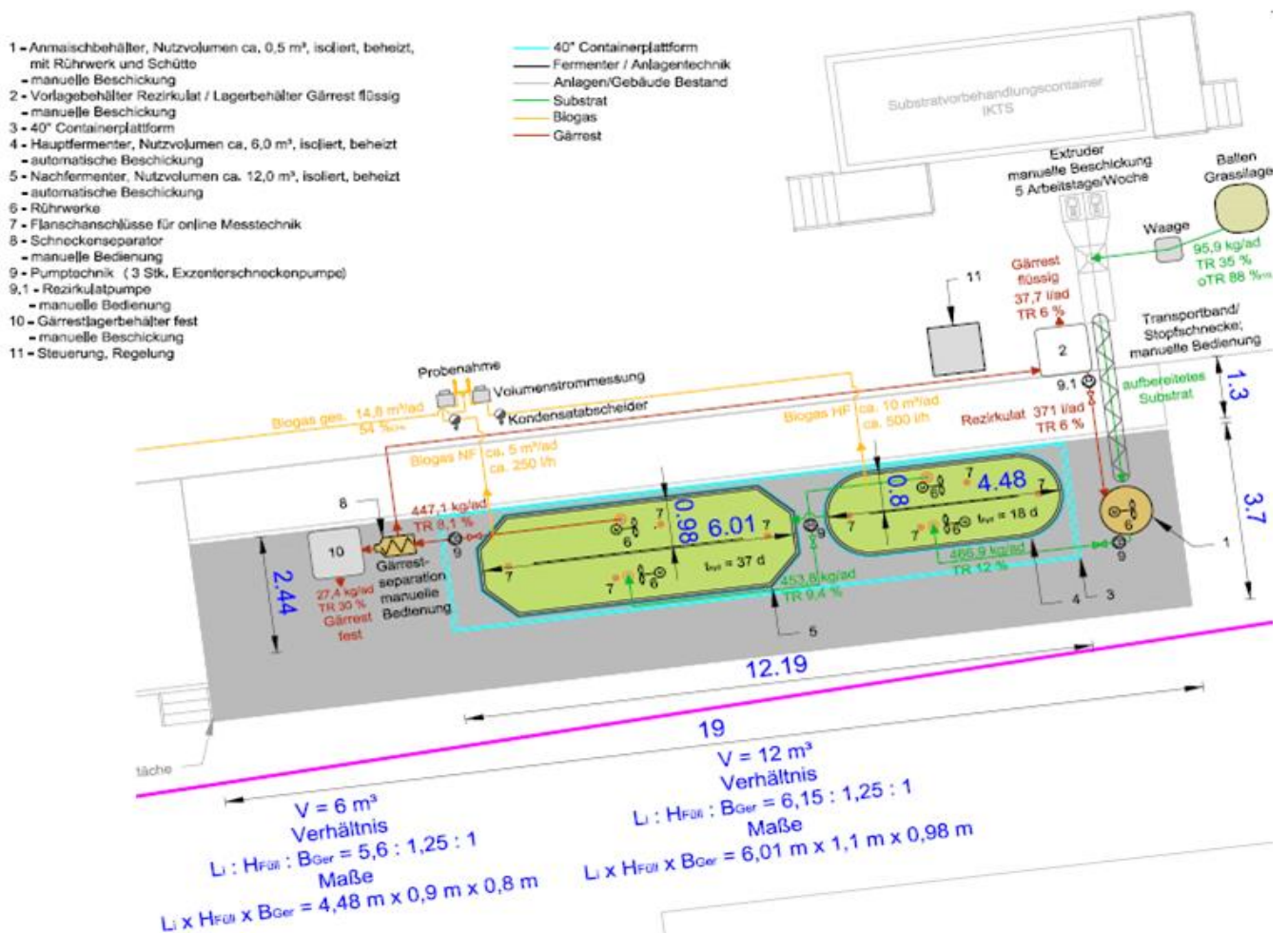


Abb. 36 Prozessstufen der Pilot-Biogasanlage (IWE 2016)

6.2 Errichtung der Pilot-Biogasanlage

6.2.1 Verfahrenstechnische/technologische Komponentenauswahl der Pilot-Biogasanlage (Arbeitspaket 2.1)

6.2.1.1 Weitere Spezifizierung der Anlagengestaltung und Angebotseinholung

Im Rahmen der vorgenommenen Detailplanungen musste der Aufbau der Gesamtanlage als Containerbauform verworfen werden, da sich eine derartige Ausführung als nicht transportabel und nicht wirtschaftlich erwies. Um das gesamte System dennoch transportabel zu gestalten, wurden der Hauptfermenter (HF) und der Nachfermenter (NF) auf jeweils eine separate 20-ft-Containerplattform gestellt.

Für die peripheren Anlagenkomponenten der Pilot-Biogasanlage wie Substratkonfektionierung, -transport, -lagerung und -vorbehandlung zur Substratzuführung, Fermentation mit Gaseinbindung sowie zur Gärrestaufbereitung und Verbringung der Reststoffe wurden intensive Recherchen mit der Orientierung nach dem neusten Stand der Technik durchgeführt.

Im Ergebnis dieser Recherchen und der weiteren Planung durch ATG ergaben sich folgende Spezifizierungen der Anlage

- Zur Vermeidung eines erhöhten technologischen und finanziellen Aufwandes sollte nur der Bioextruder anstelle des gesamten IKTS-Substratvorbehandlungscontainers in die Anlage integriert werden.
- Des Weiteren wurde auf die zuerst angedachte Wasserheizung der Fermenter verzichtet und selbstklebende Heizmatten, wie sie auch in der Automobilindustrie zu finden sind, als Heizung für alle notwendigen Baugruppen vorgesehen.
- Zur Vermeidung eines erhöhten Wartungsaufwandes wurde auf herkömmliche Sensorik (Ultraschall- und Radartechnologie) zur Stoffstromerfassung verzichtet. Als Ersatzsystem wurde sich für außenliegende Wägezellen entschieden. Diese bieten den Vorteil der berührungslosen Messung sowie der großen mechanischen Stabilität in diesem Einsatzgebiet.

Auf der Basis der berechneten Stoffströme bei einer Raumbelastung von 3,5 kg oTR/(m³ d) und der festgelegten Behälter-Kubaturen sowie der Standorte der Einzelaggregate wurden verbindende Rohrleitungen für den Substrattransport, der Prozesswasserrückführung nach der Fest/flüssig-Trennung des Gärrestes und für die Gaseinbindung in das bestehende Gassystem der IKTS-Pilotanlage dimensioniert und die Konstruktionsunterlagen angefertigt. Notwendige Pumpen wurden spezifiziert und einzusetzende Mischsysteme für Fermenter und Anmischbehälter recherchiert.

Das Gesamtsystem wird in Abb. 37 dargestellt.

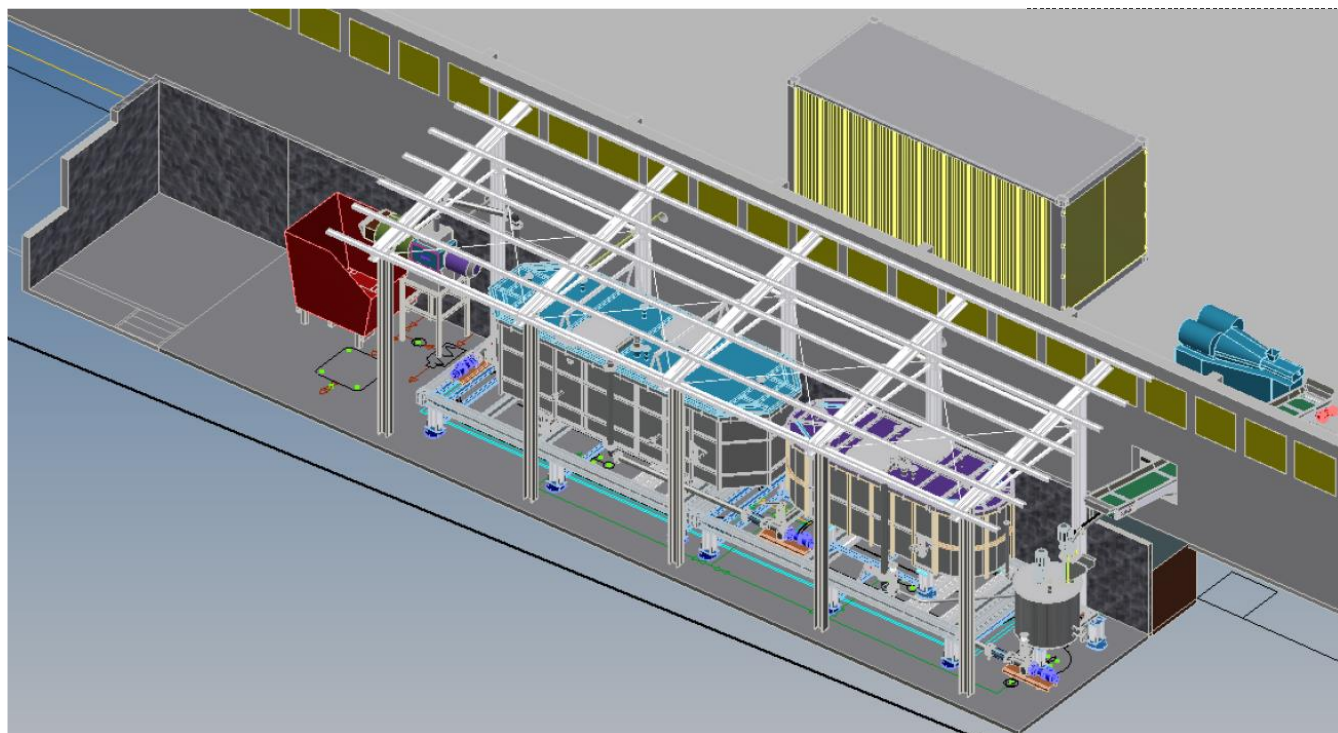


Abb. 37 Gesamtsystem der geplanten Pilot-Biogasanlage (ATG 2016)

Zur Komplettierung der Anlage wurde das Steuerungskonzept geplant, wobei bestehende Steuerkonzepte analysiert und verbessert wurden. Geplant war der Einsatz einer S7-300-Steuerung mit Visualisierung über ein Touch-Display.

Um eine gesicherte Substratbereitstellung für den Betrieb der Pilot-Biogasanlage zu gewährleisten, wurde mit der Substratlagerung als Ballensilage am vorgesehenen Standort begonnen.

Eine statische Überprüfung der Tragfähigkeit der festgelegten Aufstellungsfläche für die Gesamtanlage hat gezeigt, dass notwendige Fundamentarbeiten und Sicherheitsmaßnahmen für den Auslaufschutz der Biogasanlage zusätzlich zu den ursprünglichen Planungen in die Gesamtkalkulation der Kosten aufzunehmen war.

Die bisher erfassten Positionen von Material und Fremdleistungen wurden entsprechend der Erfordernisse weiter konkretisiert, Leistungsbeschreibungen für die notwendige Angebots-Einholung erarbeitet und Stücklisten für den Materialeinkauf vorbereitet. Nach Eingang der abgeforderten Angebote erfolgte die Angebotsauswertung und die finale Komponentenauswahl sowie Kostenzusammenstellung.

Im Vergleich zur Fördermittelbeantragung vom 16.11.2015 und dem Zuwendungsbescheid vom 10.12.2015 ergaben sich die in Abb. 38 ausgewiesenen Mehraufwendungen.

	Antrag ATG vom 16.11.2015	Zusammenstellung ATG 28.07.2016	Mehraufwand zum Antrag
Material	239.900 EUR	275.045,25 EUR	35.145,25 EUR
Fremdleistungen	0 EUR	56.390,50 EUR	56.390,50 EUR
		Mehraufwendungen gesamt	91.535,75 EUR

Abb. 38 Zusammenstellung der geplanten Kosten zur Errichtung der Pilot-Biogasanlage

6.2.1.2 Ermittlung von Maßnahmen zur Reduzierung der Anlagenkosten

.....
Darstellung der
wissenschaftlichen und
technischen Ergebnisse
.....

Daraufhin wurden im Verbund die Detailplanungen zu einzelnen technologischen Stufen besprochen und überprüft. Im Ergebnis dieser Abstimmungen konnten innerhalb eines Verbundtreffens Maßnahmen zur Reduzierung der Material- und Fremdleistungskosten beschlossen werden. Neben dem Einsatz alternativer Ausrüstungen zur Gärrestentwässerung wurden Kostenersparnisse für die ATG vor allem durch die Übernahme von Teilleistungen durch IKTS wirksam. Beispielsweise sollte die Gärrestentsorgung über die Grundfinanzierung des IKTS getragen werden, sodass die Anschaffung von Spezialtechnik zur Gärrestverbringung durch die ATG innerhalb des Projektes nicht erforderlich gewesen wäre. Weiterhin wurde festgehalten, dass die anfallenden Kosten zur Erstellung der Statik für die Fermenter und der Stahlunterkonstruktionen durch eine Umwidmung geplanter Fremdleistungen aus dem Teilprojekt IKTS finanziert werden sollten.

Im Ergebnis der erfolgten Kostenoptimierung sollte die Pilot-Biogasanlage zu den im Projektantrag der ATG vom 16.11.2015 ausgewiesenen Kosten errichtet werden.

	Antrag ATG vom 16.11.2015	Zusammenstellung ATG vom 13.09.2016
Material	239.000 EUR	225.253 EUR
Fremdleistungen	0 EUR	14.590 EUR
Kosten gesamt	239.900 EUR	239.843 EUR

Abb. 39 Zusammenstellung der geplanten Kosten nach erfolgter Optimierung

6.2.1.3 Prüfung von Alternativstandorten für die Pilot-Biogasanlage unter Beachtung veränderter Randbedingungen

Nach Vorliegen der Mittelentsperrung durch den Projektträger wurde durch die ATG mit der Errichtung der Biogasanlage begonnen. Infolge der im Oktober 2016 eingetretenen Insolvenz des Eigentümers des Nachbargrundstücks, der BioEnergie Pöhl e. K. mussten die Arbeiten zur Errichtung der Anlage unterbrochen werden, da in dieser Situation die geplante Grenzbebauung zum Grundstück der BioEnergie Pöhl nicht realisiert werden kann (siehe Abb. 40). Die oben aufgezeigte Kostenoptimierung wurde somit hinfällig.

Daraufhin wurde im Verbund nach Alternativstandorten gesucht. Voraussetzungen für einen derartigen Standort sind

- die Einhaltung der erforderlichen Abstandsflächen (3 m) zum Nachbargrundstück und
- die mögliche Mitnutzung peripherer Anlagenteile (Substratvorbehandlung, Gastrecke) der Pilot-Biogasanlage des IKTS im Applikationszentrum Bioenergie.

Als mögliche Aufstellungsorte konnten zwei Varianten (Abb. 41 und Abb. 42) untersucht werden.

- Variante 1 Mistplatte östlich der Technikumshalle 3,
- Variante 2 Westlich der Pilot-Biogasanlage des IKTS.

.....
Darstellung der
wissenschaftlichen und
technischen Ergebnisse
.....

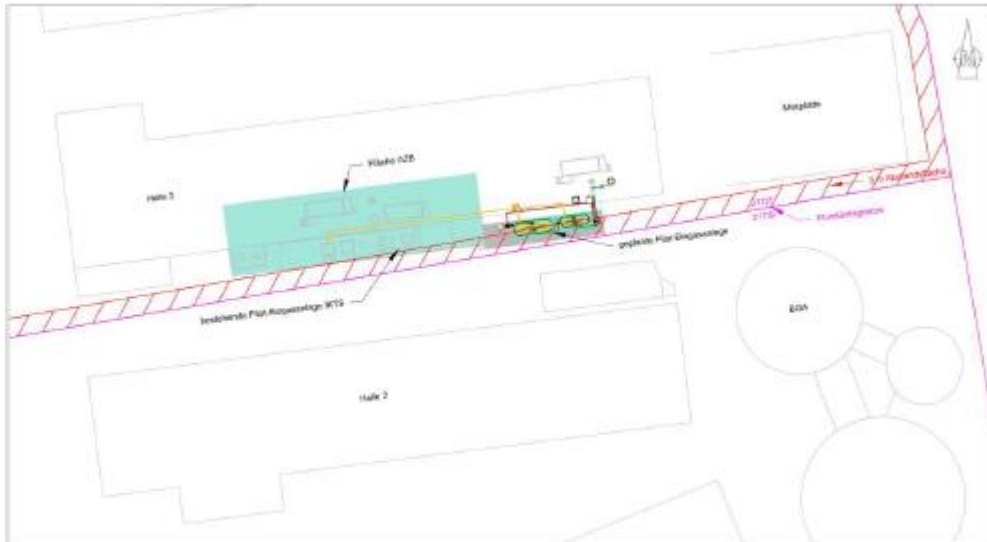


Abb. 40 Bisher betrachteter Standort unter Berücksichtigung einer möglichen Grenzbebauung (IWE 2016)

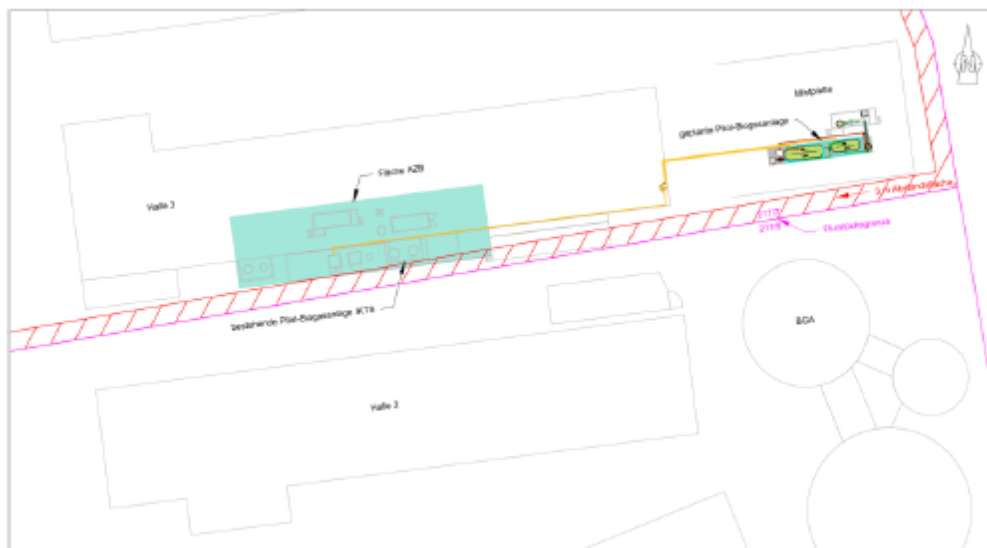


Abb. 41 Alternativstandort – Variante 1 (IWE 2016)

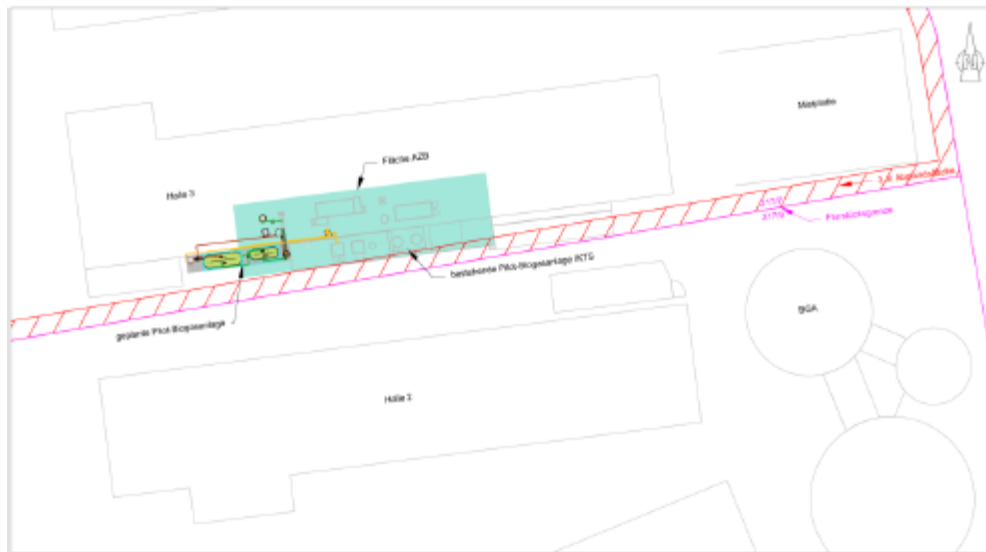


Abb. 42 Alternativstandort – Variante 2 (IWE 2016)

Die Vor- und Nachteile beider Alternativstandorte im Vergleich zur ursprünglichen Planung sind der folgenden Übersicht zu entnehmen.

	Bisherige Planung	Alternativstandort Variante 1	Alternativstandort Variante 2
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Logistisch günstigste Aufstellungsvariante (Platzverhältnisse, Anbindung an IKTS-Pilotanlage, Medienzu- und -ableitung) • Keine Planungsanpassung erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausreichende Platzverhältnisse außerhalb der Abstandsfläche • Anbindung an Ableitung wassergefährdender Stoffe vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausreichende Platzverhältnisse außerhalb der Abstandsfläche • Geringe Entfernung zu IKTS-Pilotanlage
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Erteilung der Baugenehmigung infolge nichtgeregelter Grenzbebauung 	<ul style="list-style-type: none"> • Schaffung eines dichten und tragfähigen Untergrundes • Querung Verkehrsweg zur Anbindung an Gasleitung der IKTS-Pilotanlage • Umplanung erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> • Abriss bestehender Anlagen • Schaffung eines dichten und tragfähigen Untergrundes • Anbindung an Ableitung wassergefährdender Stoffe • Umplanung erforderlich

Abb. 43 Vor- und Nachteile möglicher Alternativstandorte

Die von ATG zu beiden Alternativstandorten durchgeführten Kostenschätzungen wiesen Mehrkosten gegenüber dem geplanten Standort von circa 100.000 EUR aus. Eine Realisierung des Vorhabens im Rahmen des geplanten Projektbudgets musste so in Frage gestellt werden.

6.2.1.4 Einbindung des ovalen Reaktorsystems in die Pilot-Biogasanlage des IKTS

Darstellung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse

Im Verbund wurde daher nach weiteren Alternativen gesucht, die eine Projekterfüllung mit vertretbaren zeitlichen und finanziellen Aufwendungen zulassen. Als Alternative zur bisherigen Planung wird die Einbindung des ovalen Reaktorsystems in die vorhandene Pilot-Biogasanlage des IKTS vorgeschlagen. Zusammenfassend kann dieser Vorschlag wie folgt beschrieben werden.

- Errichtung eines oktaederförmigen Reaktors (Nutzvolumen 6 m³) als Hauptfermenter auf einer noch verfügbaren Freifläche des Applikationszentrums des IKTS unter Beachtung der geltenden Abstandsregelung.
- Nutzung eines vorhandenen zylindrischen 5-m³-Reaktors der IKTS-Pilotanlage als Nachfermenter anstelle des bisher geplanten ovalen Nachfermenters. Gegebenenfalls können beide 5-m³-Reaktoren als Nachfermenter eingesetzt werden.
- Technologische Einbindung des ovalen 6-m³-Reaktors in den Anlagenbestand.
- Anpassung der peripheren Einrichtungen an das veränderte Reaktorkonzept.

Mit der Umsetzung dieses Technologiekonzeptes sollten die Vorteile ovaler bzw. oktaederförmiger Umlaufbecken im Pilotmaßstab demonstriert und die gestellten Projektziele - auch unter den gegebenen Randbedingungen - uneingeschränkt erzielt werden.

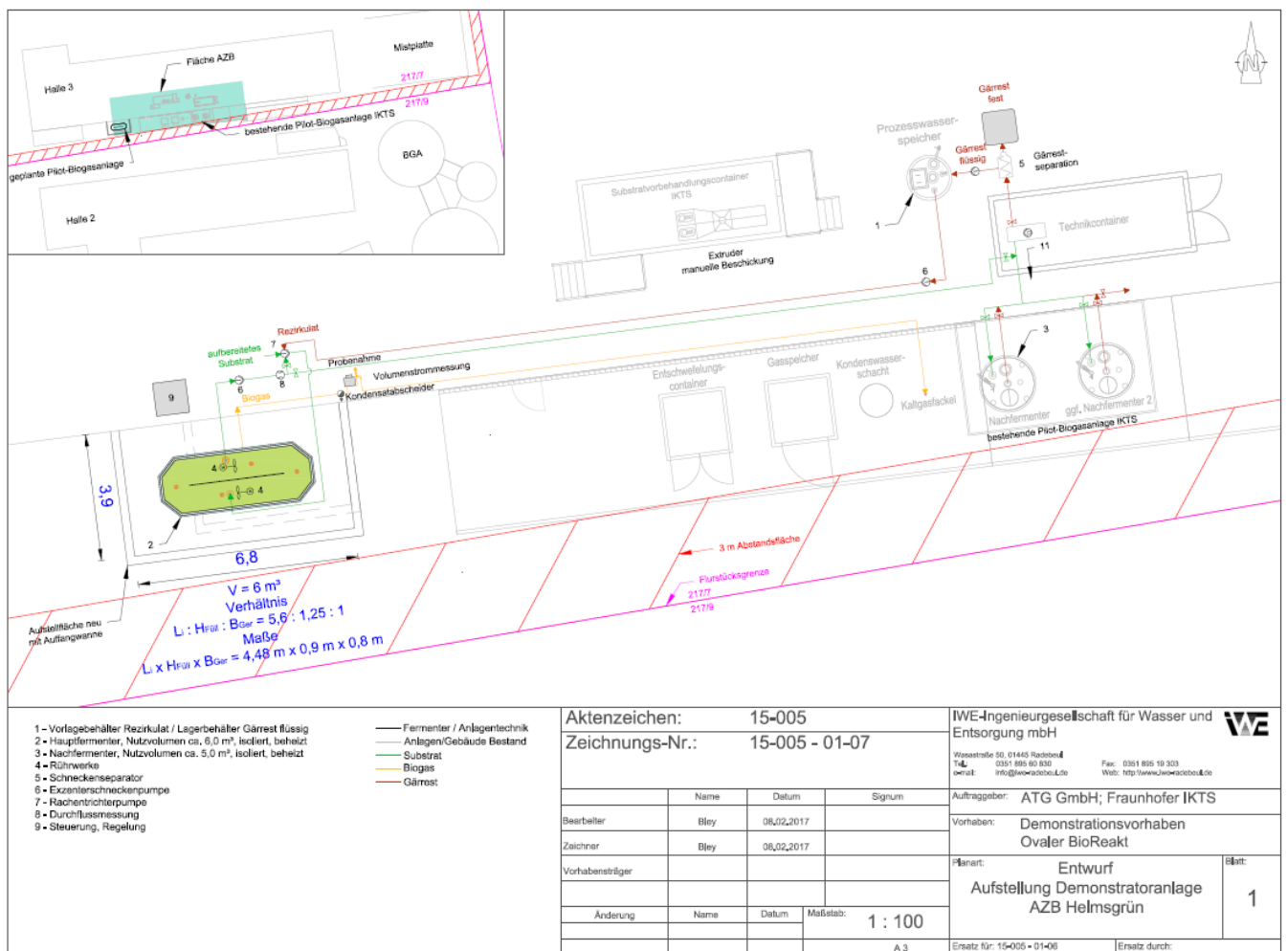


Abb. 44 Geplante Einbindung des ovalen Reaktorsystems in die Pilot-Biogasanlage des IKTS (IWE 2017)

Die Realisierung dieser Variante erforderte die Anpassung und Erweiterung bestehender Rohrleitungen und Armaturen, eine Erneuerung der Pumpentechnik und die Anpassung/Erweiterung des MSR-Systems. Darüber hinaus wären umfangreiche bautechnische Arbeiten zur Anpassung des Aufstellplatzes (Baugrund, Erneuerung Auffangwanne) erforderlich geworden.

Darstellung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse

Im Ergebnis der dazu vorgenommenen Kalkulationen stellte sich bei der ATG GmbH erneut ein Fehlbetrag von circa 100.000 EUR ein, der auch nicht durch das IKTS getragen werden konnte. Eine weitere Reduzierung von Anlagenteilen hätte die Funktionsfähigkeit der Pilot-Biogasanlage in Frage gestellt, sodass diese Variante nicht weiter verfolgt wurde.

6.2.2 Bautechnische Vorbereitung (Auslegung, Statik, Planung, Baugrund), Erstellung Steuerkonzept (Arbeitspaket 2.3)

Die Detailplanungen für die technische Errichtung der innovativen Pilot-Biogasanlage wurden abgeschlossen. Es liegen vor:

- die kompletten Konstruktionsunterlagen,
- der E-Plan
- der Rohrleitungsplan
- die Steuer- und Regelung-Planung und
- der Prozessleitplan.

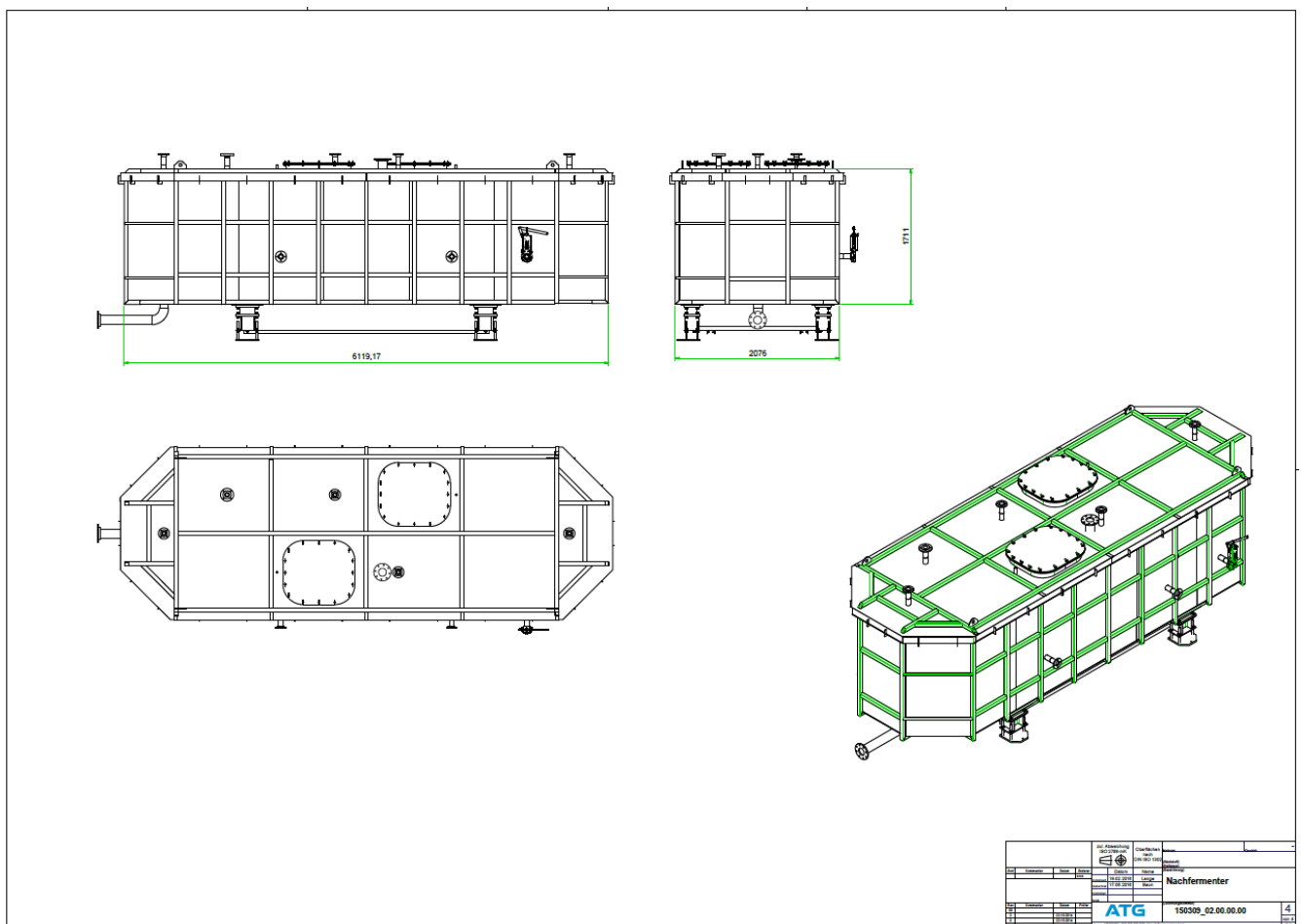
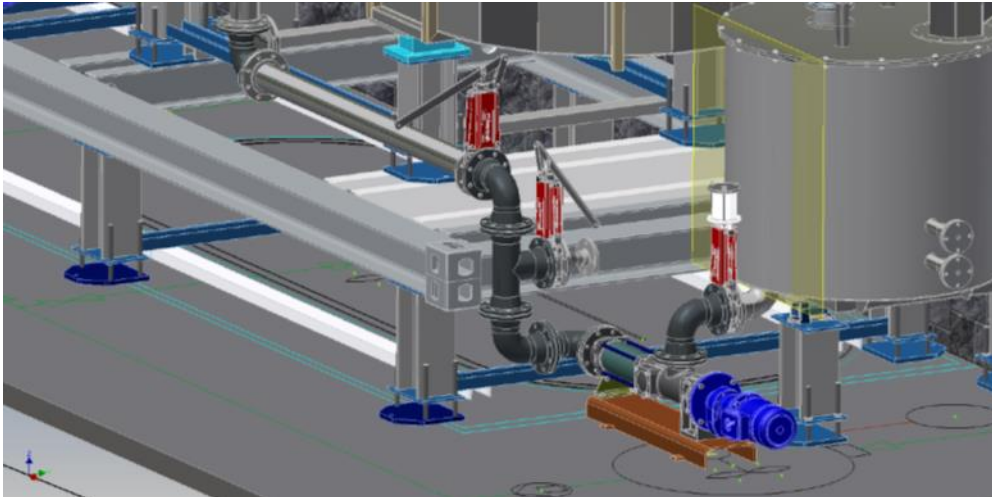


Abb. 45 Konstruktionszeichnung Nachfermenter (ATG 2016)



.....
 Darstellung der
 wissenschaftlichen und
 technischen Ergebnisse

Abb. 46 Auszug Detailplanung Rohrleitung (ATG 2016)

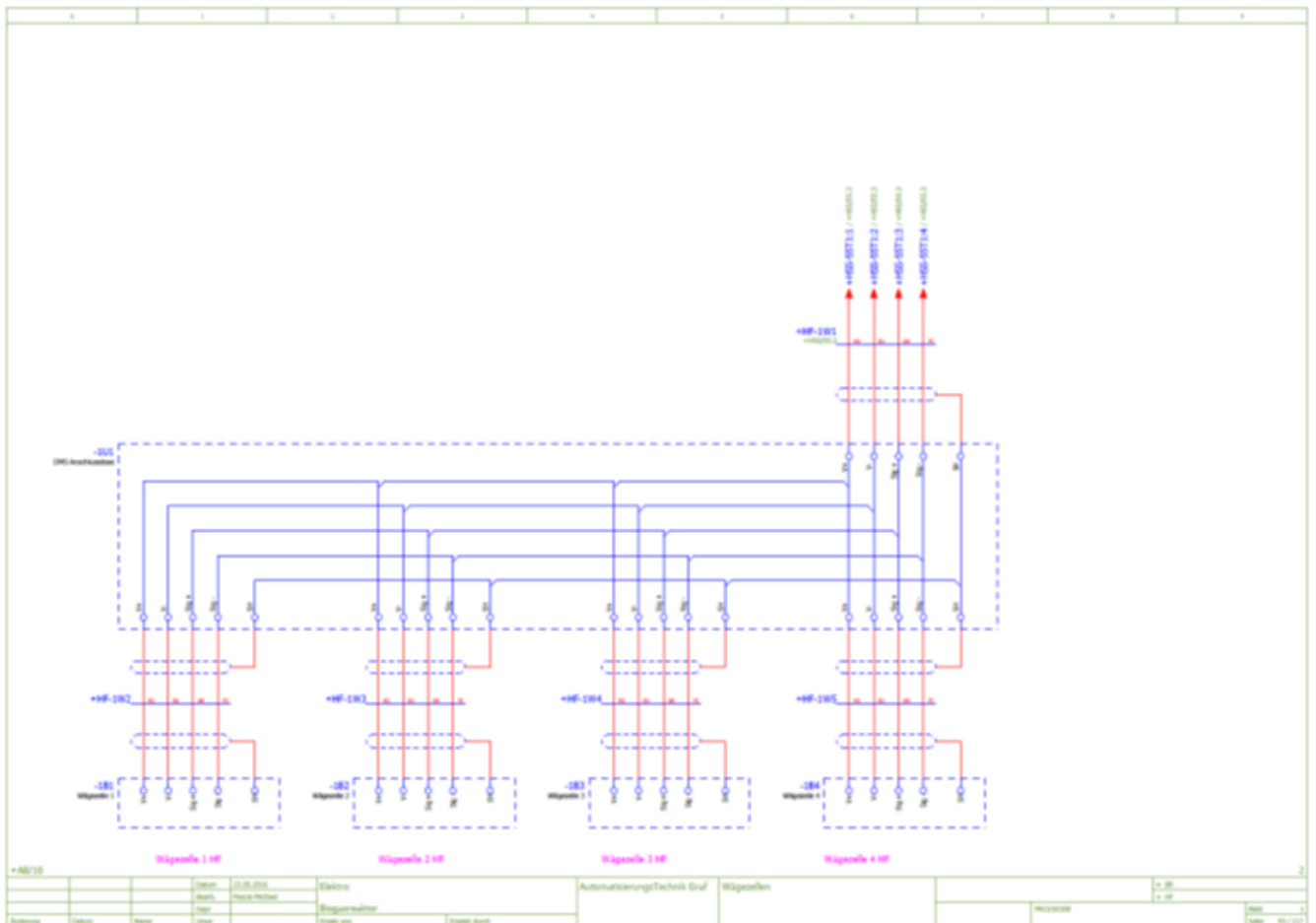


Abb. 47 Auszug Schaltplan Hauptfermenter (ATG 2016)

6.2.3 Bearbeitung genehmigungsrechtlicher Erfordernisse (Arbeitspaket 2.4)

Zur Überprüfung der Genehmigungsfähigkeit der Errichtung und des Betriebes der Pilot-Biogasanlage wurden durch den Unterauftragnehmer IWE mbH Abstimmungen mit der zuständigen Behörde im Landratsamt Vogtlandkreis, dem durch die ATG beauftragten Bauplanungsbüro Dipl.-Ing. Christian Suhr und der ATG GmbH geführt.

Mit dem Schreiben des Landratsamtes vom 17.05.2016 an die ATG wurde die Anlage als immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftig eingestuft (§ 22 BImSchG) und die Untere Bauaufsicht als federführendes Sachgebiet für die weitere Bearbeitung benannt.

.....
 Darstellung der
 wissenschaftlichen und
 technischen Ergebnisse

Da die Errichtung der Pilot-Biogasanlage am geplanten Aufstellungsort in die Abstandsflächenregelung der SächsBO (§ 6) fiel, wurden entsprechende Vereinbarungen zur Anerkennung der Abstandsflächen mit dem Eigentümer des Nachbargrundstückes, der BioEnergie Pöhl e. K. getroffen. Mit Eintritt der Insolvenz der BioEnergie Pöhl e. K. wurden diese Absprachen jedoch hinfällig.

Um dennoch eine Erfüllung der Projektziele zu ermöglichen wurden Alternativstandorte bewertet und weiterhin die Einbindung der neu zu errichtende Pilot-Biogasanlage in den Bestand der IKTS-Pilotanlage im Applikationszentrum Helmsgrün überprüft. In jedem Fall wären erhebliche Mehrkosten erforderlich gewesen, was zum Abbruch des Projektes führte.

6.2.4 Erstellung eines Sicherheitskonzeptes für die Pilot-Biogasanlage (Arbeitspaket 2.5)

Das Sicherheitskonzept wurde für die Steuerung der Anlage erstellt. Bei der aktuellen Komponentenwahl wurde darauf geachtet, dass diese, wenn notwendig, auch in den entsprechenden EX-Schutzzonen Verwendung finden dürfen.

Bei der Konstruktion und Aufstellungskonzeption der Pilot-Biogasanlage wurde darauf geachtet, das Gefährdungspotenzial so weit zu minimieren, dass so wenig kostenintensive Schutzeinrichtungen wie möglich integriert werden müssen.

Auf Basis der vorhandenen Planungsunterlagen wurde die Erstellung der erforderlichen Ex-Schutz-Dokumente vorgenommen und die folgenden Ex-Schutz-Zonen konnten ermittelt werden (Abb. 48 und Abb. 49).

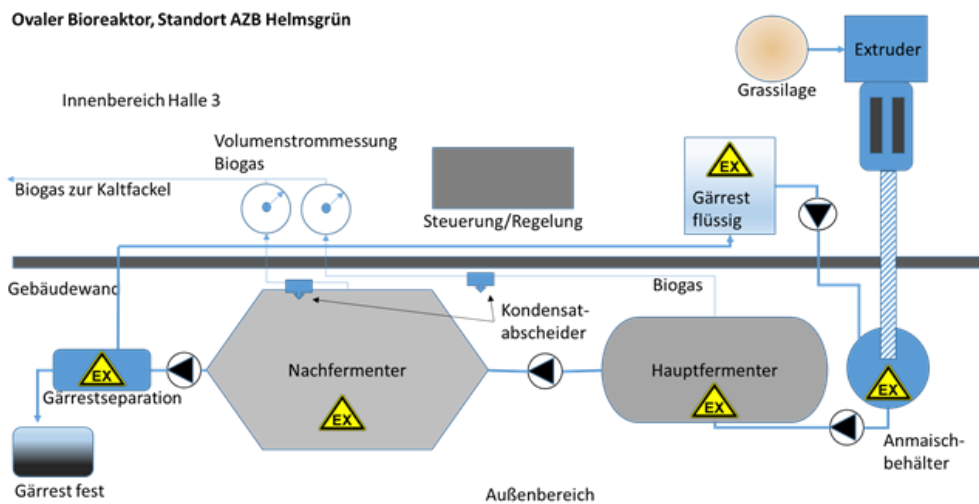


Abb. 48 EX-Zonenplan der Pilot-Biogasanlage

Gerät/Anlage	Zone 1	Zone 2
Abblase-Leitung Kaltfackel Anmischbehälter	Außerhalb, allseitig 1 m	Außerhalb, allseitig 3 m
Hauptfermenter + Nachfermenter	Außerhalb, allseitig 1 m	Außerhalb, allseitig 3 m
Innenraum der Fermenter		Oberhalb des Flüssigkeitsspiegels im Normalbetrieb keine Zone Störfall: Zone 2
Gaskissenspeicher		Außerhalb der Gaskissen innerhalb des Containers Zone 2 ganzer Raum
Abblaseleitung Kaltfackel	Außerhalb, allseitig 1 m	Außerhalb, allseitig 3 m
Gärrestentwässerung mit Tank	allseitig 1 m	allseitig 3 m

.....
Darstellung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse
.....

Abb. 49 EX-Schutz-Zonen der Pilot-Biogasanlage

Die genannten Ex-Schutz-Bereiche sind besonders bei der Gestaltung der Pump- und Antriebstechnik zu beachten.

6.2.5 Fertigungstechnische Umsetzung sowie bauliche Errichtung der Pilot – Biogasanlage (Arbeitspaket 2.6)

Mit der Errichtung der Pilot-Biogasanlage wurde begonnen. Einige Anlagenkomponenten, wie beispielsweise die Stahlkonstruktion, als Träger des 6-m³-Hauptfermenters konnten fertig gestellt werden.

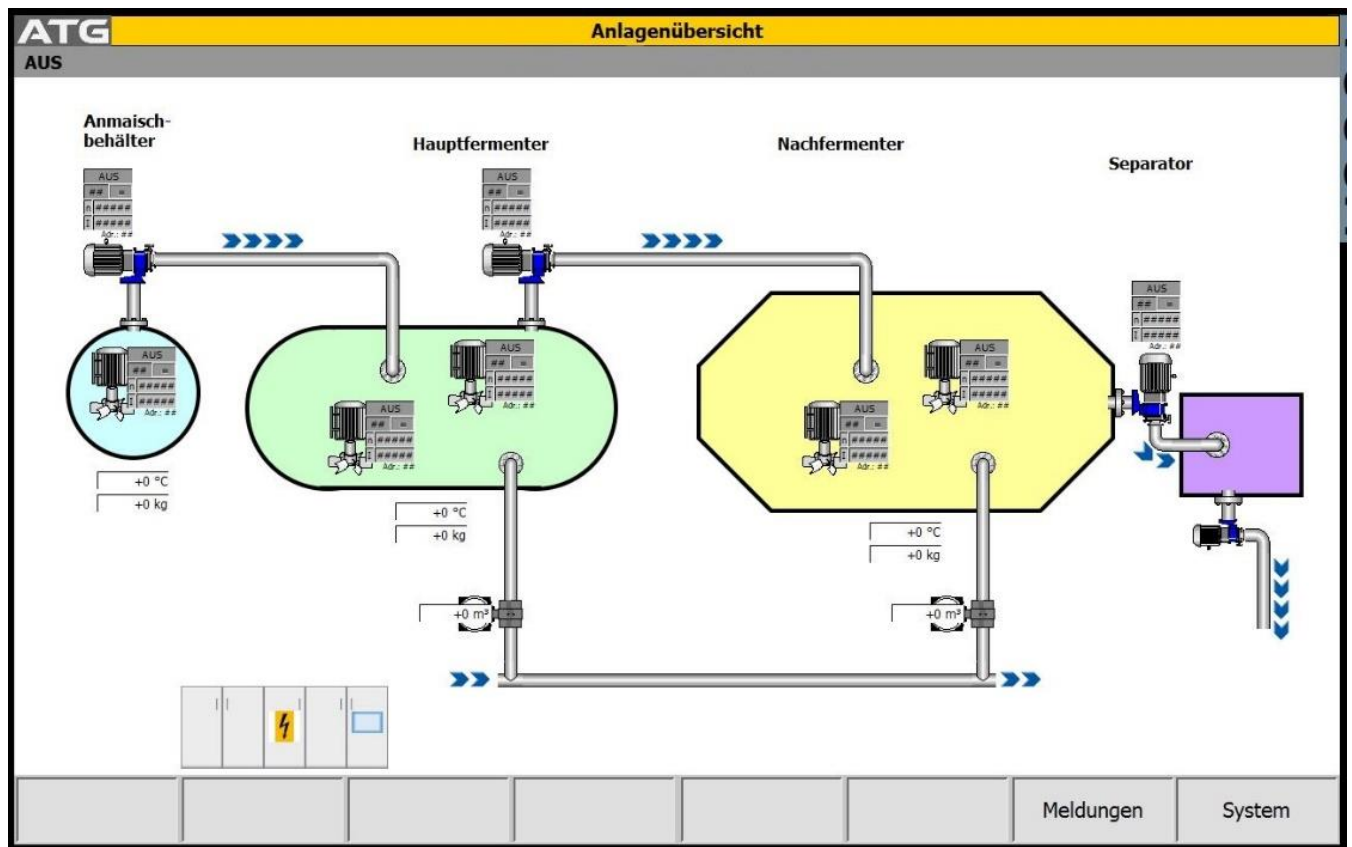


Abb. 50 Anlagenübersicht (ATG 2016)

6.2.6 Einsatz von Kunststoff für den Reaktorbau

Mit der Durchführung umfassender Recherchen wurde begonnen. Die Vor- und Nachteile der möglichen Materialien wurden substratspezifisch analysiert, entsprechende Auswahlkriterien erarbeitet und verschiedene Materialtests durchgeführt. Die ermittelten Ergebnisse sollten Aussagen zum Korrosionsverhalten bei einem Einsatz in der Biogas Technik bringen. Die Untersuchungen konnten nicht abgeschlossen werden, auch die wirtschaftliche Wertung des Einsatzes Kunststoff – Stahl ist offen geblieben.

6.3 Betrieb der Pilot-Biogasanlage, Verfahrenstechnische Validierung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit (AP 3, 4 und 5)

Infolge der Nichterreichung des Meilensteines 1, der Inbetriebnahme der Pilot-Biogasanlage, konnten die Arbeitspakete 3, 4 und 5 nicht bearbeitet werden.

6.4 Projektkoordination (AP 6)

Innerhalb der Projektbearbeitung wurden regelmäßige Verbund- und Arbeitstreffen organisiert und durchgeführt. Die Treffen dienten zur

- Verfahrensfestlegung und Auswahl der Anlagenkomponenten,
- Klärung planerischer Detailfragen,
- Abstimmung von Maßnahmen zur Minimierung der erforderlichen Baukosten der Pilot-Biogasanlage und
- Vorbereitung und Forcierung der Baugenehmigung.

6.5 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Ausgehend von vorliegenden Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab bietet die Einführung ovaler, mit Trennwänden unterteilter Reaktoren eine verfahrenstechnisch vorteilhafte Reaktorgeometrie. Im Vergleich zu traditionellen Biogasanlagen konnte in ovalen Reaktoren eine bessere Reaktorvermischung nachgewiesen werden, sodass eine signifikante Steigerung der Biogasausbeute erwartet wurde. Ziel des Verbundvorhabens war es, diese vorliegenden Ergebnisse in den technischen Maßstab zu skalieren und unter realen Praxisbedingungen zu überprüfen und weiter zu optimieren. Geplant war zunächst die Errichtung einer Modell- und Demonstrationsanlage 500 kW_{el}. Während der Projektbearbeitung musste diese Zielstellung dahingehend korrigiert werden, dass anstelle einer großtechnischen Modell- und Demonstrationsanlage eine mobile Pilot-Biogasanlage errichtet werden sollte und diese dann zur Demonstration der genannten verfahrenstechnischen Vorteile genutzt werden sollte.

Im Einzelnen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

1. Auf der Basis erarbeiteter Kennziffern zur verfahrenstechnischen Maßstabsübertragung und einer optimierten Reaktorgeometrie mit einem Verhältnis der Hauptabmessungen von $L:B:H = 5,6:1:1$ wurden die als Fermenter dienenden Reaktoren einschließlich der dazugehörigen Rührtechnik für die geplante Modell- und Demonstrationsanlage 500 kW_{el} ausgelegt.
2. Die Planung der Modell- und Demonstrationsanlage erfolgte unter Beachtung der aus dem Einsatz von Stahlfaserbeton resultierenden Anforderungen an die Baustatik. Neben der verfahrenstechnischen Auslegung wurden erforderliche Konzepte zum Substratmanagement und der Anlagensteuerung erstellt.
3. Infolge vorhandener Unsicherheiten nach Einführung des EEG 2014 konnte die geplante Errichtung der Modell- und Demonstrationsanlage nicht vorgenommen werden.
4. Die Entwicklung und Erprobung umfassender technologischer Maßnahmen zur Schaffung wirtschaftlicher Lösungen der Biogaserzeugung erfordert jedoch die Fortsetzung der auf diesem Sektor begonnenen Forschungstätigkeiten, wobei besonders praxisrelevante Lösungen für die Gesamtprozesskette der Biogaserzeugung und -verwertung in den Vordergrund zu stellen sind. Aus diesem Grund wurde mit dem Projektträger entschieden, die entwickelten Innovationen in einer neu zu errichtenden Pilot-Biogasanlage zu demonstrieren.
5. Ausgehend von der möglichen Vermarktung kleiner Biogasanlagen sollte die Pilot-Biogasanlage als mobile Anlage unter Beachtung der Abmessungen handelsüblicher Container errichtet werden. Unter Beachtung dieser Anforderungen und unter Nutzung der aufgestellten Kriterien zur verfahrenstechnischen Maßstabsübertragung wurde der Gesamtprozess in den Pilotmaßstab skaliert. Daraus folgend resultieren das Volumen des Hauptfermenters zu 6 m³ und das Volumen des Nachfermenters zu 12 m³.
6. In Abstimmung aller Verbundpartner sollte die Pilot-Biogasanlage auf dem Gelände der ATG GmbH in Helmsgrün in unmittelbarer Nähe zum Applikationszentrum Bioenergie (AZB) des IKTS errichtet werden. Die damit verbundene Grenzbebauung wurde durch den Besitzer des Nachbargrundstücks, der BioEnergie Pöhl e. K. als unproblematisch angesehen.

7. Im Verbund erfolgte die technisch/technologische Planung der Gesamtanlage. Die erforderliche Anlagengenehmigung wurde vorbereitet. Umfassende Optimierungsmaßnahmen zur technologischen Gestaltung der Pilot-Biogasanlage führten zu relevanten Einsparungen der erforderlichen Kosten zur Errichtung der Anlage.
8. Infolge eines am 28.10.2016 eröffneten Insolvenzverfahrens des Grundstücksnachbarn, der BioEnergie Pöhl und der Einwände des Insolvenzverwalters gegen diese Grenzbebauung wurde die Errichtung der Pilotanlage am geplanten Standort hinfällig.
9. Umfangreiche Überprüfungen möglicher Ausweichstandorte als auch eine Einbindung der ovalen Reaktoren in den Bestand der Pilot-Biogasanlage des IKTS wiesen einen erheblichen Mehraufwand an Kosten zur Errichtung der Anlage aus. Diese fehlenden Projektmittel konnten im Verbund nicht aufgebracht werden, sodass ein vorzeitiger Projektabbruch erforderlich wurde.

7 Verwertung der Projektergebnisse

Aufgrund des vorzeitigen Projektabbruchs konnte die Pilot-Biogasanlage nicht errichtet und die abschließende verfahrenstechnische Bewertung unter Praxisbedingungen nicht vorgenommen werden. Infolge der fehlenden Demonstration der postulierten Vorteile ovaler Reaktoren im Vergleich zu den in der Biogastechnik anzutreffenden zylindrischen Biogasreaktoren mit geringem Schlankheitsgrad ist eine Verwertung der Projektergebnisse nur sehr eingeschränkt möglich (siehe auch Abschnitt 10).

8 Zahlenmäßiger Nachweis

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgte separat durch die einzelnen Projektpartner.

9 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Focus des Gesamtvorhabens stand die Demonstration eines wirtschaftlichen und ökologischen Gesamtsystems zur effizienten Erzeugung von Biogas aus lignozellulosehaltigen Reststoffen mit den innovativen Prozessschritten

- Substratvorbehandlung,
- optimierter, energieeffizienter Reaktordurchmischung auf der Grundlage neuartiger Reaktorgeometrie (oval),
- intelligentes Steuer- und Regelsystem mit integrierter online Messtechnik zur Kontrolle der Fermentation (effizienter Abbauprozess von Biomasse)
- und effizienter und wirtschaftlicher Gärrestentwässerung.

Mit dem neu zu entwickelnden System sollen die bisher vorhandenen Nachteile bei Einsatz von hoch lignozellulosehaltigen Stoffen wie Ausbildung von Schwimmschichten, Realisierung sehr geringer Raumbelastungen und vor allem ungenügender Biogausausbeute beseitigt werden.

Aus diesem Grund war es sinnvoll und richtig, bei aufgetretenen Problemen wie

- vorhandenen Unsicherheiten nach der Einführung des EEG 2014
- oder Fragen bezüglich der Anlagengenehmigung

nach Möglichkeiten zu suchen, die eine Projektfortsetzung ermöglichen.

Durch umfangreiche technisch/technologische Anpassungen und aufwendige Planungsleistungen wurden mehrfach konstruktive Lösungen gefunden, die eine erfolgreiche Projekterfüllung in Aussicht stellen.

Die durchgeführten Arbeiten und aufgewandten Ressourcen waren daher notwendig und angemessen.

1 0 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der Verbund sieht nach wie vor in der Errichtung kleiner Biogasanlagen bis 150 kW_{el} eine vorhandene Nische auf dem derzeitigen Biogasmarkt. Infolge fehlender wirtschaftlicher Konzepte werden biogene Reststoffe in kleinen städtischen Kommunen nur sehr begrenzt einer energetischen Verwertung zugeführt. Ähnliches gilt für Ferienanlagen, Wochenendsiedlungen o. ä. Die nachfolgend aufgeführten Wirtschaftlichkeitsrechnungen auf Basis des EEG 2017 zeigen, dass unter Nutzung der innovativen Reaktorgeometrie sich ein wirtschaftlicher Anlagenbetrieb bereits für Anlagen ab 35 kW_{el} darstellen lässt.

Bewertung der Wirtschaftlichkeit kleiner Biogasanlagen

Insgesamt wurden drei Beispielrechnungen durchgeführt. Beispiel 1 bewertet die Errichtung einer Biogasanlage mit einer elektrischen Anschlussleistung von 35 kW_{el} zur Verwertung der anfallenden biogenen Reststoffe in einem Ferienpark. Beispiele 2 und 3 betrachten die Wirtschaftlichkeit einer kommunalen Biogasanlage 65 kW_{el}, die in einer Kleinstadt mit 10.000 Einwohnern betrieben wird. In Beispiel 2 werden analog dem Beispiel 1 die anzulegenden Werte für kleine Biogasanlagen < 150 kW_{el} entsprechend § 42 des EEG 2017 unter Beachtung der jährlich einsetzenden Degression von 1 % (§ 44a) und der in § 53 festgelegten Reduzierung der Einspeisevergütung um 0,2 ct/kWh_{el} genutzt. Unter dem Ansatz einer Inbetriebnahme im II. Quartal 2019 kann demnach eine Einspeisevergütung von 12,79 ct/kWh_{el} angesetzt werden.

Im Beispiel 3 wird angenommen, dass sich die Biogasanlage aus Beispiel 2 (erzeugte Leistung im Dauerbetrieb 65 kW_{el}) an der jährlichen Ausschreibung beteiligt. Zur Realisierung der dann geforderten Flexibilisierung soll die Anlage mit einem BHKW 130 kW_{el} und einem entsprechenden Gasspeichersystem ausgerüstet werden. Entsprechend § 39 des EEG und unter Beachtung der jährlichen Degression nach § 44a wird 2019 ein Ausschreibungsgebot von 14,50 ct/kWh_{el} gewählt. Durch Nutzung eines flexiblen Fahrplanes des BHKW kann im Mittel ein um 0,5 ct/kWh_{el} erhöhter Verkaufspreis im Vergleich zum Gebot erwirtschaftet werden. Unter zusätzlicher Beachtung des in § 50 des EEG geregelten Flex-Zuschlages ergibt sich damit eine Vergütung von 15,98 ct/kWh_{el}.

Die einzusetzenden Substrate und erzeugten Methanmengen zeigt Abb. 51. Die genutzten Stoffdaten einschließlich der angesetzten spezifischen Biogasausbeuten basieren auf Angaben der KTBL (KTBL-Biogasrechner) bzw. auf Erfahrungswerten des Fraunhofer IKTS. Bei der Berechnung des Gasertrages wurde der im Verbundprojekt zu verfolgende Ansatz einer Steigerung der Gasausbeute um circa 20 % im Vergleich zum traditionellen Anlagenbetrieb berücksichtigt.

	Beispiel 1 Ferienpark 35 kW_{el}	Beispiel 2 Kommunale BGA 65 kW_{el} Einspeisevergü- tung	Beispiel 3 Kommunale BGA 130 kW_{el} Ausschreibung
Einsatzstoffe	Grünschnitt 750 t/a Landschaftspflege 90t/a Biotonne 20 t/a	Grünschnitt kommunal Landschaftspflege Gartenabfälle Biotonne	480 t/a 150 t/a 580 t/a 500 t/a
Methananfall	98.300 Nm ³ /d	165.500 Nm ³ /d	
Fermentervolumen	165 m ³	330 m ³	
Wirkungs- grad BHKW	elektrisch 30 % thermisch 58 %	elektrisch 33 % thermisch 55 %	

Abb. 51 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Weiterhin wurde für die Berechnungen angenommen, dass sich die Investitionskosten für ovale Reaktoren gegenüber einer zylindrischen Bauweise nicht unterscheiden.

Auf der Basis der genannten Grundlagen wurden die zu erzielenden Einnahmen abgeleitet. Wie oben erläutert, beträgt die Einspeisevergütung in den Beispielen 1 und 2 jeweils 12,79 ct/kWh_{el}. Durch die Beteiligung am Ausschreibeverfahren und die Realisierung eines flexiblen Anlagenbetriebes kann im Beispiel 3 ein Erlös von 15,98 ct/kWh_{el} angesetzt werden.

Zusätzliche Einnahmen werden durch den Verkauf der erzeugten Wärme generiert. Es wird angenommen, dass jeweils 50 % der erzeugten Wärme verkauft werden kann. Für den Verkauf im Ferienpark wurden 2,50 ct/kWh_{th} angesetzt. Für die Einspeisung der Wärme in das kommunale Wärmenetz (Beispiele 2 und 3) wurde eine Vergütung von 3,50 ct/kWh_{th} veranschlagt.

In die Ermittlung der Einnahmen flossen neben den Erlösen aus dem Verkauf von Strom und Wärme die wegfallenden Kosten zur Entsorgung der biogenen Reststoffe ein. Entsprechend vorgenommenen Internetrecherchen betragen die Gebühren (netto) zur Entsorgung dieser Stoffe 50,00 – 60,00 EUR/t.

Die berechneten Einnahmen für die Beispiele 1 – 3 sind der Abb. 52 zu entnehmen.

Beispiel 1 Ferienpark 35 kW_{el} Einspeisevergütung	Beispiel 2 Kommunale BGA 65 kW_{el} Einspeisevergütung	Beispiel 3 Kommunale BGA 130 kW_{el} Ausschreibung
94.930 EUR/a	185.500 EUR/a	200.150 EUR/a

Abb. 52 Jährliche Einnahmen

Den Einnahmen stehen die erforderlichen Ausgaben zur Errichtung und den Betrieb der Biogasanlagen gegenüber. Zur Ermittlung der erforderlichen Anlagenkosten wurden von der FNR veröffentlichte spezifische Investitionskosten herangezogen und es wurde davon ausgegangen, dass die Investitionskosten zur Errichtung ovaler Reaktoren denen von zylindrischen Fermentern entsprechen. Für Beispiel 3 wurden zusätzliche Investitionskosten zur Überbauung des BHKW und zur Erweiterung des Gaslagersystems in Höhe von 1.000

EUR je überbautes kW_{el} angesetzt. Die für jedes Beispiel ermittelten Investitionskosten zeigt Abb. 53.

Die jährlich anfallenden Aufwendungen zum Betrieb der betrachteten Anlagen sind ebenfalls in Abb. 53 zusammengestellt. Bei allen Rechnungen wurde davon ausgegangen, dass keine Kosten für die einzusetzenden Substrate anfallen, da die Kommunen bzw. Ferieneinrichtungen über den erforderlichen Grünschnitt und das Landschaftspflegematerial selbst verfügen bzw. zur Entsorgung der Biotonne verpflichtet sind. Ausgenommen davon wurden in den Beispielrechnungen 2 und 3 Kosten zum Einsammeln der Biotonne in Höhe von 80 EUR/t veranschlagt. Diese Position wurde gewählt, da in einigen Kommunen für das Entsorgen der Biotonne keine Gebühren erhoben werden und damit die Aufwendungen der Kommune zuzuordnen sind. Weiterhin wurde angesetzt, dass keine Entsorgungskosten für den anfallenden Gärrest entstehen, da dieser einer Verwertung zugeführt wird. Gegebenenfalls aus dem Gärrest entstehende Einnahmen wurden ebenfalls nicht berücksichtigt.

Die Berechnungen der jährlichen Ausgaben basieren auf folgenden Grundlagen

- Annuität mittlerer Abschreibungszeitraum 10 a, Zinssatz 4 %
- Wartung/Ersatzteile 3,5 % der Investitionskosten (nach KTBL-Biogasrechner)
- Versicherungen 0,5 % der Investitionskosten (nach KTBL-Biogasrechner)
- Betriebsstoffe 2,7 % der Investitionskosten (nach KTBL-Biogasrechner)
- Personalkosten 500 h/a, 12 EUR/h (Annahme)
- Transport/Umschlag tonne 80,00 EUR/t (Leitfaden Verwertung Bioabfälle, Baden-Württemberg, 2015)

	Beispiel 1 Ferienpark 35 kW_{el}	Beispiel 2 Kommunale BGA 65 kW_{el} Einspeise- vergütung	Beispiel 3 Kommunale BGA 130 kW_{el} Aus- schreibung
Investitionskosten	440.700 EUR	601.500.910 EUR	660.910 EUR
Jährliche Ausgaben	82.600 EUR/a	160.860 EUR/a	167.690 EU/a

Abb. 53 Investitionskosten und jährliche Ausgaben

Im Ergebnis der angestellten Berechnungen kann der in Abb. 54 gezeigte Gewinn vor Steuern abgeleitet werden.

	Beispiel 1 Ferienpark 35 kW_{el}	Beispiel 2 Kommunale BGA 65 kW_{el} Einspeisevergütung	Beispiel 3 Kommunale BGA 130 kW_{el} Ausschreibung
	12.330 EUR/a	24.640 EUR/a	32.460 EUR/a

Abb. 54 Gewinn vor Steuern

Es wird auch für das EEG 2017 gezeigt, dass unter dem Ansatz nichtanfallender Substrat- und Entsorgungskosten kleine Biogasanlagen wirtschaftlich betrieben werden können. Diese Aussage sollte innerhalb des Projektes bestätigt werden.

Verwertung der Ergebnisse

Fortschritte auf dem Gebiet des
Vorhabens bei Dritten

Infolge des vorzeitigen Projektabbruchs und des fehlenden Nachweises der Vorzüge ovaler Biogas-Reaktoren kann der im Projektantrag formulierte Verwertungsplan nur sehr eingeschränkt erfüllt werden. Die angestrebte Vermarktung kleiner Biogasanlagen mit ovaler Reaktortechnik ist nicht gegeben.

Aufgrund der gezeigten wirtschaftlichen Erfolgsaussichten favorisieren die Projektpartner auch weiterhin eine Einbindung und Erprobung der ovalen Reaktortechnik. Im Rahmen geeigneter Projekte soll daher dieser Ansatz wieder aufgegriffen werden. Aufgrund der umfangreich gewonnenen Erfahrungen bei der Planung und Vorbereitung von Biogasreaktoren im Pilotmaßstab können weitere Projekte effektiv und kostengünstig realisiert werden.

Im Rahmen des Projektes konnte die ATG GmbH das Know-how bezüglich der technischen Ausbildung vor allem kleiner Biogasanlagen ausbauen und ihr vorhandenes Portfolio bezüglich des Anlagenbaus erweitern. Diese Kenntnisse sollen mittelfristig genutzt werden, um Anlagenteile wie beispielsweise die Anlagensteuerung zu vermarkten.

Durch eine aktive Öffentlichkeitsarbeit sollen die bis dato gesammelten Vorzüge ovaler Biogasreaktoren weiter verbreitet werden.

1 1 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei Dritten

Im Bearbeitungszeitraum wurden keine äquivalenten Arbeitsfortschritte im Bereich der Entwicklung und Anwendung neuartiger ovaler Reaktorsysteme erzielt und veröffentlicht.

1 2 Veröffentlichungen

- Vortrag Projekt-Neuvorstellung auf der 5. Statuskonferenz Energetische Biomassennutzung, Leipzig, 15.11.2013.
- Vortrag Jahrestreffen der Fachgruppen Extraktion und Mischvorgänge Heidelberg, 16. – 17. März 2015.

1 3 Literaturverzeichnis

ALVIRA, P.; TOMAS-PEJO, E.; BALLESTEROS, M.; NEGRO, M.J. (2010): Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review in *Bioresource Technology* 101 (2010) S. 4851-4861.

ATG 2016: Dokumente zur Anlagenplanung, Juni 2016.

BAUR, F.; HAUSER, E.: Rolle des Biogas im zukünftigen Energieversorgungssystem. FNR/KTBL-Kongress, Potsdam, 22./23.09.2015. BIOGASTECHNOLOGY V.B.T.S.

- GMBH (V.B.T.S. 2013): Neubau einer Biogasanlage. Tischvorlage für ein Arbeitstreffen beim Landratsamt Stendal, 17.10.2013.
- BÜCHE, W. (1937): Leistungsbedarf von Rührwerken. Zeitschrift Vereinigung deutscher Ingenieure, 81 (1937), S. 1065.
- BÜRGER; A. (2010): Firmeninformation der R.E.U.S. energy GmbH, Kirchdorf/Haag, 2010.
- DE 198 45 207 A1: Enzympräparation für die Verbesserung der Bioabbaubarkeit von Biomasse. Patenanmeldung, Karoly Kery, Anmeldung 01.10.1998
- DE 20 2008 017 612 U1: Biogasanlage zur Herstellung von Biogas durch anaerobe Nassvergärung eines Biomasse enthaltenen Substrats in einem einstufigen Durchflussverfahren. Gebrauchsmusterschrift, UTS Biogastechnik GmbH, Anmeldung 05.04.2008.
- DECKER, S. (2005): Zur Berechnung von gerührten Suspensionen mit dem Euler-Lagrange-Verfahren. Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, November 2005.
- DEUTSCHMANN, A.; JOBST, K.; FRIEDRICH, E.; ROSTALSKI, K.: Prozess-Tomographie – Die Möglichkeit der praxisnahen Bewertung und Optimierung von Mischprozessen. 5. Biogas-Innovationskongress, Osnabrück, 11./12.05.2012.
- EKATO Rühr- und Mischtechnik GmbH (2000). EKATO-Handbuch der Mischtechnik, 2. Auflage, ISBN 3-00-00 52 45-3.
- FIBERPIPE (2015): GFK-Behälter. <http://www.fiberpipe.de/gfk-behaelter> (Abruf 09.10.2015). FNR 22011611.
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR KERAMISCHE TECHNOLOGIEN UND SYSTEME (IKTS 2007): Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen mit integrierter Abwasser- und Klärschlammverwertung zur regenerativen Energieerzeugung über BHKW und Brennstoffzelle. Erhöhung der Effizienz der Biogasgewinnung und –Verwertung. Fördernummer SAB: 11424/1797, Dresden 2007.
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR KERAMISCHE TECHNOLOGIEN UND SYSTEME (IKTS, 2011): Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der nachhaltigen Energieversorgung aus Biomasse – Entwicklung der Biogaserzeugung als Zukunftstechnologie. Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion durch Nutzung alternativer biogener Substrate, energieeffiziente Substratvorbehandlung und innovative Prozessführung einschließlich Biogasnutzung in einer SOFC-Brennstoffzelle. SMWK-Technologieförderung, Sachbericht Fördernummer SAB: 12641/2094, Dresden, Juni 2011.
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR KERAMISCHE TECHNOLOGIEN UND SYSTEME (IKTS, 2012): Breitenwirksame, wirtschaftliche Biogasgewinnung aus hoch lignozellulosehaltigen biogenen Reststoffen. Verfahrenstechnische Entwicklung zur effizienten Erschließung und Nutzung zur effizienten Erschließung und Nutzung von holz- und halmgutartigen Reststoffen durch mechanisch-enzymatischen Aufschluss. Zwischenbericht BMU-Förderprojekt 03KB050A, Dresden, 2012.
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR KERAMISCHE TECHNOLOGIEN UND SYSTEME (IKTS, 2012a): Entwicklung, Anpassung und Langzeiterprobung von innovativer Prozesstechnik

- zur Biogaserzeugung unter großtechnischen Bedingungen. Entwicklung, Anpassung und Langzeiterprobung von innovativer Prozesstechnik zur Biogaserzeugung unter großtechnischen Bedingungen. SMWK-Technologieförderung, Sachbericht Fördernummer SAB: 13667/2349, Juni 2012.
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR KERAMISCHE TECHNOLOGIEN UND SYSTEME (IKTS, 2012b): Einfluss der Rührerintensität auf die Biogaserzeugung. Unveröffentlichter Laborbericht, Dresden, 2012.
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR KERAMISCHE TECHNOLOGIEN UND SYSTEME (IKTS, 2013): Entwicklung ovaler Reaktorsysteme auf der Grundlage einer neuartigen Stahlfaserbetontechnologie zur maßgeblichen Effizienzsteigerung aerober und anaerober Abbauprozesse bei verbesserter Wirtschaftlichkeit. Strömungstechnische Optimierung ovaler Reaktoren. SMWK-Technologieförderung, SAB-Fördernummer: 1.00116915, Zwischenbericht, April 2013.
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR KERAMISCHE TECHNOLOGIEN UND SYSTEME (IKTS, 2013a): Untersuchungen von Mischungssystemen in Biogasfermentern unter Einsatz der Prozess-Tomographie zur Entwicklung von Modellen für eine optimierte Systemauslegung. Quantifizierung von Mischprozessen in Biogasfermentern mittels Prozess-Tomographie. BMELV-Projektförderung, FNR-Fördernummer: 22011611, Zwischenbericht, April 2013.
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR KERAMISCHE TECHNOLOGIEN UND SYSTEME (IKTS, 2014): Demonstrationsvorhaben zur ökologisch und wirtschaftlich beispielhaften Gewinnung von Mehr-Biogas aus biogenen Reststoffen durch Einführung neuartiger ovaler Reaktorsysteme aus Stahlfaserbeton inklusive effizienter Mischtechnik und angepasster Substratvorbehandlung. BMWi-Projektförderung, Förderkennzeichen 03KB086 A, Zwischenbericht, Dresden, Februar 2014.
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR KERAMISCHE TECHNOLOGIEN UND SYSTEME (IKTS 2015): Demonstrationsvorhaben zur ökologisch und wirtschaftlich beispielhaften Gewinnung von Mehr-Biogas aus biogenen Reststoffen durch Einführung neuartiger ovaler Reaktorsysteme aus Stahlfaserbeton inklusive effizienter Mischtechnik und angepasster Substratvorbehandlung. BMWi-Projektförderung, Förderkennzeichen 03KB086 A, Zwischenbericht, Dresden, Februar 2015
- FREY, W. (2010): Durchmischen von Belebungsbecken mittels Belüftungssystemen. 6. Frankfurter Abwassersymposium, Juni 2010.
- FRIEDRICH, E.; FRIEDRICH, H.; LINCKE, M.; SCHWARZ, B.; WUFKA, A.; FABAUER, B.: Verbesserte Konvertierbarkeit lignocellulosehaltiger Substrate in der Nassfermentation – Extrusion von Stroh, Chemie Ingenieur Technik 82 (2010) Nr. 8.
- HELLMANN, D.-H. UND RIEGLER, G.(2003): Maschinenteknik in der Abwasserreinigung. Verfahren und Ausrüstung. WILEY-VCH-Verlag Weinheim, 2003, Seite 152.
- HILLEBRAND, GUDRUN (2008): Transportverhalten kohäsiver Sedimente in turbulenten Strömungen – Untersuchungen im offenen Kreisgerinne. Dissertation Universität Karlsruhe, Dezember 2008.
- IWE mbH: Grundlagenermittlung für ovales Behältersystem und Mischtechnik, Konzeption ovaler Reaktorsysteme, AZ 12-005, zum Verbundprojekt »Ovales Reaktorsystem«, Teilprojekt Stowasser Bau GmbH, SMWK-Technologieförderung, SAB-Fördernummer: 1.00116914; Radebeul 2012

- IWE-INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR WASSER UND ENTSORGUNG MBH (IWE 2012): Machbarkeitsstudie zur Erstellung eines praktikablen, anwendungsorientierten Bilanzierungs-Moduls für die zuverlässige Festlegung des Stoffstrommanagements incl. einer optimalen Substratzusammensetzung / Nährstoffverhältnisse für den sicheren, effizienten Betrieb von Biogasanlagen. Radebeul, 2012.
- IWE-INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR WASSER UND ENTSORGUNG MBH (IWE 2013): 1. Statusbericht zum Verbundprojekt „Ovaler BioReakt“. Radebeul, September 2013.
- IWE-INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR WASSER UND ENTSORGUNG MBH (IWE 2014): 4. Statusbericht zum Verbundprojekt „Ovaler BioReakt“. Radebeul, Juli 2014.
- IWE-INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR WASSER UND ENTSORGUNG MBH (IWE 2014): 3. Statusbericht zum Verbundprojekt „Ovaler BioReakt“. Radebeul, Januar 2014.
- IWE-INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR WASSER UND ENTSORGUNG MBH (IWE 2016): 11. Statusbericht zur Forschungs- und Entwicklungsleistung im Rahmen des Verbundvorhabens Ovaler BioReakt. Radebeul, September 2016.
- IWE-INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR WASSER UND ENTSORGUNG MBH (IWE 2017): Zuarbeit zum neu angepassten Reaktorkonzept im Projekt Ovaler BioReakt, Radebeul, Februar 2017.
- JOBST, K.; DEUTSCHMANN, A.; LOMTSCHER, A.; FRIEDRICH, E. (2011): Optimierung von Mischprozessen zur Biogaserzeugung. Ein Beitrag zur Steigerung der Effizienz von Biogasanlagen. Innovationskongress Biogas 2011, Osnabrück, 12/13.05.2011.
- JOBST, K.; DEUTSCHMANN, A.; LOMTSCHER, A.; FRIEDRICH, E. (2012): CFD vs. ERT – Der Vergleich zwischen Simulation und Realität. 15. Köthener Rührerkolloquium, Köthen, 14.06. 2012.
- KARIM, K.; HOFFMANN, K.; KLASSON, M.; AL-DAHAN, H.(2005): Anaerobic digestion of animal waste: effect of mode of mixing, Water Research, Volume 39, Seiten 3597-3606. KUBIN, K. (2004): Einfluss unterschiedlicher Verfahrenskonzepte auf Substratabbau und Nährstoffverwertung in Membranbelebungsanlagen zur kommunalen Abwasserreinigung. Dissertation TU Braunschweig, 2004.
- KUBIN, K. (2004): Einfluss unterschiedlicher Verfahrenskonzepte auf Substratabbau und Nährstoffverwertung in Membranbelebungsanlagen zur kommunalen Abwasserreinigung. Dissertation TU Braunschweig, 2004.
- LOMTSCHER, A.; JOBST, K.; DEUTSCHMANN, A.; FRIEDRICH, E. (IKTS) und ROSTALSKI, K. (KSB AG) (2011): Bewertung von Mischprozessen mittels Prozess-Tomographie. Ein neuer Weg zur Optimierung von Rührprozessen. 14. Köthener Rührerkolloquium., Köthen, 16.06.2011.
- MAEHNERT, P.: Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation Humboldt-Universität Berlin, 2007.
- MERSMANN, A.; EINENKEL, W.-D.; KÄPPEL, M.: Auslegung und Maßstabsvergrößerung in Rührapparaten. Chemie Ingenieur Technik 47 (1975) 23 S. 953-964.
- NAEVE, J. (2007): Fallbeispiele aus dem Beratungsalltag Biogas-gut-beraten. Fachtagung Bio- und Deponiegas, Nürnberg, 17.04.2007.

- OTT System GMBH (2012): Firmeninformation der OTT Group System GmbH. <http://www.ott-system.de/index>. 246 (Abruf vom 13.02.2012).
- PALATINUS, A.; GIOVANNINI, A.A. UND HUBER, M.B. (2007): Szenarien für die Ethanolproduktion aus Lignocellulose-Rohstoffen. In: Chemie Ingenieur Technik 79 (2007) Nr. 5, S. 657-662.
- RAUSCHENBACH PATENTANWÄLTE (RAUPAT 2014): Aktennotiz über eine Beratung zur Abgrenzung der FhG-Forschung zum Stand der Technik, 11.12.2014.
- SCHWARZ, B. et al (2011).: Möglichkeiten der Substratvorbehandlung – Stand und neue Entwicklungen. In: forum.new power 5 (2011) 19-23.
- STOWASSER BAU GMBH (2007): Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen mit integrierter Abwasser- und Klärschlammverwertung zur regenerativen Energieerzeugung über BHKW und Brennstoffzelle. Optimierung des Reaktorbaus von Biogasablagen. SMWA-Technologieförderung, SAB-Fördernummer 11426/1797, Roßwein, 2007.
- STOWASSER BAU GMBH (2011): Entwicklung der Biogaserzeugung als Zukunftstechnologie. Entwicklung neuer Reaktorbauweisen aus Stahlfaserbeton. SMWK Technologieförderung, Sachbericht Fördernummer SAB: 12642/2094, Roßwein, 2011.
- STOWASSER BAU GMBH (2012): Entwicklung, Anpassung und Langzeiterprobung von innovativer Prozesstechnik zur Biogaserzeugung unter großtechnischen Bedingungen. Langzeitbewertung von zylindrischen Reaktoren aus Stahlfaserbeton. SMWK-Technologieförderung, Sachbericht Fördernummer SAB: 13682/2349, Roßwein, 2012.
- THYSSENKRUPP (2015): Chemischer Behälter, Apparate und Anlagenbau. <http://www.thyssenkrupp-plastics.de/produkte/industrien/chemischer-behaelter-anlagen-und-apparatebau> (Abruf 09.10.2015).
- ZLOKARNIK, M. (1967): Eignung von Rührern zum Homogenisieren von Flüssigkeitsgemischen. Chemie-Ingenieur-Technik 39 (1967) 9/10 S. 539-548.
- ZLOKARNIK, M. (1999): Rührtechnik. Theorie und Praxis. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1999, S. 271ff.