



# Biotestverfahren zur Beurteilung der Verwertbarkeit organischer Rückstände in Biogasanlagen

Andreas Kottmair  
Dr. Klaus Hoppenheidt  
Prof. Wolfgang Mücke

Projektpartner  
Dr.-Ing. Klemens Finsterwalder  
Tobias Finsterwalder  
Bernhard Natterer



Auftraggeber

Bayerisches Staatsministerium für  
Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie



Teilprojekt Schwaben  
„Produktentwicklung für die Umweltbiotechnologie“



Impressum

Alle Rechte (insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung) sind vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Kein Teil der bifa-Texte darf in irgendeiner Form ohne Genehmigung der Herausgeber reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Herausgeber  
bifa Umweltinstitut GmbH  
Am Mittleren Moos 46  
86167 Augsburg

Verfasser  
Andreas Kottmair  
Dr. Klaus Hoppenheidt  
Prof. Wolfgang Mücke

Projektpartner  
Dr.-Ing. Klemens Finsterwalder  
Tobias Finsterwalder  
Bernhard Natterer

Auftraggeber  
Bayerisches Staatsministerium für  
Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie  
Prinzregentenstraße 28  
80538 München

Gestaltung  
Sonja Grazia D'Introno

Druck  
EDUCON GmbH

1. Auflage 2008  
© bifa Umweltinstitut

# **Biotestverfahren zur Beurteilung der Verwertbarkeit organischer Rückstände in Biogasanlagen**

Andreas Kottmair  
Dr. Klaus Hoppenheidt  
Prof. Dr. Dr. Wolfgang Mücke

Projektpartner  
Dr.-Ing. Klemens Finsterwalder  
Tobias Finsterwalder  
Bernhard Natterer

Auftraggeber  
Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie



## INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	II
TABELLENVERZEICHNIS .....	IV
1 KURZFASSUNG.....	1
2 AUFGABENSTELLUNG UND ZIEL DES VORHABENS .....	2
3 PROJEKTKONZEPT UND -MODULE .....	4
4 ÜBERGREIFENDE ENTWICKLUNGSARBEITEN UND METHODEN .....	5
4.1 Aufbau der Laborbiogasanlage <i>alba</i> .....	5
4.2 Versuchsaufbau diskontinuierliche Faulversuche .....	8
4.3 Bestimmung der Pufferkapazität.....	8
4.4 Bestimmung der Ammoniumkonzentration.....	9
4.5 Bestimmung der Acetat-Konzentration.....	9
5 ERGEBNISSE <i>BIOTIP</i> .....	10
5.1 Fragebogen Anlagenkennwerte.....	10
5.2 Elektronisches Betriebstagebuch .....	10
5.3 Bestimmung von Substratkennzahlen .....	11
5.3.1 Datenbank Substrate .....	11
5.3.2 Physikalisch-chemische Analysen.....	12
5.3.3 Diskontinuierliche Faulversuche .....	14
5.4 <b>Computersimulation</b> .....	16
5.4.1 Modellierung.....	16
5.4.2 Programmierung.....	23
5.5 <b>Validierung <i>biotip</i> (Faulversuche <i>alba</i>)</b> .....	26
5.5.1 ALBA-C08 – Vergärung von Speiseresten.....	26
5.5.2 ALBA-C11 – Vergärung von Maissilage.....	29
5.5.3 ALBA-C13 – Vergärung von Caseinpepton.....	31
5.5.4 ALBA-C14 – Vergärung von Grassilage .....	35
5.6 <b>Verifizierung <i>biotip</i> (Messprogramm Biogas)</b> .....	38
5.6.1 Anlage <i>BGA01</i> .....	38
5.6.2 Anlage <i>BMP02</i> .....	41
5.6.3 Anlage <i>BMP04</i> .....	44
5.6.4 Anlage <i>BMP05</i> .....	47
5.6.5 Anlage <i>BMP07</i> .....	50
6 PRAXISBEZUG DER PROJEKTARBEITEN.....	53
7 LITERATUR.....	56

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Quellen für Informationen zur Vergärbarkeit von Biomassen .....	2
Abbildung 3-1: „Ernährungsberatung für Biogasanlagen“ mit <i>biotip</i> .....	4
Abbildung 4-1: Beispiel für ein User-Interface der <i>alba</i> inklusive Fließschema (links); Anlagensteuerung <i>FieldPoint</i> (rechts).....	5
Abbildung 4-2: Probenahme an einem Reaktor der <i>alba</i> .....	6
Abbildung 4-3: Eudiometeranlage (links); schematischer Aufbau eines Testansatzes (rechts).....	8
Abbildung 5-1: Muster-Fragebogen Anlagenkennwerte .....	10
Abbildung 5-11: Lokalisierung der Substratbestandteile am Beispiel pflanzlicher Zellen .....	13
Abbildung 5-12: Analysenwerte Grassilage (Eingabeblatt in Excel).....	14
Abbildung 5-13: Versuchs-Schema diskontinuierliche Faulversuche .....	15
Abbildung 5-14: Verfahrenstechnische Grundlagen für das Simulationsmodul von <i>biotip</i> .....	17
Abbildung 5-15: Übersicht zu den wichtigsten Abbauwegen beim anaeroben Abbau von Biomassen (nach Bischofsberger et al., 2005, verändert).....	17
Abbildung 5-16: Abbaufunktion FITEC (Umsatzkoeffizient $F_{ab}$ dargestellt in %).....	19
Abbildung 5-17: pH-Wert als Funktion der Mengenanteile $CO_2$ / $H_2CO_3$ / $HCO_3^-$ und $CO_3^{2-}$ (Hütter, 1994) .....	21
Abbildung 5-18: Schematischer Ablauf der Simulationsrechnung .....	23
Abbildung 5-19: <i>biotip</i> -Ergebniskurven bei probabilistischer Betrachtung der Eingangsgrößen .....	24
Abbildung 5-22: Aufbereitung Speisreste, abgesiebte Bestandteile (links), Siebdurchgang (rechts) 26	26
Abbildung 5-23: Gaserträge ALBA-C08 .....	27
Abbildung 5-24: Verlauf Methan-Partialdruck ALBA-C08 (det = deterministisch).....	27
Abbildung 5-25: Verlauf pH-Wert ALBA-C08.....	28
Abbildung 5-26: Verlauf Pufferkapazität und Acetat ALBA-C08.....	28
Abbildung 5-27: Maissilage.....	29
Abbildung 5-28: Gaserträge ALBA-C11 .....	30
Abbildung 5-29: Verlauf Methan-Partialdruck ALBA-C11 .....	30
Abbildung 5-30: Verlauf pH-Wert ALBA-C11.....	31
Abbildung 5-31: Verlauf der Konzentrationen an Hydrogencarbonat und Acetat ALBA-C11 .....	31
Abbildung 5-32: Gaserträge ALBA-C13 .....	33
Abbildung 5-33: Verlauf Methan-Partialdruck ALBA-C13.....	33
Abbildung 5-34: Verlauf pH-Wert ALBA-C13.....	34
Abbildung 5-35: Verlauf Pufferkapazität und Acetat ALBA-C13.....	34
Abbildung 5-36: Verlauf der Ammoniumkonzentration ALBA-C13 .....	35
Abbildung 5-37: Gaserträge ALBA-C14 .....	36
Abbildung 5-38: Verlauf Methan-Partialdruck ALBA-C14.....	36
Abbildung 5-39: Verlauf pH-Wert ALBA-C14.....	37
Abbildung 5-40: Verlauf Pufferkapazität und Acetat ALBA-C14.....	37
Abbildung 5-41: Substratzufuhr Anlage <i>BGA01</i> .....	39
Abbildung 5-42: Biogasertrag Anlage <i>BGA01</i> .....	40
Abbildung 5-43: Anlage <i>BGA01</i> - pH-Wert, Pufferkapazität, Methanpartialdruck in der Simulation .....	40
Abbildung 5-44: Substratzufuhr <i>BMP02</i> .....	42
Abbildung 5-45: Methanertrag <i>BMP02</i> .....	43
Abbildung 5-46: Prognose pH-Wert und Pufferkapazität <i>BMP02</i> .....	43
Abbildung 5-47: Substratzufuhr <i>BMP04</i> .....	45
Abbildung 5-48: Methanertrag <i>BMP04</i> .....	46
Abbildung 5-49: <i>BMP04</i> - pH-Wert, Pufferkapazität, Methanpartialdruck in der Simulation.....	46
Abbildung 5-50: Substratzufuhr <i>BMP05</i> .....	48

---

Abbildung 5-51: Methanertrag <i>BMP05</i> .....	49
Abbildung 5-52: <i>BMP05</i> - pH-Wert, Pufferkapazität, Methanpartialdruck in der Simulation.....	49
Abbildung 5-53: Substratzufuhr <i>BMP07</i> .....	51
Abbildung 5-54: Methanertrag <i>BMP07</i> .....	52
Abbildung 5-55: <i>BMP07</i> - pH-Wert, Pufferkapazität, Methanpartialdruck in der Simulation.....	52
Abbildung 6-1: Entwicklung der Zahl der Anlagen in Deutschland und der installierten Leistung in Megawatt (Quelle: Bethge, 2004) .....	53
Abbildung 6-2: Ergebnisse der bifa-Umfrage zum Interesse an <i>biotip</i> .....	55

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Variable Prozessparameter der <i>alba</i> .....	6
Tabelle 4-2: Messgrößen, die mit der <i>alba</i> in Echtzeit erfasst werden können .....	7
Tabelle 5-1: Aufbau eines Datensatzes in der Gärstoffdatenbank.....	11
Tabelle 5-2: Physikalisch-chemische Substratanalysen .....	12
Tabelle 5-3: Ergebnisse Gärverhalten in diskontinuierlicher Kultur.....	14
Tabelle 5-4: Abbaugleichungen zur Modellierung ausgewählter Substratkomponenten .....	18
Tabelle 5-5: geschätzte Parameter für den Abbau von Essigsäure.....	20
Tabelle 5-7: Mengengerüst Substrate <i>BGA01</i> .....	38
Tabelle 5-8: Behälter-Volumina <i>BGA01</i> .....	38
Tabelle 5-9: Energieangaben <i>BGA01</i> .....	39
Tabelle 5-10: Mengengerüst Substrate <i>BMP02</i> .....	41
Tabelle 5-11: Behälter-Volumina <i>BMP02</i> .....	41
Tabelle 5-12: Energieangaben <i>BMP02</i> .....	41
Tabelle 5-13: Mengengerüst Substrate <i>BMP04</i> .....	44
Tabelle 5-14: Behälter-Volumina <i>BMP04</i> .....	44
Tabelle 5-15: Energieangaben <i>BMP04</i> .....	44
Tabelle 5-16: Mengengerüst Substrate <i>BMP05</i> .....	47
Tabelle 5-17: Behälter-Volumina <i>BMP05</i> .....	47
Tabelle 5-18: Energieangaben <i>BMP05</i> .....	48
Tabelle 5-19: Mengengerüst Substrate <i>BMP07</i> .....	50
Tabelle 5-20: Behälter-Volumina <i>BMP07</i> .....	50
Tabelle 5-21: Energieangaben <i>BMP07</i> .....	51



## 1 Kurzfassung

Der Betreiber einer Biogasanlage steht grundsätzlich vor dem Problem, dass er für eine möglichst vielfältige und – aus Sicht der Prozessstabilität – sichere Verwertung von Substraten deren Vergärungseigenschaften kennen muss. Methode der Wahl ist hierbei bislang die Durchführung von diskontinuierlichen Labor-Faulversuchen („Batchversuche“), mit deren Hilfe sich der potenzielle Biogasertrag, die Biogaszusammensetzung und ggf. auch akut toxische Wirkungen bestimmen lassen. Da sich die Bedingungen in einem Batchversuch jedoch grundlegend von den Bedingungen in einer realen Biogasanlage unterscheiden, können auf diese Weise längst nicht alle wichtigen Informationen gewonnen werden. Dies gilt insbesondere für Wirkungen, die sich erst bei einem längeren Betrieb der Anlage ergeben, wie beispielsweise die Akkumulation von Hemmstoffen, der Einfluss des Substrats auf die Pufferkapazität und den pH-Wert im Reaktor oder aber Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Substraten. Letztlich führen fehlende Informationen dazu, dass der Anlagenbetreiber Substrate entweder nicht oder unter Umständen nur wenig effizient zur Erzeugung von Biogas nutzen kann. Dies wiederum kann für den Betreiber deutliche Einbußen bei der Wirtschaftlichkeit seiner Biogasanlage mit sich bringen.

Um diese Situation zu verbessern, haben die Projektpartner unter dem Namen *biotip* eine Reihe von Werkzeugen entwickelt, mit deren Hilfe Anlagenbetreibern alle für den optimalen Betrieb ihrer Biogasanlage notwendigen Informationen hinsichtlich der Vergärungseigenschaften von Substraten zur Verfügung gestellt werden können. Für die Bewertung der Verwertbarkeit von Substraten in einer Biogasanlage werden zunächst mit Hilfe eines Fragebogens die wichtigsten Anlagenkennwerte, wie beispielsweise Anzahl und Größe der Faulbehälter, aufgenommen. Die (geplante) Substratzufuhr wird anschließend mit Hilfe eines elektronischen Betriebstagebuchs in standardisierter Form erfasst. Für die weitere Bewertung müssen verschiedene Substratkennzahlen, zum Beispiel der Gehalt an Trockensubstanz, bekannt sein. Diese können entweder einer zugehörigen Datenbank entnommen oder aber analytisch bzw. in Batchversuchen bestimmt werden. Langzeitwirkungen von Substratinhaltsstoffen lassen sich zudem in einer automatisierten Laborbiogasanlage (alba) untersuchen. Die gesammelten Informationen werden schließlich dazu verwendet, den Prozessverlauf in der Biogasanlage in einer Computersimulation abzubilden. Aus der Prognose lassen sich wiederum Empfehlungen für die Prozessführung und für die Zusammensetzung des Inputs ableiten. Damit kann zukünftig eine „Ernährungsberatung für Biogasanlagen“ realisiert und am Markt angeboten werden.

## 2 Aufgabenstellung und Ziel des Vorhabens

Der Betreiber einer Biogasanlage steht grundsätzlich vor dem Problem, dass er für eine möglichst vielfältige und – aus Sicht der Prozessstabilität – sichere Verwertung von Substraten deren Vergärungseigenschaften kennen muss. Bei gängigen Substraten kann sich der Betreiber, je nachdem, welche Quellen ihm zur Verfügung stehen, oft auf die Erfahrungen anderer Betreiber oder auf Literaturdaten stützen (Abbildung 2-1). Aus diesen Informationen kann er im Regelfall jedoch auch nur mehr oder weniger grobe Richtwerte ableiten, da jede Anlage ihre spezifischen Besonderheiten – sei es bei der Anlagenkonfiguration oder bei der Prozessführung – aufweist.

Bereich der PRAXIS	Bereich der FORSCHUNG
<i>Informationsbeschaffung für <u>gängige</u> Substrate</i>	
<b>→ Erfahrungswerte z. B.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- eigene Erfahrungen</li> <li>- persönliche Kontakte               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fachverbände</li> </ul> </li> <li>- Publikationen (Bücher, Fachzeitschriften, Internet)</li> <li>- Informationsveranstaltungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dissertationen</li> </ul>
<i>Informationsbeschaffung für <u>bislang nicht verwertete</u> Substrate</i>	
<b>→ "Ausprobieren" auf der eigenen Biogasanlage</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- hohes Risiko</li> <li>- langwierig</li> </ul>	
<b>→ Faulversuche in statischer Kultur</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- teilweise genormt (Konventionenmethoden)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- relativ preiswert</li> <li>- beschränkte Aussagekraft</li> <li>- beschränkte Reproduzierbarkeit</li> </ul> </li> <li>- oft nur Biogasproduktion (ohne Methananteil)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- langwierige Versuche</li> </ul> </li> </ul>	
<b>→ Faulversuche in kontinuierlicher Kultur</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- relativ teuer</li> <li>- spezielle Anwendungsfälle</li> <li>- langwierige Etablierung der Kulturen</li> <li>- bislang kein "Standardsystem" verfügbar</li> </ul>	

Abbildung 2-1: Quellen für Informationen zur Vergärbarkeit von Biomassen

Bei bislang nicht verwerteten Substraten bleibt dem Betreiber in jedem Fall nur die Möglichkeit, durch Versuchsreihen auf der eigenen Anlage oder durch die Beauftragung von Laborversuchen weitere Informationen zu gewinnen. Methode der Wahl ist hierbei bislang die Durchführung von diskontinuierlichen Labor-Faulversuchen („Batchversuche“), mit deren Hilfe sich der potenzielle Biogasertrag, die Biogaszusammensetzung und ggf. auch akut toxische Wirkungen bestimmen lassen. Da sich die Bedingungen in einem Batchversuch jedoch grundlegend von den Bedingungen in einer realen Biogasanlage unterscheiden, können auf diese Weise längst nicht alle wichtigen Informationen gewonnen werden. Dies

gilt insbesondere für Wirkungen, die sich erst bei einem längeren Betrieb der Anlage ergeben, wie beispielsweise die Akkumulation von Hemmstoffen, der Einfluss des Substrats auf die Pufferkapazität und den pH-Wert im Reaktor oder aber Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Substraten.

Versuche auf der eigenen Anlage sind in jedem Fall mit größeren Risiken behaftet, da ein „Ausprobieren“ den Faulprozess im ungünstigsten Fall durchaus auch zum Erliegen bringen kann. Durch den anschließenden, wochenlangen Stillstand der Anlage und die Kosten für die Entsorgung des Reaktorinhaltes können bereits bei einer mittelgroßen Anlage (z. B. Faulraumvolumen 1.000 m<sup>3</sup>, Leistung 100 kW<sub>el</sub>) ohne weiteres finanzielle Verluste in fünfstelliger Höhe entstehen.

Hinzu kommt, dass sowohl Labor- wie auch Praxisversuche im Regelfall viel Zeit (mehrere Wochen) benötigen, die dem Betreiber aber wegen begrenzter Lagerkapazität oder Haltbarkeit der Substrate oft nicht zur Verfügung steht. Letztlich führen fehlende Informationen dazu, dass der Anlagenbetreiber Substrate entweder nicht oder unter Umständen nur wenig effizient zur Erzeugung von Biogas nutzen kann. Dies wiederum kann für den Betreiber deutliche Einbußen bei der Wirtschaftlichkeit seiner Biogasanlage mit sich bringen.

Um die derzeitige Situation in Zukunft zu verbessern, haben die bifa und die Finsterwalder Umwelttechnik GmbH folgende Zielsetzung verfolgt:

Ziel des Vorhabens war es, Werkzeuge zu entwickeln, mit deren Hilfe Anlagenbetreibern alle für den optimalen Betrieb ihrer Biogasanlage notwendigen Informationen hinsichtlich der Vergärungseigenschaften von Substraten zur Verfügung gestellt werden können. Das zusätzliche Know-how soll Anlagenbetreibern in Zukunft dabei helfen, die Wirtschaftlichkeit ihrer Biogasanlagen weiter zu steigern, um so Wettbewerbsvorteile für bayerische Unternehmen im Bereich der Biogastechnologie zu erzielen.

### 3 Projektkonzept und -module

Die Projektpartner haben unter dem Namen *biotip* eine Reihe von Werkzeugen entwickelt, mit deren Hilfe die Verwertbarkeit von Substraten in einer Biogasanlage beurteilt werden kann. Abbildung 3-1 zeigt die einzelnen Werkzeuge von *biotip* und an welcher Schnittstelle sie im Ablaufschema der Substratbewertung eingesetzt werden.

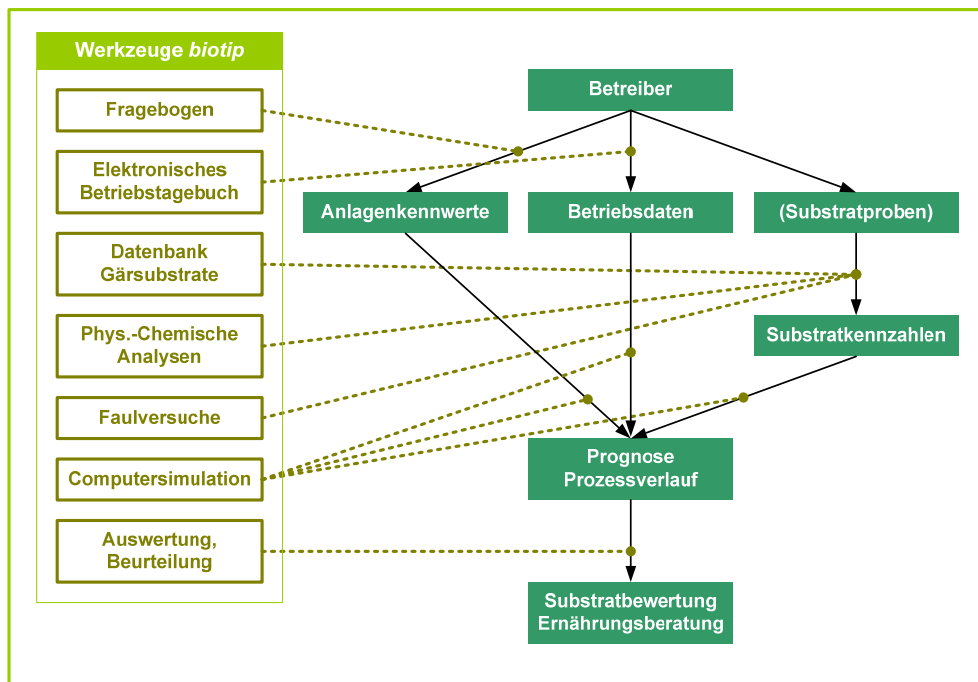


Abbildung 3-1: „Ernährungsberatung für Biogasanlagen“ mit *biotip*

Für die Bewertung der Verwertbarkeit von Substraten in einer Biogasanlage werden zunächst mit Hilfe eines Fragebogens die wichtigsten Anlagenkennwerte, wie beispielsweise Anzahl und Größe der Faulbehälter, aufgenommen. Die (geplante) Substratzufuhr wird anschließend mit Hilfe eines elektronischen Betriebstagebuchs in standardisierter Form erfasst. Für die weitere Bewertung müssen verschiedene Substratkennzahlen, zum Beispiel der Gehalt an Trockensubstanz, bekannt sein. Diese können entweder einer zugehörigen Datenbank entnommen oder aber analytisch bzw. in Batchversuchen bestimmt werden. Langzeitwirkungen von Substratinhaltsstoffen lassen sich zudem in einer automatisierten Laborbiogasanlage (alba) untersuchen. Die gesammelten Informationen werden schließlich dazu verwendet, den Prozessverlauf in der Biogasanlage in einer Computersimulation abzubilden. Aus der Prognose lassen sich wiederum Empfehlungen für die Prozessführung und für die Zusammensetzung des Inputs ableiten.

## 4 Übergreifende Entwicklungsarbeiten und Methoden

### 4.1 Aufbau der Laborbiogasanlage *alba*

Der Aufbau einer automatisierten Laborbiogasanlage (*alba*) war für *biotip* von essentieller Bedeutung. Die *alba* wurde insbesondere als Testumgebung zur Entwicklung und Validierung des mathematischen Modells, das Grundlage für das Simulationsmodul von *biotip* ist, benötigt (siehe Kapitel 5.4).

Nachfolgend werden der Aufbau und die wesentlichen Leistungsmerkmale der *alba* beschrieben.

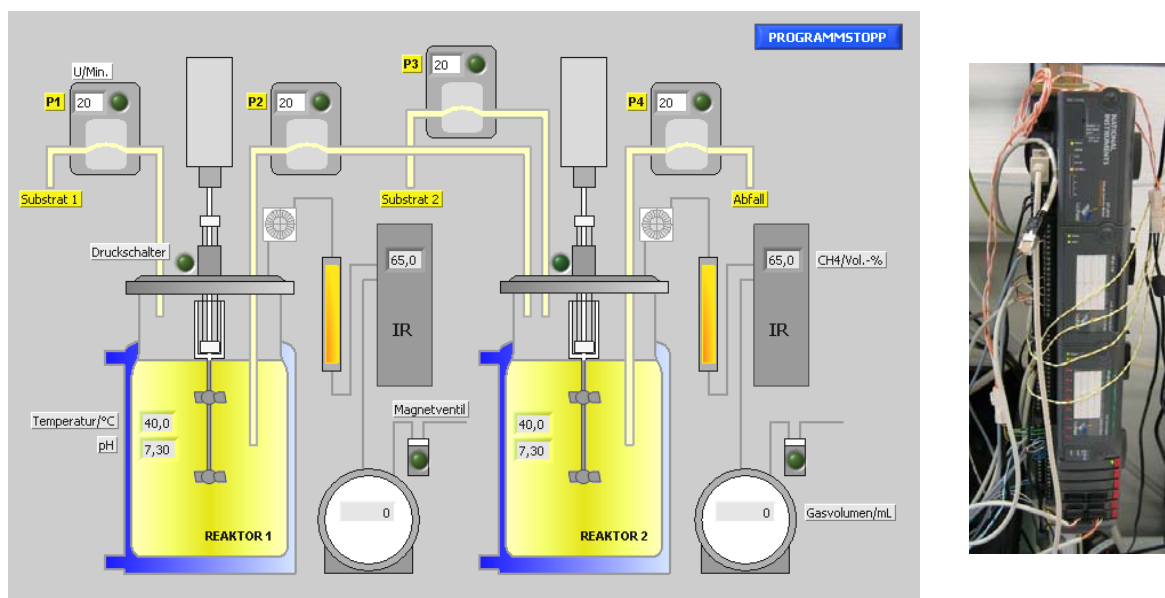


Abbildung 4-1: Beispiel für ein User-Interface der *alba* inklusive Fließschema (links); Anlagensteuerung *FieldPoint* (rechts)

Die *alba* ist eine, aufgrund ihrer Modularität sowohl bei der Hard- als auch bei der Software, sehr flexibel einsetzbare Laborbiogasanlage, die maximal 3 Fermenter umfasst. Sie wird im Regelbetrieb vollautomatisch gesteuert und zeichnet kontinuierlich Daten auf einer *CompactFlash*-Karte mit 32 MB Speicherkapazität auf. Die Software zur Anlagensteuerung wurde mit der Entwicklungsumgebung *Lab-View 7.0* von National Instruments erstellt (Abbildung 4-1, links). Auf Seiten der Hardware kommt bei der Steuerung der Anlage eine *FieldPoint* zum Einsatz (Abbildung 4-1, rechts). Eine Besonderheit stellt die Verwendung so genannter *RT-Module* dar. Dabei handelt es sich um Software-Erweiterungen, die es der *FieldPoint* erlauben, die *alba* völlig autark zu steuern. Dies ist Voraussetzung, um die *alba* prinzipiell auch vor Ort einer Biogasanlage betreiben zu können. Darüber hinaus steigert die Verwendung der *RT-Module* die Zuverlässigkeit der Steuerung, da die Anlage unabhängig vom Netzwerk oder einem PC in der Peripherie betrieben werden kann. Die Daten können als Textfile via *ftp-Protokoll* an einen beliebigen Rechner übertragen werden. Dort erfolgt die weitere Auswertung und grafische Anzeige der aufgezeichneten Daten. Ebenfalls lässt sich der Anlagenzustand über das *http-Protokoll* prinzipiell weltweit abrufen, wenn eine Netzwerkverbindung zur *alba* besteht.

Die Reaktoren der *alba* bestehen aus Doppelmantelreaktionsgefäßen aus Glas mit einem Reaktorvolumen von jeweils 17,4 Litern, die über einen Thermostaten temperiert werden. Durchmischt werden die Reaktoren über Glasrührer, die im unteren Teil durch eine flüssigkeitsgefüllte Tauchglocke gegenüber dem Faulschlamm abgedichtet sind. Der Antrieb der Rührer erfolgt mit Rührantrieben der Fa. Heidolph.



Abbildung 4-2: Probenahme an einem Reaktor der *alba*

Feststoffreiche Substrate können in die *alba* manuell über eine Probenahmestelle zugegeben werden. Pumpfähige Substrate lassen sich über Schlauchpumpen zuführen. Die Steuerung der Pumpen kann über ein weiteres *LabView*-Programm-Modul erfolgen. Der Schlammaustrag kann manuell oder ebenfalls mittels einer Schlauchpumpe erfolgen.

Das Biogas aus den Reaktoren wird jeweils durch einen Gaskühler aus Glas, der wiederum von einem Peltier-Element auf ca. 15 °C gekühlt wird, geleitet. Dies verhindert die Bildung von Kondenswasser in den darauf folgenden Leitungen. An den Gaskühler schließt sich ein Adsorber an, der das H<sub>2</sub>S aus dem Biogas entfernt. Danach erfolgt mittels IR-Analysator die Bestimmung des Methangehalts im Biogas. Schließlich wird der Gasertrag mit einem Trommelgaszähler erfasst. Der Gasstrom wird hierzu durch ein Magnetventil, das sich an den Trommelgaszähler anschließt, geregelt. Erst wenn sich im Reaktor ein Überdruck von etwa 10 hPa aufgebaut hat – die Detektion erfolgt durch einen Druckwächter – gibt das Programm das Magnetventil für eine definierte Zeit frei und der Trommelgaszähler erfasst das im Intervall seit der letzten Öffnung des Magnetventils erzeugte Biogas.

Die Tabelle 4-1 und die Tabelle 4-2 fassen die variablen Prozessparameter und die Messgrößen, die mit der *alba* erfasst werden können, zusammen.

Tabelle 4-1: Variable Prozessparameter der *alba*

Parameter	Einheit	Bereich	Standard
Reaktortemperatur	°C	~ 2 bis ~ 80	~ 37
HRT <sup>1)</sup>	Tage	~ 0,01 bis > 200	~ 30
pH-Wert	--	~ 5 bis ~ 9	~ 7,2
Rührgeschwindigkeit	U./Min.	0 bis ~ 400	~ 125

<sup>1)</sup> hydraulische Verweilzeit

Tabelle 4-2: Messgrößen, die mit der *alba* in Echtzeit erfasst werden können

Parameter	Einheit	Erfassung
Reaktortemperatur	°C	Standard
pH-Wert		Standard
Biogasertrag	mL	Standard
CH <sub>4</sub> im Biogas	Vol.-%	Standard
HRT <sup>1)</sup>	Tage	optional
Redoxpotenzial	mV	optional
Rührgeschwindigkeit	U./min	optional

<sup>1)</sup> hydraulische Verweilzeit; <sup>\*\*)</sup> Eigenbau

## 4.2 Versuchsaufbau diskontinuierliche Faulversuche

Zur Ermittlung Substrat-spezifischer Kennzahlen wurden Faulversuche in einer Eudiometeranlage durchgeführt. Der Versuchsaufbau (Abbildung 4-3) orientierte sich dabei an den Vorgaben der *DIN 38414 S8*.

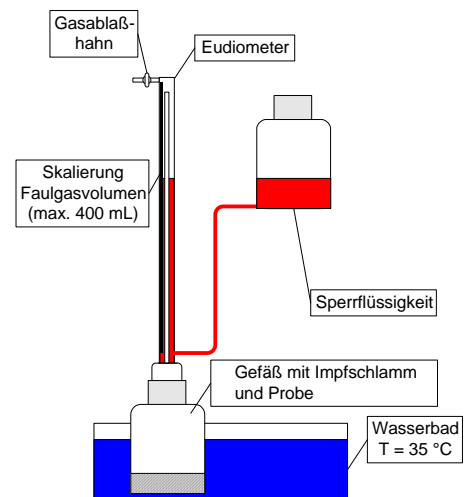


Abbildung 4-3: Eudiometeranlage (links); schematischer Aufbau eines Testansatzes (rechts)

### Testprinzip

Das in einem temperierten Glasgefäß während des Versuchs produzierte Biogas verdrängt über ein Steigrohr Sperrflüssigkeit aus einem skalierten Eudiometerrohr in einen Ausgleichsbehälter. Nach dem manuellen Ausgleich der Sperrflüssigkeitspegel im Eudiometerrohr und im Ausgleichsbehälter wird das produzierte Biogasvolumen abgelesen und mit Hilfe des Umgebungsdrucks wie auch der Umgebungstemperatur in das zugehörige Normvolumen ( $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ;  $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ ) umgerechnet. In jeder Testreihe werden Blindansätze mitgeführt, die nur Faulschlamm enthalten. Die Biogasproduktion aus einer Testsubstanz wird schließlich aus der Differenz der im Testansatz produzierten Biogasmenge und der im Mittel in den Blindansätzen produzierten Biogasmenge berechnet.

## 4.3 Bestimmung der Pufferkapazität

Bei den durchgeführten kontinuierlichen Faulversuchen wurde regelmäßig die Pufferkapazität in Faulschlammproben bestimmt. Die Analyse erfolgte gemäß EN ISO 9963-2 mittels Titration. Alternativ dazu wurde die Konzentration an Hydrogencarbonat<sup>1</sup> im Faulschlamm bestimmt. Hierzu wurde der Schlamm mit Salzsäure angesäuert, das dadurch aus dem Hydrogencarbonat freigesetzte  $\text{CO}_2$ -Volumen bestimmt und daraus wiederum die äquivalente Menge an Hydrogencarbonat berechnet.

<sup>1</sup> Hydrogencarbonat dominiert in Faulschlämmen die Pufferkapazität



#### 4.4 Bestimmung der Ammoniumkonzentration

Neben der Pufferkapazität wurde regelmäßig die Konzentration an gelöstem Ammonium bestimmt. Die Faulschlammproben wurden hierfür zunächst zentrifugiert, bis kein Feststoff mehr im Überstand erkennbar war. Anschließend wurde der Überstand über einen Membranfilter mit 0,45 µm nominaler Porengröße filtriert. Das Filtrat war die jeweilige Analysenprobe. Der Ammoniumgehalt in den Analysenproben wurde mit Hilfe eines Küvettentests photometrisch bestimmt.

#### 4.5 Bestimmung der Acetat-Konzentration

Ebenfalls wurde regelmäßig der Gehalt an Flüchtigen Organischen Säuren (FOS) als Maß für die Acetatkonzentration im Faulschlamm bestimmt<sup>2</sup>. Die Probenaufbereitung erfolgte hierzu analog zur Beschreibung in Kapitel 4.4. Der summarische Gehalt an FOS wurde photometrisch mittels Küvettentest analysiert und als Acetat-Equivalente angegeben.

---

<sup>2</sup> Acetat dominiert in Faulschlämmen den Wert für die FOS

## 5 Ergebnisse *biotip*

Nachfolgend werden die im Forschungsvorhaben entwickelten *biotip*-Werkzeuge im Einzelnen beschrieben.

### 5.1 Fragebogen Anlagenkennwerte

Zu Beginn der Ernährungsberatung mit *biotip* werden zunächst mit Hilfe eines Fragebogens die für die Computersimulation relevanten verfahrenstechnischen Aspekte einer Biogasanlage erhoben. Abbildung 5-1 zeigt einen Muster-Fragebogen.

**Fragebogen Anlagenkennwerte** Seite 1

Datenerfassung am

1. Allgemeine Angaben				
Betriebsname				
Adresse				
Ansprechpartner				
Tel.				
Fax.				
Email				
Mobil				
Web				

2. Mengengerüst Substrate				
Substrat	Bezeichnung	Menge (Mg/Jahr)	TM-Gehalt (% FM)	Hinweise
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

TM .. Trockenmasse; FM .. Feuchtmasse

Seite 2

3. Mengengerüst Behälter-Volumina					
Behälter	Teilprozess (1 = Hydrolyse, 2 = Hauptfermenter, 3 = Nachgärer, 4 = Gärückstandslager)	Bauform (s = stehend, l = liegend)	Arbeitsvolumen (m <sup>3</sup> )	Temperatur (°C)	Gasferfassung ja/nein
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

4. Skizze Prozess-Schema

5. Energie				
installierte elektrische Leistung		kWel		
jährliche Stromproduktion gesamt		kWh/Jahr		
BHKW	Typ (Z = Zündstrahl; G = Gasmotor; M = Mikrogasturbine)	Leistung (kWel)	Zündölanteil (%)	elektrischer Wirkungsgrad (%)
1				
2				
3				
4				

Abbildung 5-1: Muster-Fragebogen Anlagenkennwerte

Soll über die Beurteilung der Substrate und des Prozessverlaufs hinaus auch eine wirtschaftliche Bewertung einer Biogasanlage erfolgen, so müssen weitere Daten, wie beispielsweise die Höhe der Investitionen und Betriebskosten, erhoben werden.

### 5.2 Elektronisches Betriebstagebuch

Über die Anlagenkennzahlen hinaus werden für die spätere Simulation vom Betreiber Angaben insbesondere zur Beschickung seiner Biogasanlage benötigt. Diese lassen sich mit der für *biotip* entwickelten

Datenbankanwendung *biotip DB* erfassen<sup>3</sup>. Das Programm legt hierzu zunächst für jeden Tag des Anlagenbetriebs einen eigenen Datensatz an. In diesem werden der Anlageninput (Substrate) und – soweit vorhanden – einige weitere Anlagenparameter (Fermentertemperatur, pH-Wert, etc.) aufgenommen. Anschließend werden die Daten über eine Schnittstelle an das Simulationsmodul von *biotip* übergeben.

## 5.3 Bestimmung von Substratkennzahlen

Substrat-spezifische Kennzahlen vervollständigen die für die Simulation benötigten Inputdaten. Falls es sich um Substrate handelt, die häufig verwertet werden (z.B. Rindergülle oder Maissilage), können die Substratkennzahlen einer zugehörigen Datenbank entnommen werden. Liegen in der Datenbank noch keine Zahlen vor, oder ist mit starken Schwankungen der Substratqualität zu rechnen, können die Kennzahlen physikalisch-chemisch und in Faulversuchen bestimmt werden.

### 5.3.1 Datenbank Substrate

Im elektronischen Betriebstagebuch wählt der Betreiber die in seiner Anlage verwerteten Substrate aus. Die zugehörigen Daten sind in einer *Gärstoffdatenbank* gespeichert. Diese umfasst derzeit etwa 350 verschiedene, theoretisch einsetzbare, Gärsubstrate. Um die Dateneingabe im elektronischen Tagebuch zu vereinfachen, werden für den Anlagenbetreiber in der Gärstoffdatenbank nur die Substrate aufgeführt, die für ihn relevant sind. In den meisten Fällen dürfte hierzu eine Datenbank mit ca. 10 Gärstoffen ausreichen.

Der Datensatz für einen Gärstoff enthält folgende Felder (Tabelle 5-1):

Tabelle 5-1: Aufbau eines Datensatzes in der Gärstoffdatenbank

Parameter	Erläuterung	Parameter	Erläuterung
ID	Identifikationsnummer	verd. Protein	Verdaubares Protein in % TM
Name	Name des Gärsubstrats	verd. Rohfett	Verdaubares Rohfett in % TM
Kategorie	Kennzahl für interne Zuordnung	Organismen	Anteil Mikroorganismen in % TM
TM	Trockenmassegehalt in % FM	Abbauzeit K	Abbauzeit Kohlenhydrate in Tagen
verd. Rohfaser	Verdaubare Rohfaser in % TM	Abbauzeit P	Abbauzeit Proteine in Tagen
verd. nFE	Verdaubare Nichtfaser in % TM	Abbauzeit F	Abbauzeit Fette in Tagen
verd. oTM	Verdaubare organische Trockenmasse in % TM	Acetat	Acetat in % TM
verd. Khd	Verdaubare Kohlehydrate in % TM	Puffer <> N	Pufferkapazität, die nicht aus der N-Freisetzung resultiert in % TM

<sup>3</sup> Die Datenbank ist kompatibel zu *Microsoft Access* Datenbanken

### 5.3.2 Physikalisch-chemische Analysen

Für die Prozess-Simulation muss die stoffliche Zusammensetzung der im Prozess eingesetzten Substrate bekannt sein. Mit Hilfe physikalisch-chemischer Analysen, die überwiegend im Bereich der Futtermittelanalyse entwickelt worden sind, lassen sich die benötigten Kennzahlen - mit Ausnahme des Gärverhaltens<sup>4</sup> - in guter Näherung bestimmen. Eine Übersicht zu den einzelnen Parametern fasst Tabelle 5-2 zusammen. Weitere Erläuterungen zur Lokalisierung der Substratbestandteile (hier am Beispiel einer pflanzlichen Zelle) sind Abbildung 5-2 zu entnehmen.

Tabelle 5-2: Physikalisch-chemische Substratanalysen

Kürzel	Parameter	Einheit	Erläuterung
FM	Frischmasse	Mg	
TM	Gehalt an Trockenmasse	% FM	wichtige Bezugsgröße, die u. a. für den möglichen Methanertrag aus einem Substrat entscheidend ist
<u>WEENDER Futtermittelanalyse</u>			
oTM	Gehalt an organischer Trockenmasse	% TM	$oTM = XP + XF + XL + NfE$
XP	Rohprotein	% TM	$XP = Kj-N \times 6,25$ (pflanzliches Protein) $XP = Kj-N \times 6,38$ (tierisches Protein)
XF	Rohfaser	% TM	Säure- und Laugenbeständiger Anteil
XL	Rohfett	% TM	in Äthylether löslicher Anteil
NfE	N-freier Extrakt	% TM	$NfE = oTM - XP - XF - XL$
<u>erweiterte Futtermittelanalyse nach van Soest</u>			
Stärke		% TM	Stärke → Teilmenge des N-freien Extrakts
Zucker		% TM	Zucker → Teilmenge des N-freien Extrakts
NDF	Neutral-Detergenz-Faser	% TM	NDF → Summe der Gerüstsubstanzen; Teilmenge des N-freien Extrakts und der Rohfaser
ADF	Säure-Detergenz-Faser	% TM	ADF → NDF ohne Hemicellulosen (Lignocellulose)
ADL	Säure-Detergenz-Lignin	% TM	ADL → Lignin + ADF ohne Cellulose (Summe der Gerüstsubstanzen ohne Hemicellulosen und Cellulosen)
<u>ergänzende Analysen</u>			
pH		--	
Essigsäure/Acetat		% TM	
Propions. /Propionat		% TM	
Milchsäure/Lactat		% TM	

<sup>4</sup> insbesondere die Dynamik der Biogasbildung ist hier zu nennen

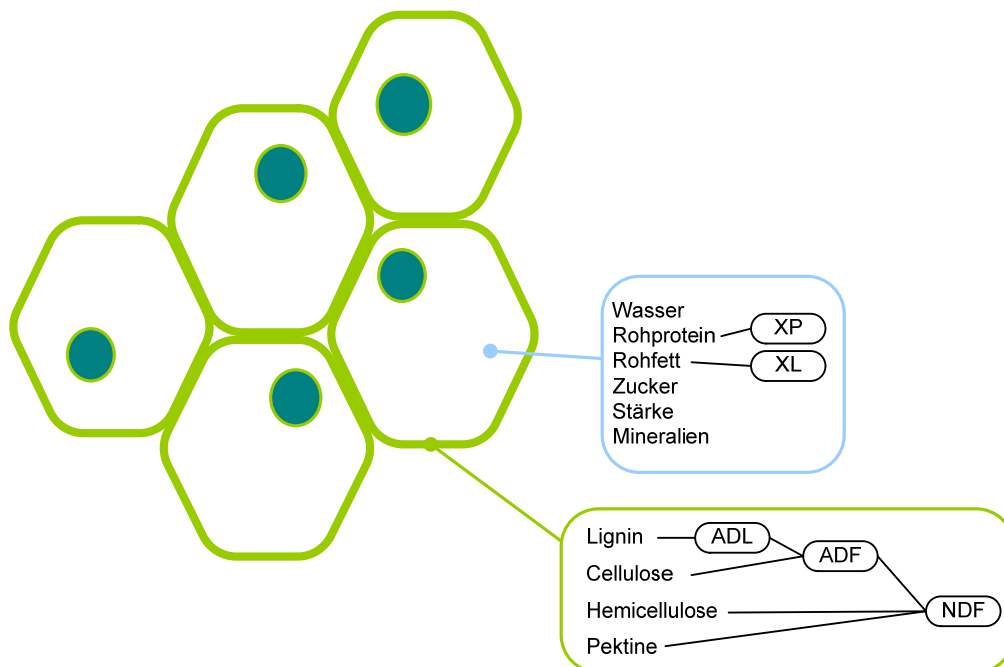


Abbildung 5-2: Lokalisierung der Substratbestandteile am Beispiel pflanzlicher Zellen

### Beispiel Grassilage

Für eine Charge Grassilage wurden am bifa und in 3 weiteren Labors physikalisch-chemisch die Werte ermittelt. Zur Berechnung der verdaulichen Kohlenhydrate wird angenommen, dass lediglich das Lignin unter anaeroben Bedingungen nicht abbaubar ist. Der Gehalt an verdaulichen Fasern ergibt sich somit aus der Differenz der neutrallöslichen Fasern (NDF) und Lignin (ADL). Der Gehalt an gelösten, verdaulichen Kohlenhydraten ergibt sich wiederum aus der Summe an Stärke und Zucker. Das Rohprotein wird zu 100 % als verdaulich angenommen, ebenso das Rohfett.

Labor > Parameter	Einheit	BfA	Extern 1		Extern 2		Extern 3		Mittelwert
		Wert	Wert	nasschem.	NIRS	nasschem.	NIRS	nasschem.	
TS	% FS	34,6	35,7		34,7			35,2	35,1
Rohasche	% TS	12,0	13,0		13,1	11,0		9,3	11,7
Rohproteine	% TS		12,9	12,6	14,5	14,0		13,7	13,5
Rohfaser	% TS		29,3	30,0	29,9	32,1		29,9	30,2
Stärke	% TS		< 2,5						
Zucker	% TS		< 0,6	0,5	< 0,18	< 1,8		0	
Rohfett	% TS		1,7		3,1			3,8	2,9
neutrallösliche Faser (NDF)	% TS			57,1			56,7		56,9
säurelösliche Faser (ADF)	% TS			31,3			39,1		35,2
Lignin (ADL)	% TS						6,2		6,2
<b>Gärsäuren</b>									
pH			4,1				4,3		4,2
Ammoniak-N	mg/kg		770						770
Essigsäure (C2)	% FS		0,88		0,97				0,93
Propionsäure (C3)	% FS		0,03		0,05				0,04
Buttersäure (C4)	% FS		< 0,01		0,01				
Isobuttersäure iso (C3)	% FS				< 0,01				
Isovaleriansäure iso (C5)	% FS				< 0,01				
Valeriansäure (C5)	% FS				< 0,01				
Kaprinsäure (C6)	% FS				< 0,01				
Milchsäure	% FS		3,62		1,07				2,35

NIRS .. Nahinfrarotspektroskopie

Abbildung 5-3: Analysenwerte Grassilage (Eingabeblatt in Excel)

### 5.3.3 Diskontinuierliche Faulversuche

Die Dynamik der Biogasbildung aus einem Substrat lässt sich aus den physikalisch-chemischen Analysen leider nicht vorhersagen, sondern kann nur in Faulversuchen bestimmt werden. Der Versuchsaufbau hierzu wurde bereits in Kapitel 4.2 erläutert.

Im HTO-Vorhaben wurde eine Reihe von Substanzen im Hinblick auf ihr Gärverhalten untersucht. Die Resultate zeigt in einer Übersicht Tabelle 5-3.

Tabelle 5-3: Ergebnisse Gärverhalten in diskontinuierlicher Kultur

Versuch	Substrat	spez. Gasertrag	Abbauzeit
		NmL/g oTM	Tage
FV-S04	Propionsäure	494 bis 736	6 bis 12
FV-S06	Speisereste	554 bis 740	7 bis 8
FV-S07a		751 bis 759	8 bis 12
FV-S07b	Maissilage	563 bis 651	35
FV-S15	Ölsäure	887 bis 974	≥ 40
FV-S18a	Glucose	464	8
FV-S18b	Cellulose	517	9
FV-S18c	Natriumacetat	368	5
FV-S18d	Serumalbumin	415	6
FV-S18e	Glyzerin	518	6

Gemäß den Erfahrungen, die bei der Versuchsdurchführung gemacht wurden, wird allgemein für die Durchführung von Faulversuchen das Prüfschema in Abbildung 5-4 vorgeschlagen.

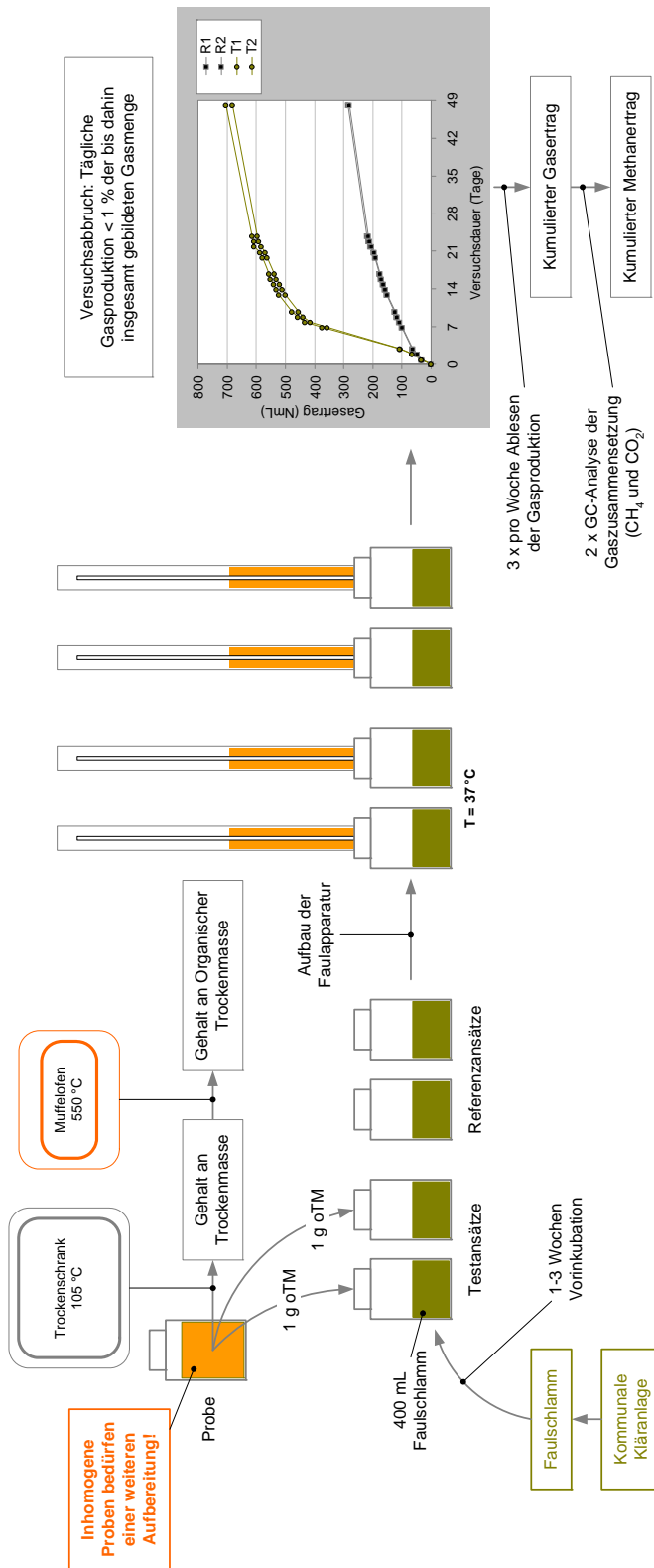


Abbildung 5-4: Versuchs-Schema diskontinuierliche Faulversuche

## 5.4 Computersimulation

### 5.4.1 Modellierung

Am Anfang der Entwicklung des *biotip*-Simulationsmoduls stand die Auswahl bzw. Entwicklung eines geeigneten mathematischen Modells. Hierfür wurden zunächst die folgenden Randbedingungen festgelegt:

- Anlagentechnik: Das Modell sollte Biogasanlagen mit maximal 3 voll durchmischten Fermentern in Reihenschaltung und konstantem Faulraumvolumen beschreiben können (Abbildung 5-5), da diese Anlagenkonfiguration in der Praxis häufig anzutreffen ist.
- Inputzusammensetzung: Die Inputmaterialien bestimmen – zusammen mit der Anlagenkonfiguration – den Prozessverlauf. Die Organik der Substrate, die in der Praxis üblicherweise verwertet werden, besteht aus den Hauptkomponenten *Kohlenhydrate*, *Fette* und *Proteine*. Das Modell sollte dementsprechend so strukturiert sein, dass es den Abbau dieser Komponenten beschreiben kann. Für jedes Substrat sollten hierbei den Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen unterschiedliche Abbauezeiten und Gaserträge zugeordnet werden können.
- Probabilistischer Ansatz: Die Mengenströme und deren Inhaltsstoffe – insbesondere der Gehalt an Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen – können in der Praxis meist nur ungefähr angegeben werden. Analog gilt dies für die biologische Abbaubarkeit und die Abbaugeschwindigkeit der Substrate. Deshalb sollte bei der mathematischen Modellierung ein probabilistischer Ansatz verfolgt werden, d. h. das Modell sollte mit Inputdaten arbeiten können, deren Werte nicht exakt angegeben werden können<sup>5</sup>.
- Hemmungen: Das Modell sollte unterschiedliche Hemmwirkungen, die in der Praxis bekanntermaßen häufiger auftreten, berücksichtigen. Insbesondere sind dies die Hemmung durch Essigsäure und durch Ammoniak.
- Modellstruktur: Das Modell sollte möglichst einfach strukturiert und in Programmcode umsetzbar sein.

---

<sup>5</sup> Für den Proteingehalt von Maissilage wird beispielsweise – je nach Reifezustand und Körneranteil – ein Bereich von 4,6 bis 5,8 % der Trockensubstanz angegeben



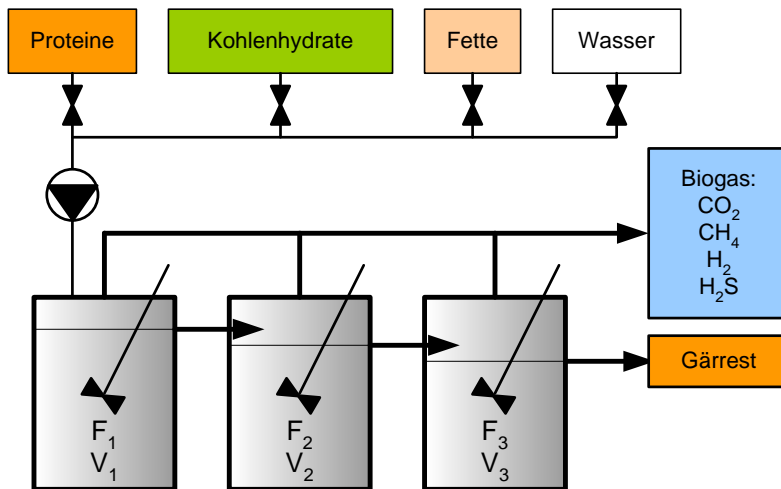


Abbildung 5-5: Verfahrenstechnische Grundlagen für das Simulationsmodul von *biotip*

Nach einer umfangreichen Literaturrecherche wurde als Basis für die Modellierung ein relativ einfach strukturiertes Modell nach Andrews und Graef (1971) ausgewählt, das als Substrat ausschließlich Essigsäure bzw. Acetat berücksichtigte. Um den Abbau von Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen beschreiben zu können, wurde das Modell erweitert. Hinzu kamen mathematische Gleichungen, die den Einfluss der Hemmstoffe Essigsäure und Ammoniak beschreiben. Grundlage für die Erweiterungen war insbesondere das *Anaerobic Digestion Model No. 1* (IWA, 2002).

Eine Übersicht zu den wichtigsten Abbauwegen beim anaeroben Abbau von Biomassen zeigt Abbildung 5-6. Farblich markiert sind dort die Inhaltsstoffe bzw. Metabolite, die für die Modellbildung berücksichtigt wurden.

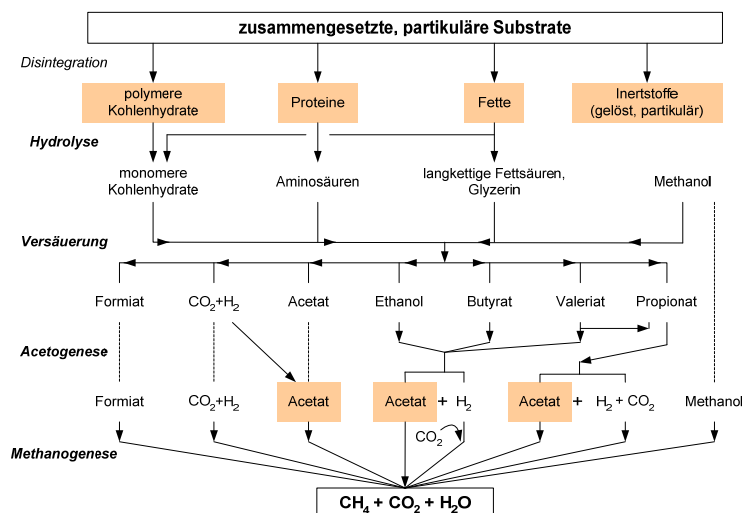


Abbildung 5-6: Übersicht zu den wichtigsten Abbauwegen beim anaeroben Abbau von Biomassen (nach Birschofsberger et al., 2005, verändert)

physikalische Transport-Prozesse → Zufuhr / Austrag

Der rein physikalische Transport von Substanzen in bzw. aus dem Reaktor lässt sich für ideal durchmischte Rührkesselreaktoren wie folgt beschreiben:

Beispiel Kohlenhydratzufuhr / -austrag

$$\dots\dots\dots dKH/dt = F / V * (KH_{\text{Input}} - KH_{\text{Reaktor}})$$

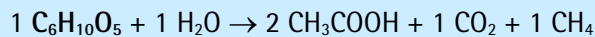
dKH/dt .. durch den Transport bedingte zeitliche Veränderung der Kohlenhydratkonzentration im Reaktor; F .. Fluss (Zufuhr bzw. Austrag) in L/d; V .. Faulschlammvolumen in L; KH<sub>Input</sub> .. Kohlenhydratkonzentration im Input in mmol/L; KH<sub>Reaktor</sub> .. Kohlenhydratkonzentration im Reaktor in mmol/L

Biochemische Prozesse im Faulschlamm

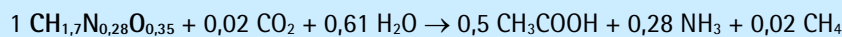
Für das Modell wurde angenommen, dass durch die Faulschlamm-Biologie folgende Reaktionen katalysiert werden:

Tabelle 5-4: Abbaugleichungen zur Modellierung ausgewählter Substratkomponenten

Abbau Kohlenhydrate



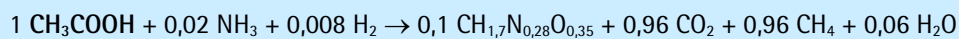
Abbau Proteine<sup>1)</sup>



Abbau Fette



Abbau Essigsäure



**Anmerkung:** bei den Kohlenhydraten und Proteinen sind nur die Verhältnisse der Elemente C, H, O und N in der dargestellten Summenformel berücksichtigt, nicht aber die polymere Struktur bzw. das tatsächliche Molekulargewicht

<sup>1)</sup> vereinfacht wurde für die Zusammensetzung der Proteine auch die Formel C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub> verwendet; der angenommene Stickstoffanteil liegt in diesem Fall bei rd. 12 % statt 17 %

Der biochemische Abbau der Kohlenhydrate, Proteine und Fette wurde bei der FITEC für jede Substratzugabe getrennt betrachtet und die täglich umgesetzten Mengen durch eine empirisch ermittelte Abbaufunktion beschrieben.

Umsatzkoeffizient Fab

$$\dots\dots\dots Fab = 1 - (1 / (1 + a * (t / tA)^{2,8}))$$

a = 500	Koeffizient für minimale Umsatzgeschwindigkeit
a = 180	Koeffizient für mittlere Umsatzgeschwindigkeit
a = 80	Koeffizient für maximale Umsatzgeschwindigkeit

$$\dots\dots\dots tA = t37 * FAT * FP$$

$$\dots\dots\dots FAT = (1 - (1 / (1 + B + T^{4,1}))) / (1 - (1 / (1 + B + T0^{4,1})))$$

$$\dots\dots\dots B = 0,000005 \quad T0 = 37 \text{ °C}$$

Beispiel → Abbau einer zum Zeitpunkt  $t_0$  zugegebenen Menge an Kohlenhydraten:

$$\dots\dots\dots KH_{i,Reaktor}(t) = (1 - Fab) * KH_{i,Reaktor}(t_0)$$

$KH_{i,Reaktor}(t)$  .. Restkonzentration der Substratdosierung zum Zeitpunkt  $t$ ;  $KH_{i,Reaktor}(t_0)$  .. Anfangskonzentration der Substratdosierung zum Zeitpunkt der Zugabe;  $Fab$  .. Umsatzkoeffizient;  $t$  .. Zeitintervall, das seit der Substratzugabe verstrichen ist;  $tA$  .. Abbauzeit bei feiner Strukturierung des Substrats;  $t_{37}$  .. Abbauzeit bei 37 °C;  $FAT$  .. Temperaturbeiwert;  $FP$  .. Partikelbeiwert

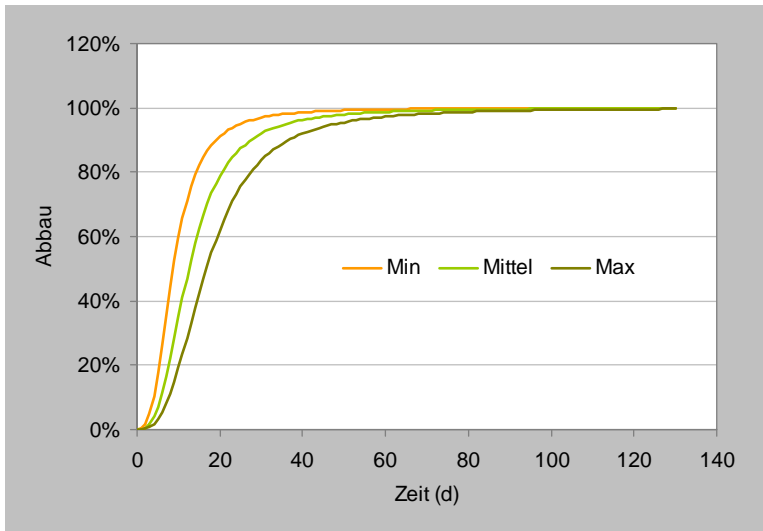


Abbildung 5-7: Abbaufunktion FITEC (Umsatzkoeffizient  $Fab$  dargestellt in %)

$t_{37} = 80$  d;  $FAT = 1$ ;  $FAP = 1$ ,

Die aus einer Substratdosierung freigesetzten Mengen an Metaboliten (Essigsäure, Kohlendioxid, Methan, Ammoniak) berechnen sich mit Hilfe der ersten Ableitung von  $Fab$ :

$$\dots\dots\dots Fab' = 2,8 * A * t^{1,8} / (1 + A * t^{2,8})^2$$

$A = (500 / tA)^{2,8}$	Koeffizient für minimale Umsatzgeschwindigkeit
$A = (180 / tA)^{2,8}$	Koeffizient für mittlere Umsatzgeschwindigkeit
$A = (80 / tA)^{2,8}$	Koeffizient für maximale Umsatzgeschwindigkeit

$Fab'$  .. 1. Ableitung des Umsatzkoeffizienten in 1/d

Beispiel Essigsäurefreisetzung aus einer Kohlenhydratdosierung

$$\dots\dots\dots dHAc_i/dt = Fab' * KH_{i,Reaktor}(t) * Y_{HAc/KH} \quad Y_{HAc/KH} = 2 \text{ mmol/mmol}$$

$dHAc_i/dt$  = Essigsäurefreisetzung aus der zudosierten Kohlenhydratmenge in mmol/L/d;  $KH_{i,Reaktor}(t)$  .. (Rest)konzentration der Kohlenhydratdosierung zum Zeitpunkt  $t$ ;  $Y_{HAc/KH}$  .. Ertragskoeffizient für Essigsäure beim Abbau von Kohlenhydraten

Für die ausschließlich deterministische Betrachtung wurde der Abbau der Kohlenhydrate, Proteine und Fette bis hin zur Essigsäure am bifa auch durch folgende Formel beschrieben:

Beispiel Kohlenhydrat-Abbau

$$\dots\dots\dots dKH/dt = k_{hyd} * KH_{Reaktor}$$

k<sub>hyd</sub> .. Umsatzkoeffizient in 1/d

Der biochemische Umsatz an Essigsäure wurde in einem ersten Schritt wie folgt modelliert:

$$\text{I) } \dots\dots d\text{HAc}/dt = - 1/\text{YXS} * dX/dt \quad \text{II) } \quad dX/dt = \mu * X$$

$$\text{III) } \dots\dots \mu = \mu_{\text{max}} * \text{HAc} / (\text{KS} + \text{HAc}) \quad (\text{Monod-Funktion})$$

HAc .. Essigsäure-Konzentration in mmol/L; YXS .. Ausbeutekoeffizient für bakterielle Biomasse beim Abbau von Essigsäure in mmol/mmol;  $\mu$  = Wachstumsgeschwindigkeit der Essigsäure-verwertenden Mikroorganismen in 1/d;  $\mu_{\text{max}}$  .. maximale Wachstumsrate der Essigsäure-verwertenden Mikroorganismen in 1/d; KS .. Essigsäurekonzentration bei halber maximaler Wachstumsgeschwindigkeit in mmol/L

Um die Hemmwirkung verschiedener Substanzen, wie höhere Essigsäure-Konzentrationen, Ammoniak u.a., zu berücksichtigen, wurde die Gleichung II) um Hemm-Faktoren erweitert.

Schätzwerte, für die zur Berechnung des Abbaus von Essigsäure benötigten Faktoren, sind in Tabelle 5-5 angegeben.

Tabelle 5-5: geschätzte Parameter für den Abbau von Essigsäure

Parameter	Einheit	Schätzwert	Referenz
YXS	mmol/mmol	0,015 bis 0,024	IWA, 2002; Andrews, 1971
$\mu_{\text{max}}$	1/d	0,3 bis 0,4 <sup>a)</sup>	IWA, 2002; Andrews, 1971
KS	mmol/L	0,0333	Andrews, 1971
K <sub>i1</sub>	mmol/L	0,667	Andrews, 1971
K <sub>i2</sub>	mmol/L	15	Angelidaki et al., 1993

<sup>a)</sup> .. für eine probabilistische Betrachtung (siehe Kapitel 5.4.2) wurden Werte von 0,025 bis 0,4 angenommen, da so auch Hemmungen bzw. Limitierungen berücksichtigt werden können, die auf andere, unbekannte Komponenten zurückzuführen sind

#### Physikalisch-Chemische Prozesse im Faulschlamm

Neben den biochemischen Reaktionen spielen im Faulschlamm eine Reihe von chemischen Gleichgewichten für die Modellbildung eine wichtige Rolle. Als erstes ist das System CO<sub>2</sub>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> zu nennen, das die Pufferkapazität und den pH-Wert im Faulschlamm dominiert:

#### System CO<sub>2</sub>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Die Faulschlamm-Aktivität ist an einen günstigen pH-Wert gebunden, der im Bereich von etwa 6,5 bis 8 liegen kann. In diesem Bereich existiert der anorganische Kohlenstoff im Faulschlamm entweder als physikalisch gelöstes CO<sub>2</sub>, in sehr geringem Maße als Kohlensäure H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> oder als Hydrogencarbonat HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Die prozentuale Verteilung dieser Komponenten bestimmt den pH-Wert im Faulschlamm und umgekehrt, wie Abbildung 5-8 zeigt.

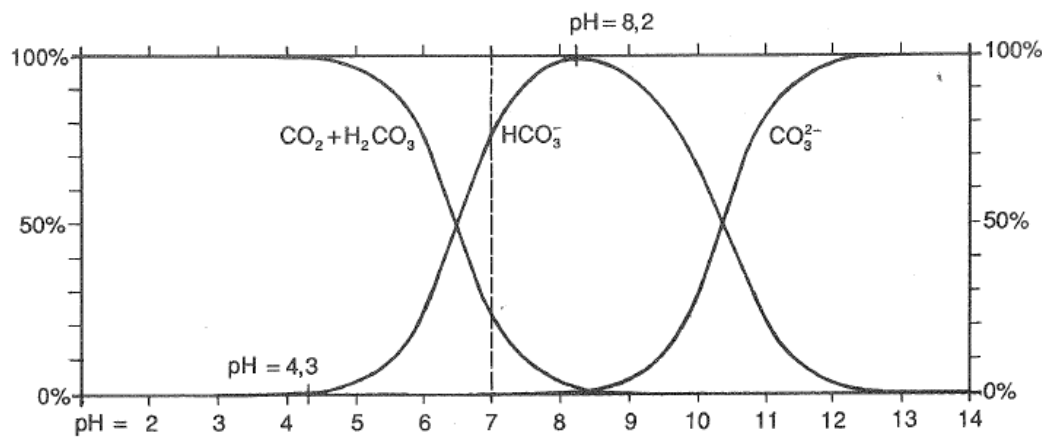


Abbildung 5-8: pH-Wert als Funktion der Mengenanteile  $\text{CO}_2$  /  $\text{H}_2\text{CO}_3$  /  $\text{HCO}_3^-$  und  $\text{CO}_3^{2-}$  (Hütter, 1994)

Sind die Konzentrationen an gelöstem  $\text{CO}_2$  und  $\text{HCO}_3^-$  bekannt, so berechnet sich der pH-Wert nach folgenden Gleichungen:

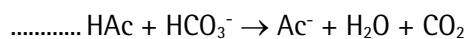
$$\text{H}^+ = K_{\text{CO}_2/\text{HCO}_3} \cdot \text{CO}_2\text{gel.} / \text{HCO}_3^- \quad \text{pH} = -\log(\text{H}^+ / 1000)$$

$$K_{\text{CO}_2/\text{HCO}_3} = 10^{-6,35} \cdot 1000 \cdot e^{0,01 \cdot (273 + t - 298)} \text{ mmol/L}$$

$K_{\text{CO}_2/\text{HCO}_3}$  .. Gleichgewichtskonstante für das System  $\text{CO}_2$  /  $\text{HCO}_3^-$  in mmol/L;  $\text{H}^+$  .. Konzentration der Wasserstoffionen in mmol/L;  $\text{CO}_2\text{gel.}$  .. Konzentration des gelösten  $\text{CO}_2$  in mmol/L;  $\text{HCO}_3^-$  .. Konzentration an Hydrogencarbonat in mmol/L; t .. Temperatur in °C

#### System Essigsäure/Acetat

Biochemisch wird im Faulschlamm zunächst Essigsäure freigesetzt. Diese reagiert jedoch überwiegend mit dem Puffer aus Hydrogencarbonat zu Acetat:



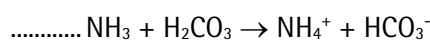
Die Konzentration an freier Essigsäure berechnet sich aus dem Massenwirkungsgesetz nach folgender Gleichung:

$$\text{HAc} = (\text{H}^+ \cdot \text{Ac}^-) / K_{\text{HAc/Ac}} \quad K_{\text{HAc/Ac}} = 10^{-4,76} \cdot 1000 \text{ mmol/L}$$

HAc .. Konzentration an Essigsäure in mmol/L,  $\text{Ac}^-$  .. Konzentration an Acetat in mmol/L,  $K_{\text{HAc/Ac}}$  .. Gleichgewichtskonstante für das System Essigsäure/Acetat in mmol/L

#### System Ammoniak/Ammonium

Stickstoff aus organischen Verbindungen wird biochemisch als Ammoniak freigesetzt. Dieser reagiert überwiegend mit der Kohlensäure zu Ammonium und baut dabei Pufferkapazität auf:



Transport-Prozesse Faulschlamm  $\Leftrightarrow$  Biogas

Zwischen Faulschlamm und der darüber befindlichen Gasphase sind eine Reihe von Transportvorgängen bei der Modellierung zu berücksichtigen.

### Kohlendioxid-Transport

Kohlendioxid wird im Faulschlamm gebildet und gelangt von dort aus in die Gasphase. Die treibende Kraft für den Stofftransport ist hierbei die Übersättigung des Faulschlammes mit Kohlendioxid. Gemäß dem Gesetz nach Henry berechnet sich für Kohlendioxid zunächst die Sättigungskonzentration im Faulschlamm nach folgender Gleichung:

$$\text{CO}_2\text{sätt.} = K_{H\text{CO}_2} \cdot p_{\text{CO}_2}$$

$$K_{H\text{CO}_2} = 0,035 \cdot e^{-0,02629 \cdot (273 + t - 298)} \text{ mmol/L/hPa}$$

CO<sub>2</sub>sätt. .. Sättigungskonzentration für CO<sub>2</sub> in Faulschlamm in mmol/L; pCO<sub>2</sub> .. CO<sub>2</sub>-Partialdruck in der Gasphase in hPa; K<sub>HCO<sub>2</sub></sub> .. Henrykonstante für CO<sub>2</sub> in mmol/L/hPa

Die Transferrate für CO<sub>2</sub> kann dann durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$T_{G\text{CO}_2} = k_{l\text{aCO}_2} \cdot (\text{CO}_2\text{gel.} - \text{CO}_2\text{sätt.}) \quad k_{l\text{aCO}_2} \sim 100/\text{d}$$

T<sub>GCO<sub>2</sub></sub> .. Transferrate für Kohlendioxid aus dem Faulschlamm in die Gasphase in mmol/L/d; k<sub>laCO<sub>2</sub></sub> Transferkoeffizient für CO<sub>2</sub> in 1/d

### Methan-Transport

Die Formeln bauen sich analog wie eben beim Kohlendioxid beschrieben auf (k<sub>laCH<sub>4</sub></sub> ~ 100/d). Die Henry-Konstante - und damit die Löslichkeit von Methan in Faulschlamm - ist jedoch sehr viel kleiner:

$$K_{H\text{CH}_4} = 0,0014 \cdot e^{-0,01929 \cdot (273 + t - 298)} \text{ mmol/L/hPa}$$

K<sub>HCH<sub>4</sub></sub> .. Henrykonstante für CH<sub>4</sub> in mmol/L/hPa

### Gaserträge

Die Gaserträge an Kohlendioxid und Methan errechnen sich schließlich wie folgt:

$$Q_{\text{CO}_2} = D \cdot V \cdot T_{G\text{CO}_2} \quad Q_{\text{CH}_4} = D \cdot V \cdot T_{G\text{CH}_4}$$

$$D = 0,022414 / (p_g / 1013) \cdot (273,15 / (273,15 + t)) \text{ L/mmol}$$

Q<sub>CO<sub>2</sub></sub> .. CO<sub>2</sub>-Ertrag in L/d; Q<sub>CH<sub>4</sub></sub> .. CH<sub>4</sub>-Ertrag in L/d; D .. Umrechnungsfaktor mmol in L; V .. Faulschlammvolumen in L; p<sub>g</sub> .. Gesamtdruck in hPa

### CO<sub>2</sub>-Partialdruck

Die zeitliche Veränderung des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks in der Gasphase berechnet sich zu:

$$dp_{\text{CO}_2}/dt = p_g \cdot D \cdot V / V_G \cdot T_{G\text{CO}_2} - Q_{\text{ges}} / V_G \cdot p_{\text{CO}_2}$$

V<sub>G</sub> .. Volumen der Gasphase in L

## 5.4.2 Programmierung

Aus den in Kapitel 5.4.1 genannten Gleichungen baut sich ein System aus Differentialgleichungen und arithmetischen Gleichungen auf, das die zeitliche Veränderung der betrachteten Größen beschreibt. Jedes Substrat besteht mindestens aus den 3 vergärbaren Bestandteilen *Kohlenhydrate*, *Proteine* und *Fette*. Jede dieser Komponenten kann ein unterschiedliches Abbauverhalten - insbesondere hinsichtlich der benötigten Abbaupzeit - aufweisen. Zudem werden unterschiedliche Substrate gleichzeitig oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten in die Anlage dosiert. Dies alles ist zunächst mathematisch und dann in der programmtechnischen Umsetzung zu berücksichtigen. Prinzipiell erfolgt die Prognoserechnung nach dem Schema in Abbildung 5-9.

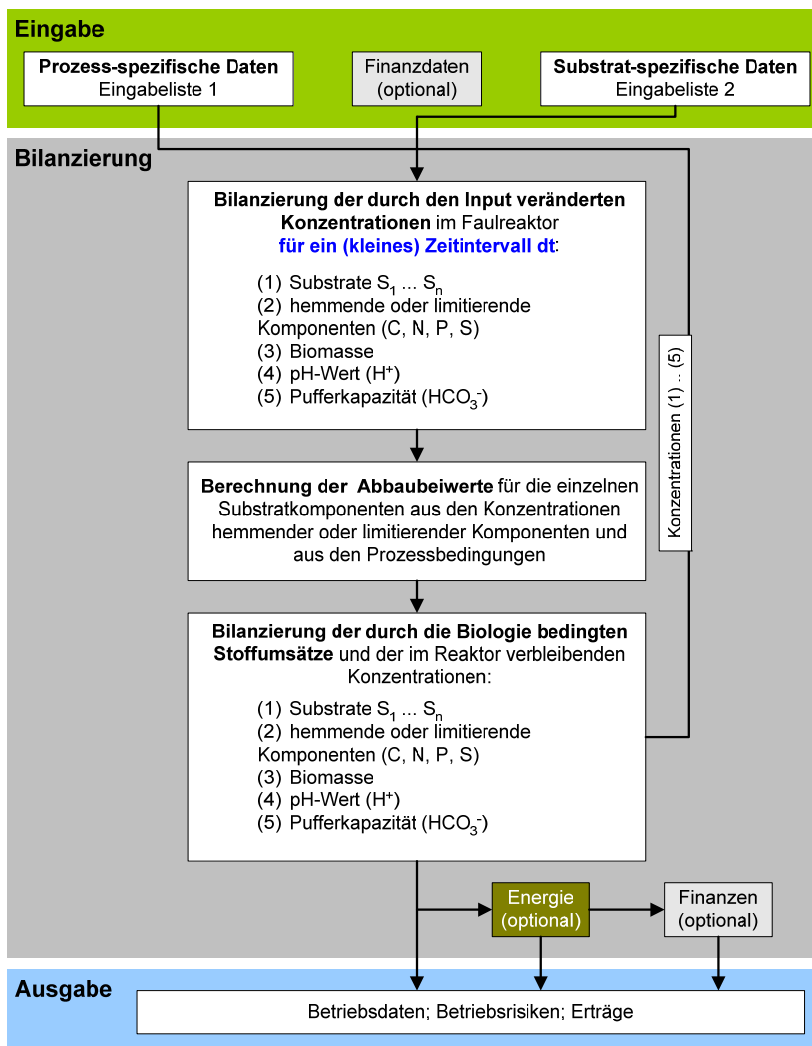


Abbildung 5-9: Schematischer Ablauf der Simulationsrechnung

Deterministischer / probabilistischer Ansatz

Die Simulationsrechnung benötigt eine größere Zahl an Eingangsdaten (z. B. Trockenmassegehalte der Inputmaterialien, zudosierte Mengen, ...), die recht genau bekannt sein müssen, um eine belastbare Prognose erstellen zu können. Die Erhebung dieser Daten ist in der Praxis oft nicht im erforderlichen Umfang zu leisten. Schwankungen bei den Eingangsgrößen, z. B. der Gehalt an vergärbaren Kohlenhydraten, wirken sich dann aber nicht nur auf die Lage der simulierten Parameter, z. B. die Höhe des Gasertrags, aus. Durch die zahlreichen Abhängigkeiten der simulierten Größen voneinander können vielmehr bereits kleinere Schwankungen bei den Eingangsdaten zu gänzlich unterschiedlichen Prozessverläufen führen. Es ist daher wichtig, die Prozesssimulation nicht allein auf Basis einer deterministischen, sondern auch auf Basis einer probabilistischen Betrachtungsweise durchzuführen. Voraussetzung ist in diesem Fall, dass das Simulationsmodul mit Eingangsgrößen rechnen kann, die mehrere Werte innerhalb eines definierten Bereichs annehmen.

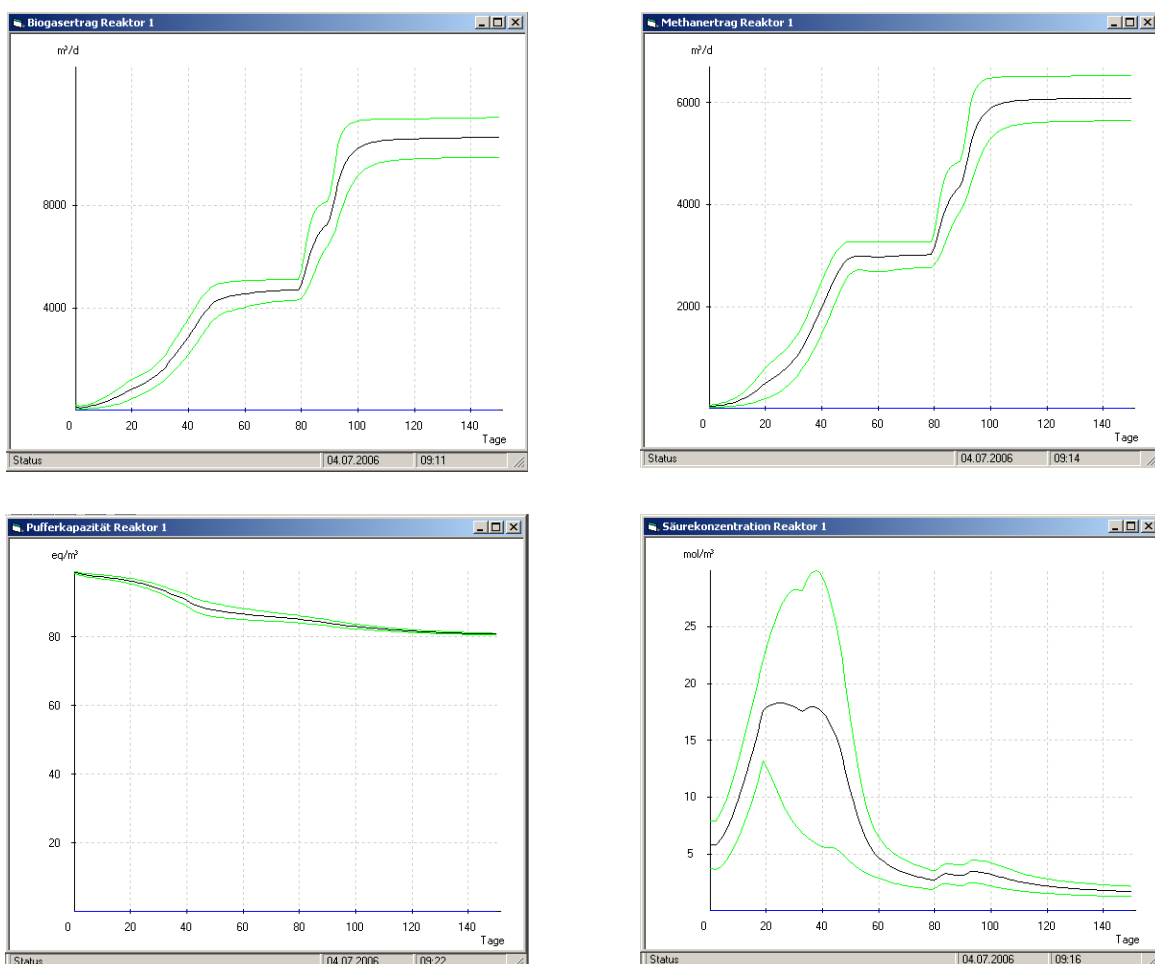


Abbildung 5-10: biotip-Ergebniskurven bei probabilistischer Betrachtung der Eingangsgrößen

Prinzipiell müsste für jede Eingangsgröße ein kontinuierlicher Streubereich von einem Minimum zu einem Maximum angenommen werden (z. B. eine Gaußsche Normalverteilung), dies würde aber in einer unendlichen Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten für die Eingangsgrößen resultieren, die im Rechner



---

nicht mehr beherrschbar wäre. Zur Vereinfachung werden deshalb nur für die sensitiven Eingangsparameter eine begrenzte Anzahl an Werten (Minimum, Maximum, Mittelwert) in das Simulationsmodul eingespeist. Als Ergebnis liefert das Simulationsmodul für jede Kombination der Eingabeparameter bzw. für jeden Ausgabeparameter eine Kurvenschar, die den wahrscheinlichen Werte-Bereich näherungsweise abbildet. Typische Beispiele zeigt Abbildung 5-10.

Die Differentialgleichungen werden mit Hilfe einer numerischen Methode integriert.

Die Umsetzung in eine Simulationssoftware erfolgte bei der FITEC – den probabilistischen Ansatz eingeschlossen – in *Visual Basic*. Am bifa entstand eine Entwicklerversion mit Hilfe von *LabView 7.0*, die allerdings nur eine rein deterministische Betrachtung zulässt.

## 5.5 Validierung *biotip* (Faulversuche *alba*)

Mit der *alba* wurden für die Validierung von *biotip* eine Reihe von Langzeitversuchen durchgeführt. Ausgewählte Ergebnisse wurden im Zusammenhang mit der Entwicklung von *biotip* bereits veröffentlicht (Kottmair u. Finsterwalder, 2005; Kottmair et al., 2006):

Ausgewählte Versuchsergebnisse werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

### 5.5.1 ALBA-C08 – Vergärung von Speiseresten

Für einen ersten Langzeitversuch mit einem Substrat aus der Praxis wurden Speisereste verwendet, wie sie bei der Biogasanlage der FITEC zur Verwertung anfallen. Die zur Verfügung stehende Speisereste-Charge wurde zunächst aufbereitet, um sie in die *alba* dosieren zu können. Hierfür wurden die Speisereste mit einem Mixer zerkleinert, verdünnt und < 4 mm gesiebt (Abbildung 5-11). Der Trockenmassegehalt lag nach der Aufbereitung bei rund 10,6 % der Frischmasse. Der Gehalt an organischer Trockenmasse (Glühverlust) wurde zu 91,8 % der Trockenmasse bestimmt.



Abbildung 5-11: Aufbereitung Speisereste, abgesiebte Bestandteile (links), Siebdurchgang (rechts)

In den Versuchstagen 0 bis 34 lag die Raumbelastung bei 1,1 g oTM/L/d bei einer theoretischen Verweildauer von rund 85 Tagen. Ab Versuchstag 35 wurden die Speisereste weiter verdünnt, dafür aber in größerer Menge zugegeben. Die Raumbelastung blieb konstant, die theoretische Verweildauer reduzierte sich jedoch auf rund 28 Tage. Der Versuch wurde bei einer Reaktortemperatur von konstant 37 °C durchgeführt. Das Arbeitsvolumen im Reaktor betrug 14,6 Liter. Angeimpft wurde der Reaktor mit Faulschlamm aus einer kommunalen Kläranlage.

#### Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse sind zusammenfassend mit den Messdaten der *alba* in Abbildung 5-12 bis Abbildung 5-15 dargestellt. Gut erkennbar ist der zumeist hohe Grad an Übereinstimmung zwischen den simulierten und den gemessenen Werten. Der Wechsel bei der hydraulischen Verweildauer am 35. Versuchstag wirkte sich weder auf den Gasertrag noch den Methangehalt im Biogas aus. Einen deutlichen Einfluss hatte die erhöhte Zufuhr an Wasser jedoch erwartungsgemäß auf die Pufferkapazität und damit auch auf den pH-Wert im Reaktor.

Sowohl der Versuchsverlauf als auch die Simulation zeigen, dass die eingesetzten, aufbereiteten Speisereste bei einer mittleren Raumbelastung von rd. 1,1 g oTM/L/d stabil über lange Zeiträume vergärbar sind. Der Median des Methangehalts im Biogas lag bei rd. 62 Vol.-% (dies entspricht einem Methanpartialdruck von etwa 600 hPa, Abbildung 5-13). Die Pufferkapazität im Reaktor bewegte sich im Bereich

von etwa 90 bis 140 meq/L (Abbildung 5-15), der pH-Wert in einem günstigen Bereich von 7,2 bis 7,5 (Abbildung 5-14). Eine relevante Anreicherung von Acetat war nicht zu beobachten (maximal betrug die Acetatkonzentration 574 mg/L bzw. 9,6 mmol/L).

Insgesamt wurden 9,91 kg aufbereitetes Substrat zugefüttert. Aus dieser Menge wurden 742 NL Biogas gebildet. Daraus errechnet sich für die untersuchten Speisereste ein spezifischer Gasertrag von 767 NmL/g oTM bzw. ein spezifischer Methanertrag von 484 NmL/g oTM.

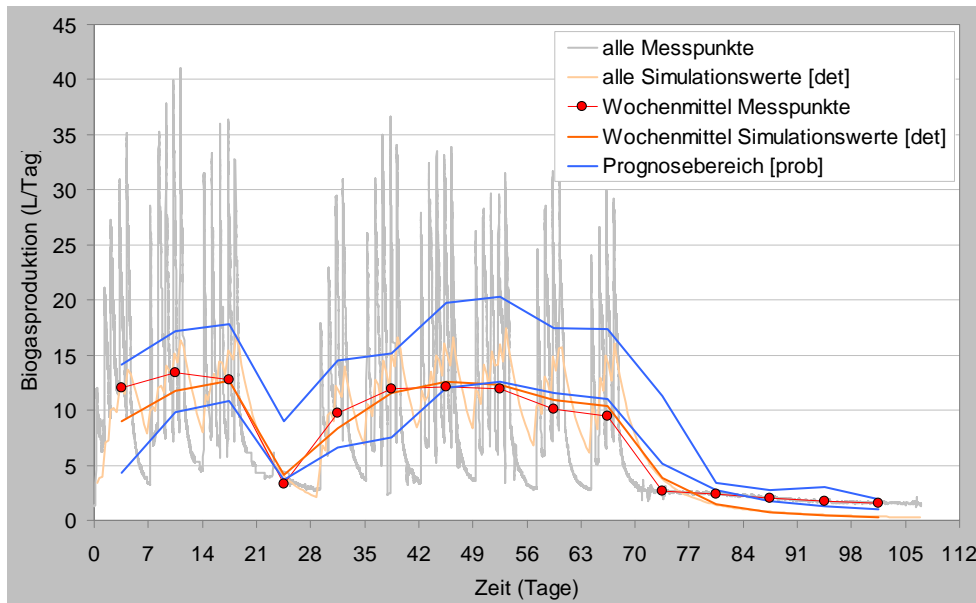


Abbildung 5-12: Gaserträge ALBA-C08

[det] .. Simulation auf deterministischer Basis (bifa); [prob] .. Simulation auf probabilistischer Basis (FITEC) → Berechnungsgrundlage waren Wochenmittelwerte des Inputs

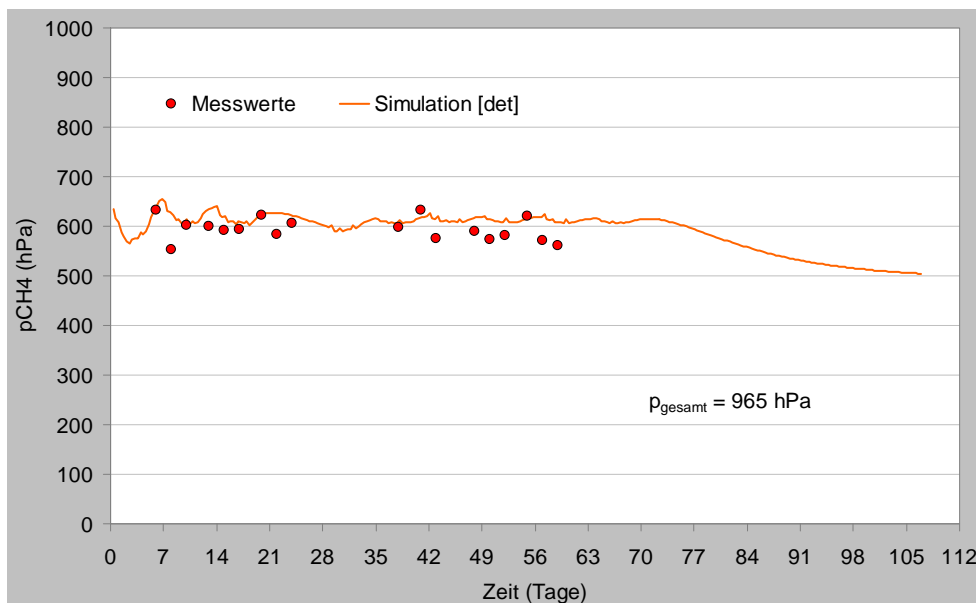


Abbildung 5-13: Verlauf Methan-Partialdruck ALBA-C08 (det = deterministisch)

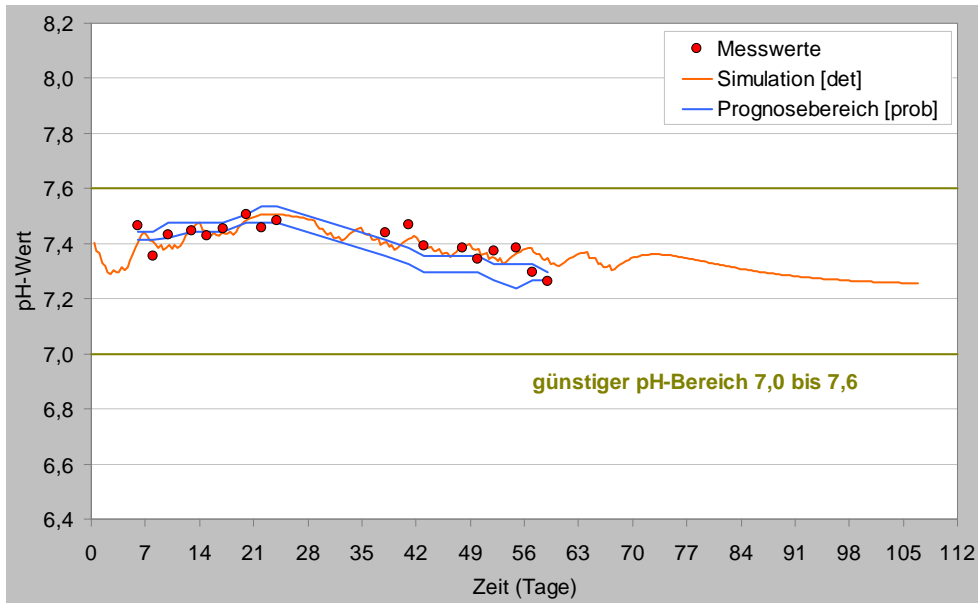


Abbildung 5-14: Verlauf pH-Wert ALBA-C08

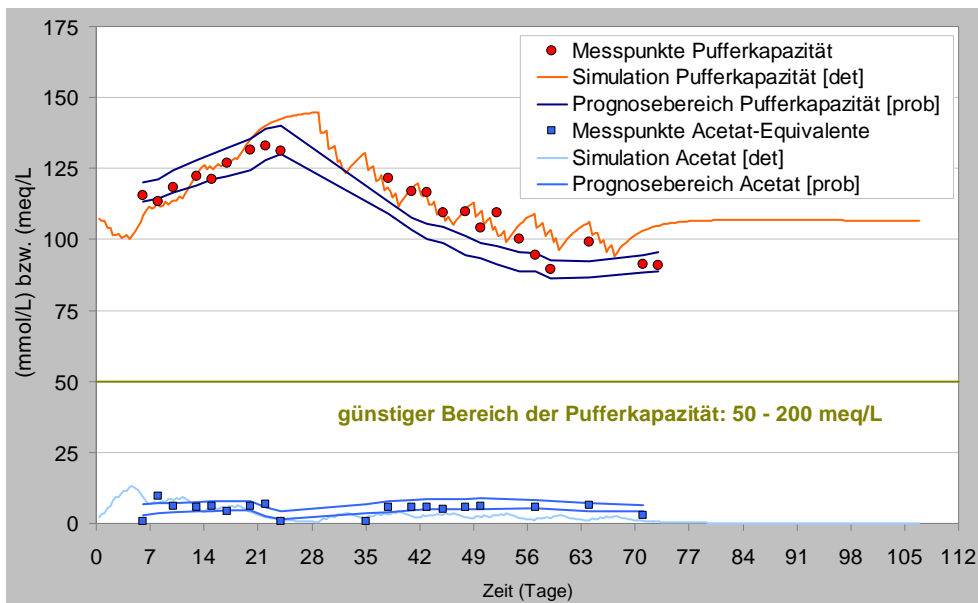


Abbildung 5-15: Verlauf Pufferkapazität und Acetat ALBA-C08

### 5.5.2 ALBA-C11 – Vergärung von Maissilage

Die (Mono-)Vergärung von Maissilage hat in den letzten Jahren massiv an Bedeutung gewonnen. Aus diesem Anlass wurde in der *alba* das Gärverhalten von Maissilage in einem Langzeitversuch intensiv untersucht. Der Trockenmassegehalt der hierbei verwendeten Maissilage (Abbildung 5-16) lag bei rund 35,6 % der Frischmasse. Der Gehalt an organischer Trockenmasse (Glühverlust) wurde zu 96,2 % der Trockenmasse bestimmt. Nach orientierenden Simulationsexperimenten wurde die mittlere Raumbelastung mit 1,1 g oTM/L/d so gewählt, dass gemäß Prognose - bei einer theoretischen hydraulischen Verweildauer von etwa 39 Tagen - mit einem kritischen Prozessverlauf zu rechnen war.



Abbildung 5-16: Maissilage

Der Versuch wurde bei einer Reaktortemperatur von konstant 37 °C durchgeführt. Das Arbeitsvolumen im Reaktor betrug 13,6 Liter. Angeimpft wurde der Reaktor mit Faulschlamm aus einer kommunalen Kläranlage.

#### Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse sind zusammenfassend mit den Messdaten der *alba* in Abbildung 5-17 bis Abbildung 5-20 dargestellt.

Die Prognose, dass der Reaktor in einen kritischen Zustand kommen könnte, wurde am Versuchstag 63 bestätigt. An diesem Tag stürzte der Reaktor ab, d. h. es kam zu einer fortschreitenden Versäuerung des Reaktorinhalts, die Methanbildung kam zum Erliegen. Abbildung 5-17 zeigt zunächst den Verlauf des Gasertrags über die Versuchsdauer. Die Biogasproduktion in der *alba* folgte bis unmittelbar vor dem Absturz der Prognose, gleiches gilt für den Methangehalt im Biogas (Median: 56 Vol.-%; Abbildung 5-18). Bemerkenswert ist, dass der Absturz des Reaktors im Vorfeld weder beim Parameter Biogasproduktion noch beim Parameter Gaszusammensetzung zu erkennen gewesen wäre.

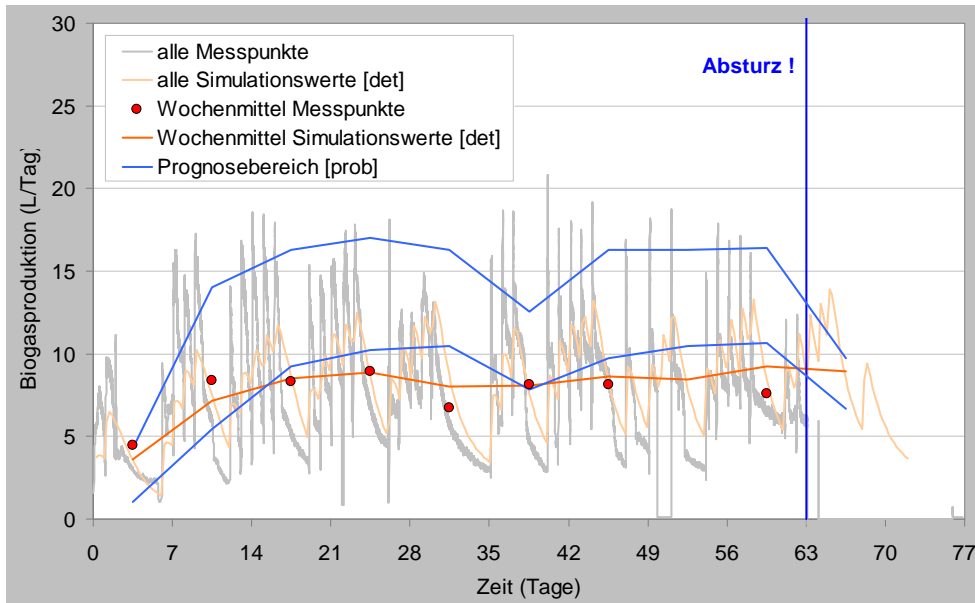


Abbildung 5-17: Gaserträge ALBA-C11

[det] .. Simulation auf deterministischer Basis (bifa); [prob] .. Simulation auf probabilistischer Basis (FITEC)

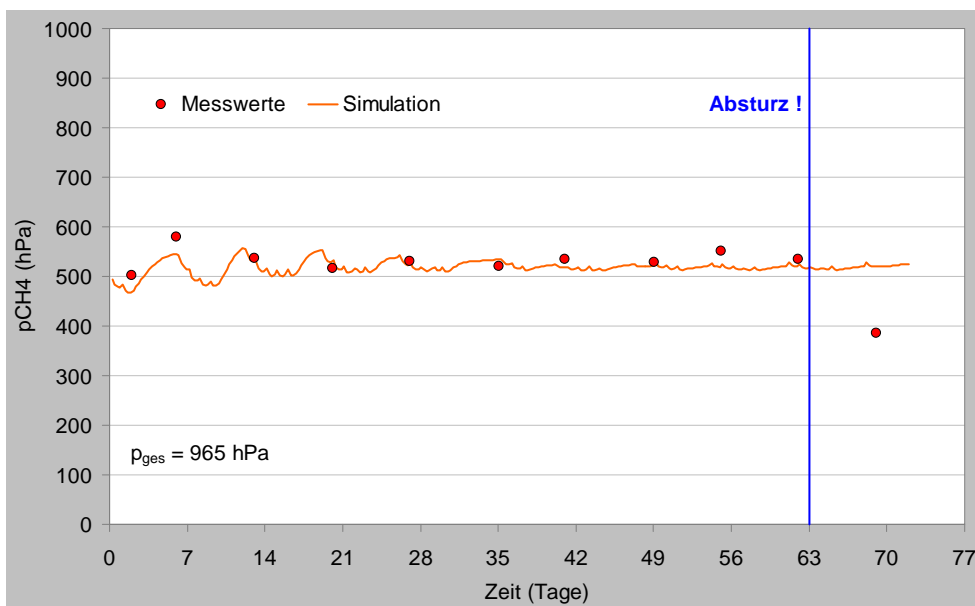


Abbildung 5-18: Verlauf Methan-Partialdruck ALBA-C11

Auch der pH-Wert folgte bis zum Versuchstag 63 der Prognose (Abbildung 5-19). Bereits am Versuchstag 35 wurde sowohl in der Simulation als auch bei den Messwerten deutlich, dass der Prozess instabil zu werden drohte, da der pH-Wert unter 7,0 sank. Etwa zur gleichen Zeit unterschritt die Pufferkapazität im Reaktor 50 mq/L - im Gegenzug reicherte sich zunehmend Acetat im Reaktor an (Abbildung 5-20).

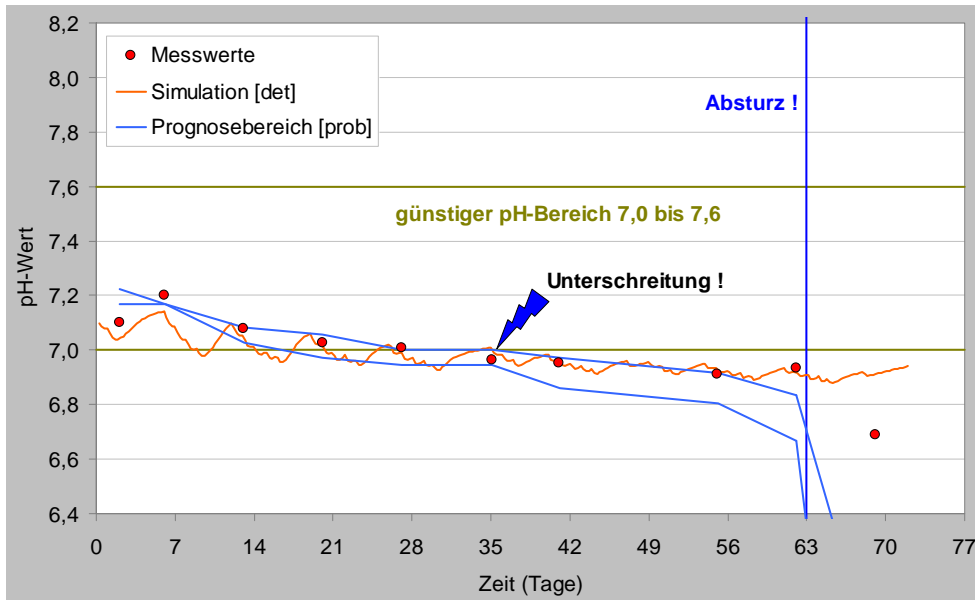


Abbildung 5-19: Verlauf pH-Wert ALBA-C11

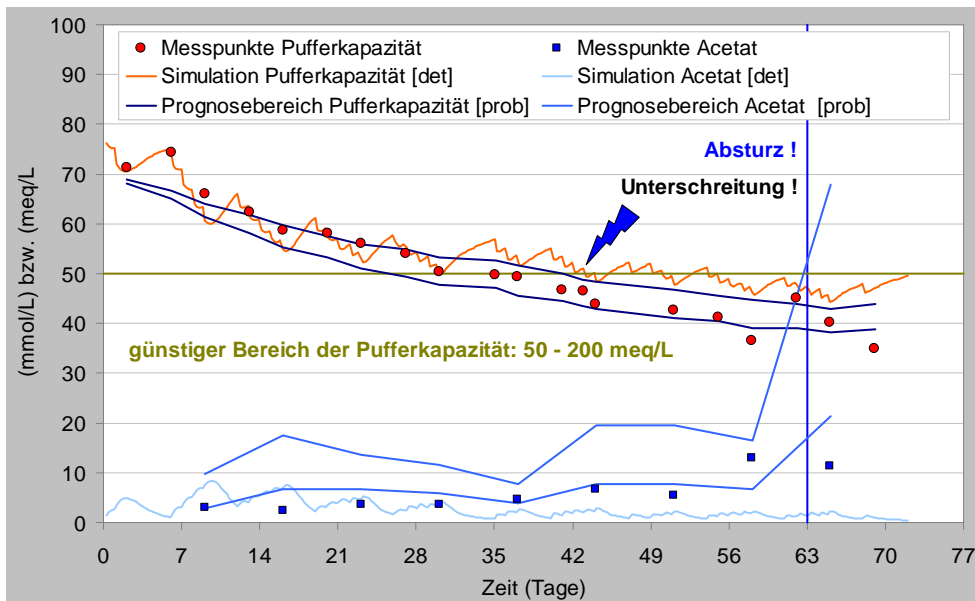


Abbildung 5-20: Verlauf der Konzentrationen an Hydrogencarbonat und Acetat ALBA-C11

Insgesamt wurden aus den zugefütterten 2,82 kg Maissilage im Versuch 397 NL Biogas gebildet. Daraus errechnet sich für die untersuchte Maissilage ein vergleichsweise eher niedriger spezifischer Gasertrag von 411 NmL/g oTM bzw. ein spezifischer Methanertrag von 239 NmL/g oTM.

### 5.5.3 ALBA-C13 – Vergärung von Caseinpepton

In der Praxis erweist sich häufig insbesondere die Vergärung proteinreicher Substrate als problematisch, da hierbei große Mengen Ammoniak freigesetzt werden und dieser bei höheren pH-Werten zunehmend hemmend auf Mikroorganismen wirkt.

Für die Validierung der *alba* wurde deshalb die Vergärung von Caseinpepton – als Modellsubstanz für proteinreiche Biomassen – untersucht. Der Trockenmassegehalt des verwendeten, tryptisch verdauten, Caseinpeptons (Fluka) betrug 95 % der Frischmasse. Der organische Trockenmasseanteil betrug 95 % der Trockenmasse. Der Proteingehalt wurde vom Hersteller zu 79 % der Frischmasse angegeben. Aufgrund des hohen Proteinanteils und der leichten Verwertbarkeit wurde mit durchschnittlich 0,56 g oTM/L/d eine vergleichsweise niedrige Raumbelastung gewählt. Die Verweildauer wurde mit Hilfe von Verdünnungswasser auf rd. 61 Tage eingestellt. Die Reaktortemperatur betrug konstant 37 °C, das Arbeitsvolumen 13,6 Liter. Als Impfschlamm wurde Schlamm aus dem Faulturm einer kommunalen Kläranlage verwendet.

### Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse sind zusammenfassend mit den Messdaten der *alba* in Abbildung 5-21 bis Abbildung 5-25 dargestellt.

Langfristig wurde im Versuch kein stabiler Prozess-Zustand erreicht. In den ersten Versuchswochen folgte der Versuchsverlauf in guter Übereinstimmung der Prognose, ab der 6. Versuchswoche kam es jedoch bereits zu einer deutlichen Minderung des Gasertrags. Bis zur 13. Versuchswoche kamen weitere Anzeichen für einen gestörten Prozessverlauf hinzu – der Methangehalt sank deutlich ab (Abbildung 5-22), Acetat reicherte sich zunehmend an und die Pufferkapazität reduzierte sich entsprechend (Abbildung 5-24). In Versuchswoche 13 wurde die Fütterung für 11 Tage ausgesetzt, um dem System Zeit für eine Adaption an den hohen pH-Wert von rd. 7,8 (Abbildung 5-23) und die hohe Ammoniumkonzentration von rd. 280 mmol/L bzw. 5,0 g/L (Abbildung 5-25) im Reaktor zu geben. Aus der Literatur (Bischofsberger et al., 2005) ist bekannt, dass Faulschlämme durch Ammoniumkonzentrationen im Bereich von 4 bis 6 g/L zunehmend einer Hemmung unterliegen können, dass aber die Hemmung nach einer Adaptionsphase auch wieder zurückgehen kann. Dies schien sich im weiteren Versuchsverlauf zu bestätigen: Nachdem die Fütterung wieder aufgenommen worden war, erreichte der Gasertrag in der 21. Versuchswoche wieder die in der Simulation vorausgesagten Werte. Nach weiteren 4 Versuchswochen trat jedoch erneut eine Hemmung des Prozesses auf.



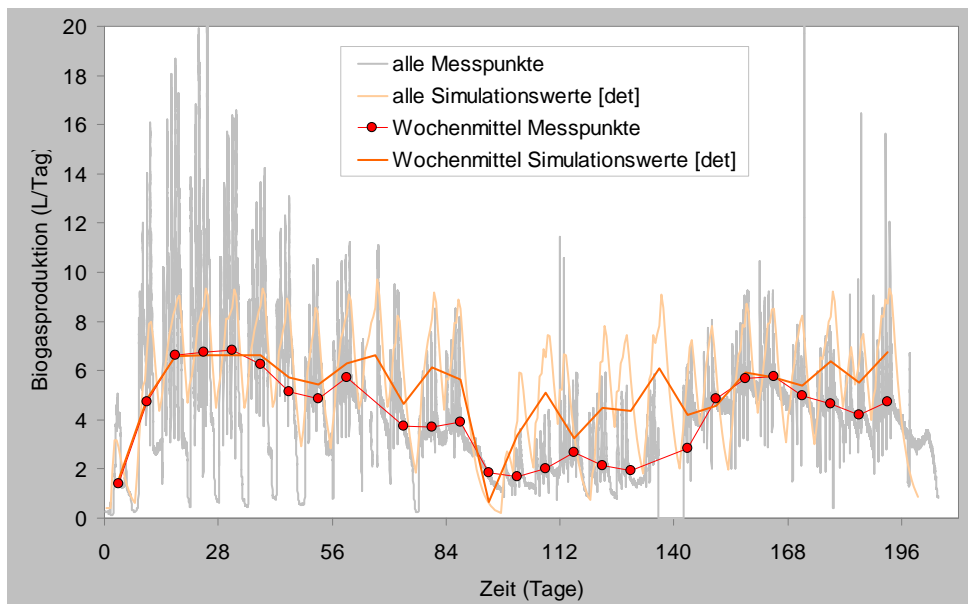


Abbildung 5-21: Gaserträge ALBA-C13

[det] .. Simulation auf deterministischer Basis (bifa)

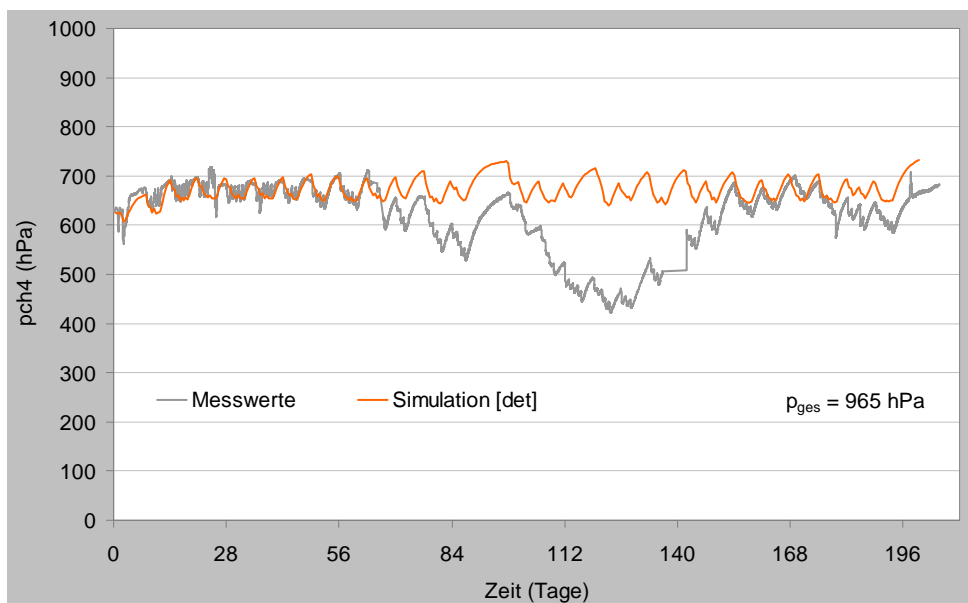


Abbildung 5-22: Verlauf Methan-Partialdruck ALBA-C13

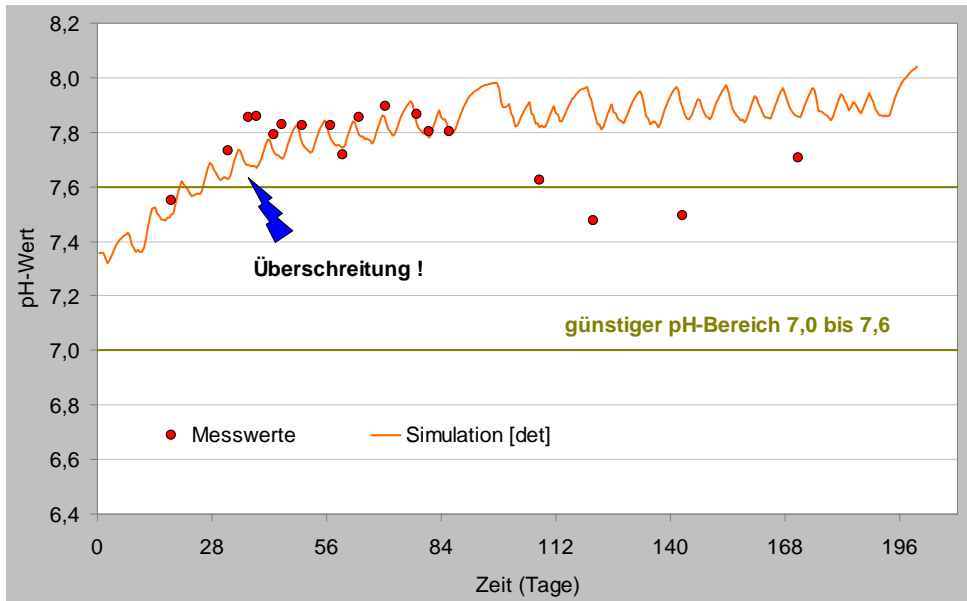


Abbildung 5-23: Verlauf pH-Wert ALBA-C13

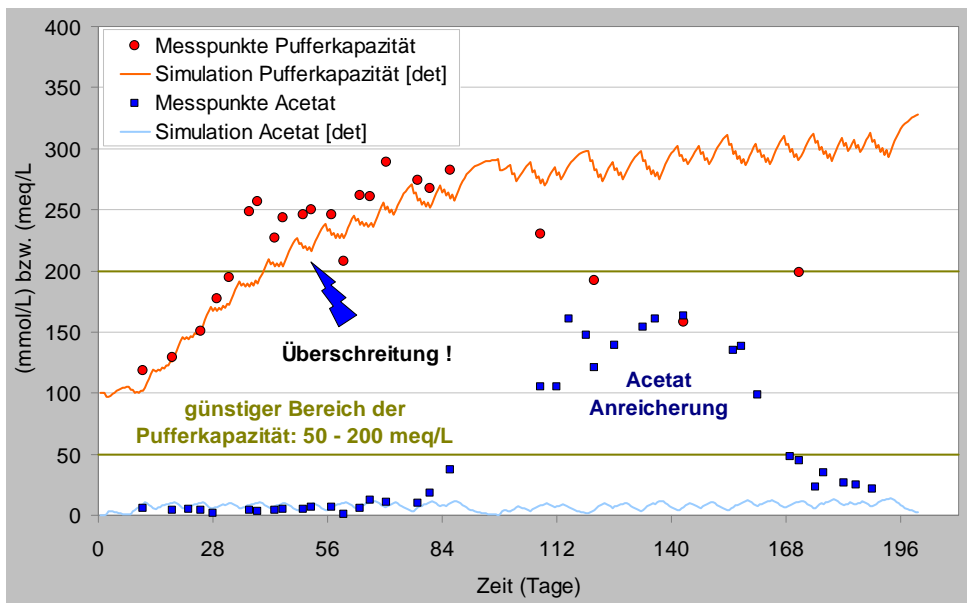


Abbildung 5-24: Verlauf Pufferkapazität und Acetat ALBA-C13

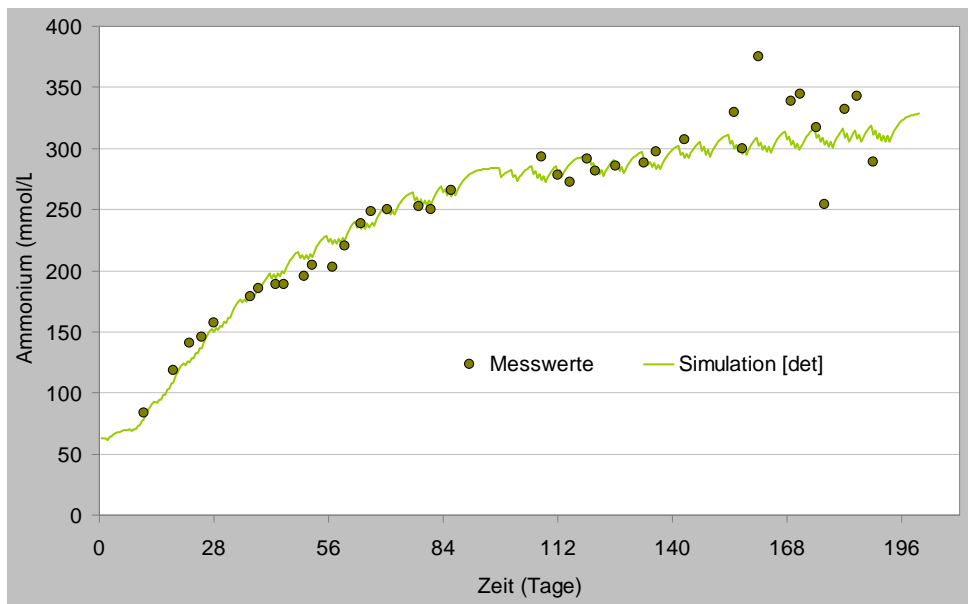


Abbildung 5-25: Verlauf der Ammoniumkonzentration ALBA-C13

#### 5.5.4 ALBA-C14 – Vergärung von Grassilage

Grassilage ist ein weit verbreitetes Basis-Substrat, das deshalb in einem weiteren *alba*-Versuch zur Validierung untersucht wurde. Die Eigenschaften der hierbei eingesetzten Grassilage wurden bereits in Kapitel 5.3.2 detailliert dargestellt. Die im Versuch gewählte Raumbelastung betrug im Mittel 0,58 g oTM/L/d, die theoretische hydraulische Verweildauer rund 85 Tage. Der Reaktor wurde bei konstant 37 °C betrieben, das Arbeitsvolumen betrug 13,4 Liter. Angeimpft wurde mit Faulschlamm aus einer kommunalen Kläranlage.

##### Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse sind zusammenfassend mit den Messdaten der *alba* in Abbildung 5-26 bis Abbildung 5-29 dargestellt.

Grassilage ist ein stabil vergärbare Substrat, wie der Versuchsverlauf und die Simulation zeigen. Die Abweichungen zwischen den prognostizierten Werten und den Messwerten waren zumeist gering. Die Gasproduktion erreichte nach wenigen Wochen mit etwa 5 L/Tag (Abbildung 5-26) einen stabilen Wert. Der Methangehalt pendelte sich bei 54 Volumenprozent (ca. 525 hPa) ein (Abbildung 5-27). Der pH-Wert und die Pufferkapazität blieben stets in einem günstigen Bereich (pH 7,2 bis 7,4; Pufferkapazität 80 bis 100 meq/L). Eine Anreicherung von Acetat fand nur in geringem Umfang statt (< 10 mmol/L). Aus den insgesamt zugeführten 2,45 kg Grassilage wurden 412 NL Biogas gebildet. Der spezifische Gasertrag betrug folglich 544 NL/kg oTM bzw. 294 NL CH<sub>4</sub>/kg oTM. Zum Vergleich – der Richtwert der KTBL liegt bei 560 NL/kg oTM bzw. 302 NL CH<sub>4</sub>/kg oTM (KTBL, 2005).

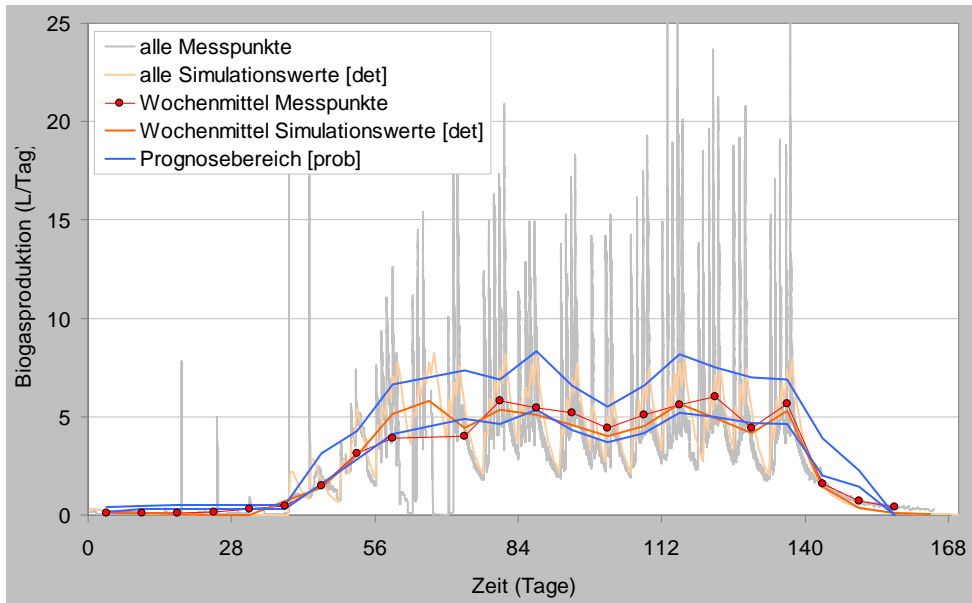


Abbildung 5-26: Gaserträge ALBA-C14

[det] .. Simulation auf deterministischer Basis (bifa); [prob] .. Simulation auf probabilistischer Basis (FITEC) → Berechnungsgrundlage waren Wochenmittelwerte des Inputs

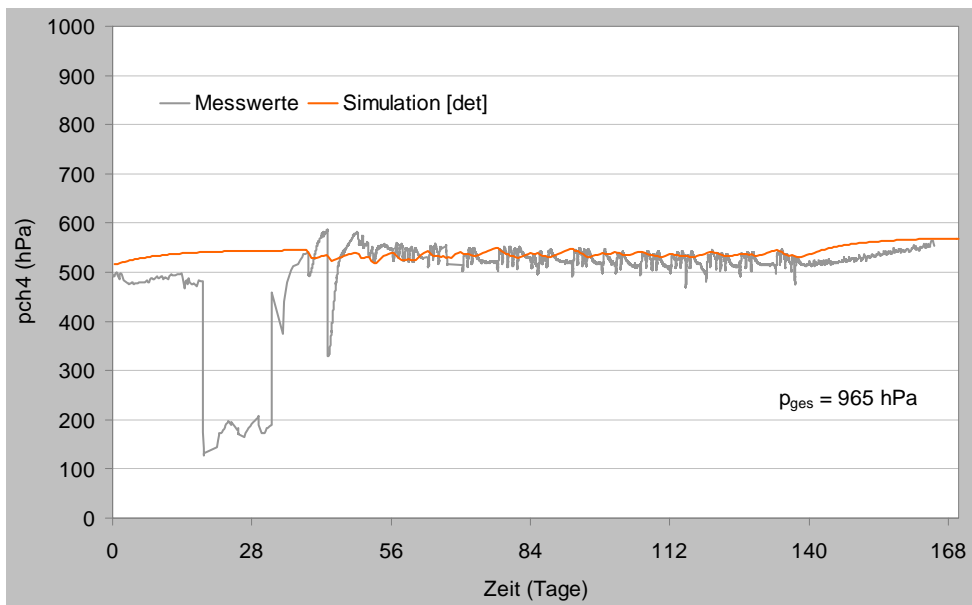


Abbildung 5-27: Verlauf Methan-Partialdruck ALBA-C14

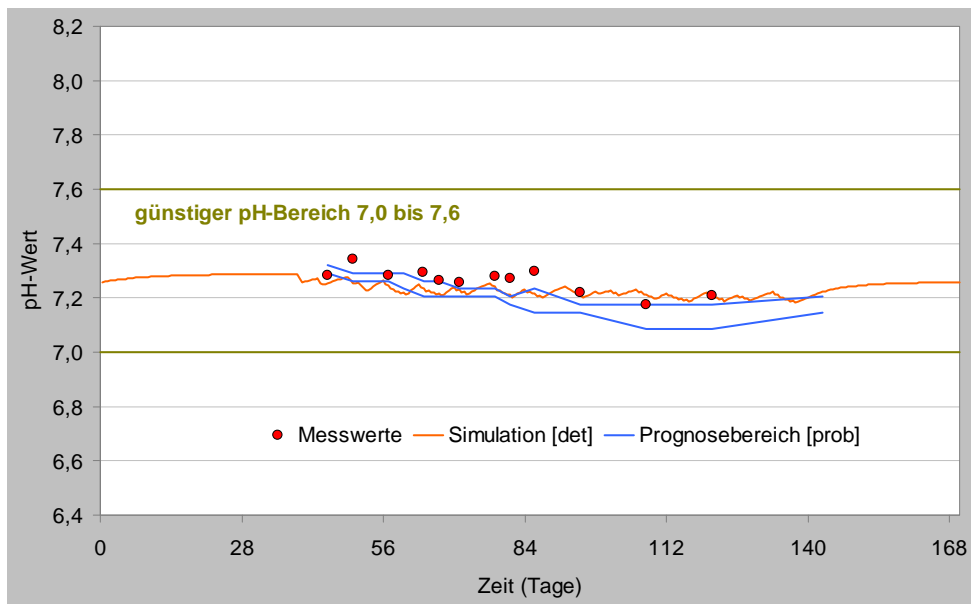


Abbildung 5-28: Verlauf pH-Wert ALBA-C14

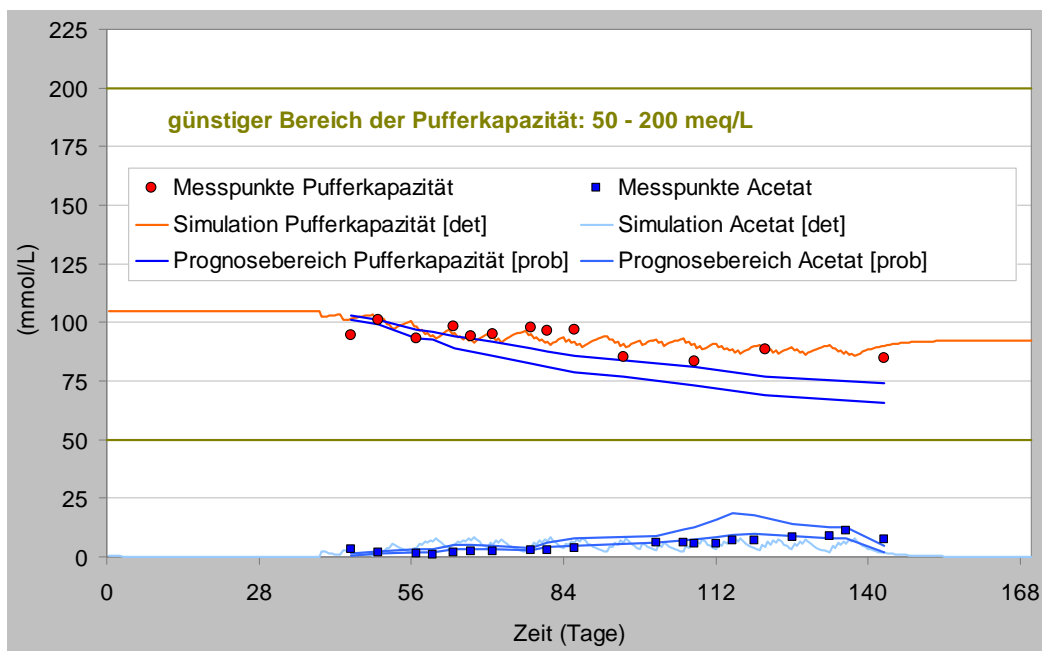


Abbildung 5-29: Verlauf Pufferkapazität und Acetat ALBA-C14

## 5.6 Verifizierung *biotip* (Messprogramm Biogas)

In der Praxis werden eine Vielzahl unterschiedlichster Inputmaterialien in Biogasanlagen verwertet. In der Validierungsphase konnte gezeigt werden, dass sich mit Hilfe des Simulationsmoduls von *biotip* belastbare Prognosen für den Prozessverlauf bei Einsatz der untersuchten Substrate bzw. Modellsubstanzen erstellen lassen. Ob diese Erfahrungen auch im Praxisumfeld ihre Gültigkeit behalten, wurde in folgender Weise verifiziert.

7 Biogasanlagenbetreiber stellten ihre anlagenspezifischen Kennwerte über einen längeren Zeitraum zur Verfügung. Inputdaten konnte leider nicht bereitgestellt werden.

In FNR (2005) sind umfangreiche Daten eines wissenschaftlichen Messprogramms, das die *Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)* am *Institut für Technologie und Biosystemtechnik* durchgeführt hat, enthalten. Dort werden ausgewählte Biogasanlagen und deren Inputmaterialien vergleichsweise detailliert beschrieben, so dass auf dieser Basis eine Verifizierung von *biotip* erfolgen konnte.

Nachfolgend werden zuerst die Messdaten und die simulierten Daten zunächst für die Anlage *BGA01* und anschließend für die Anlagen *BMP02*, *BMP04*, *BMP05* und *BMP07* aus dem *Messprogramm Biogas* eingehender beschrieben.

### 5.6.1 Anlage *BGA01*

Die Anlage *BGA01* ist eine einfache, einstufige Biogasanlage, die hauptsächlich Speisereste vergärt. Tabelle 5-6 bis Tabelle 5-8 zeigen das Substrat-Mengengerüst, die Behältervolumina und die Energieangaben für diese Anlage. In Abbildung 5-30 wird die Substratzufuhr über den Beobachtungszeitraum grafisch dargestellt.

Tabelle 5-6: Mengengerüst Substrate *BGA01*

Substrat	Bezeichnung	Menge (Mg/Jahr)	TM-Gehalt (% FM)
1	Speisereste	1.910	18,0 – 23,0 <sup>a)</sup>
2	Maissilage	361	35,0 <sup>a)</sup>
3	Panseninhalte <sup>b)</sup>	257	9,0 <sup>a)</sup>
4	Gülle	1.774	8,5 – 9,0 <sup>a)</sup>
5	Wasser	782	--

a) .. eigene Messungen, Literaturdaten, Annahmen; b) .. für die Simulation vernachlässigbar, da nur geringe Mengen

Tabelle 5-7: Behälter-Volumina *BGA01*

Behälter	Teilprozess	Bauform	Arbeitsvolumen (m <sup>3</sup> )	Temperatur (°C)	Gaserfassung ja/nein
1	Hauptfermenter <sup>a)</sup>	stehend	700	40	ja

a) Betriebsweise: Substrat → Hauptfermenter

Tabelle 5-8: Energieangaben *BGA01*

installierte elektrische Leistung		kWel	160		
jährliche Stromproduktion gesamt		kWh/Jahr	1,24 x 10 <sup>6</sup>		
BHKW	Typ	Ø Leistung (kWel)	Zündölanteil (%)	elektrischer Wirkungsgrad (%)	
1 + 2	Zündstrahlaggregate	142	12,5	30	

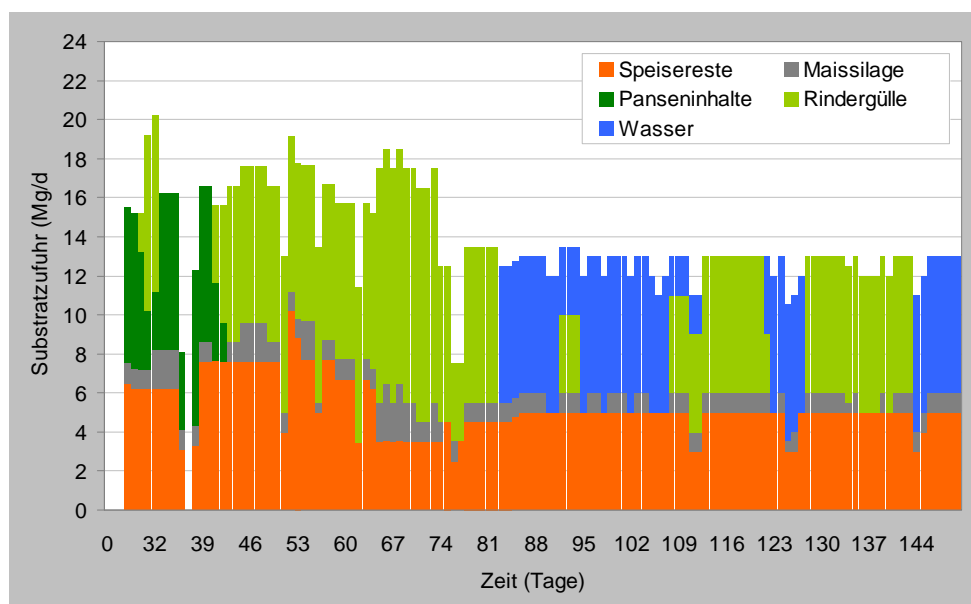
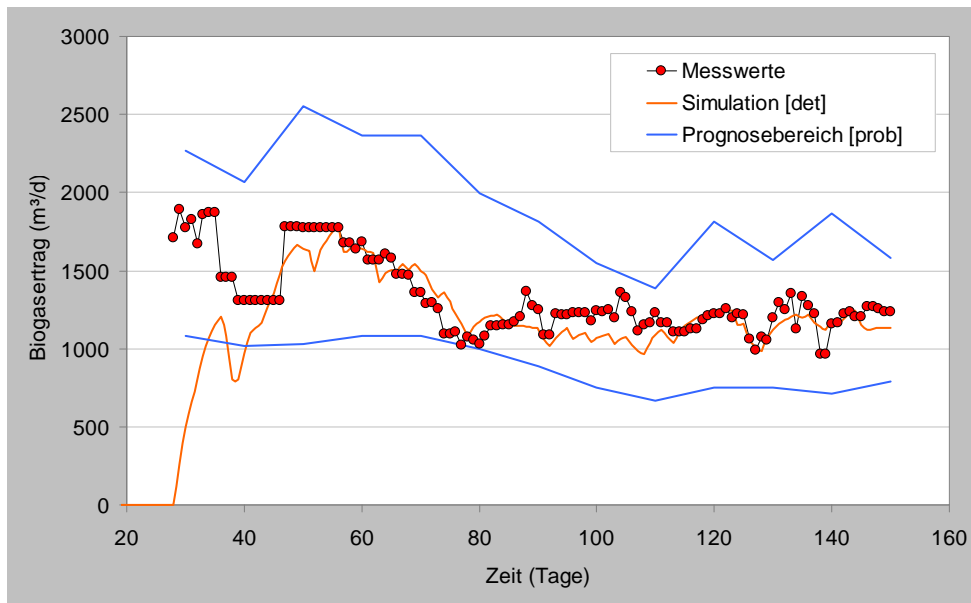


Abbildung 5-30: Substratzufuhr Anlage *BGA01*

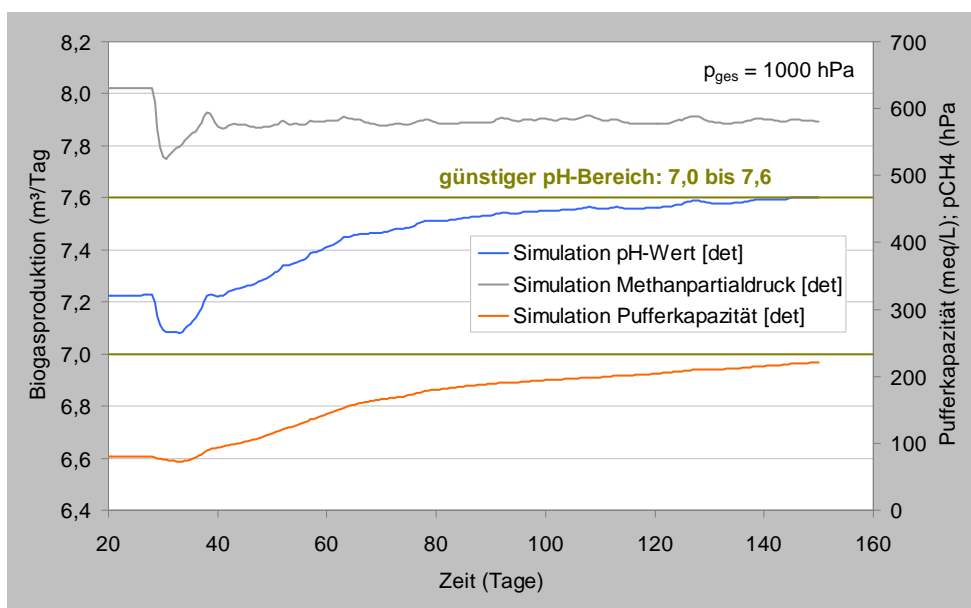
## Ergebnisse

Abbildung 5-31 zeigt den Biogasertrag in der Simulation und die zugehörigen Messdaten der Anlage *BGA01*: die Übereinstimmung erreicht ein hohes Maß. Bei der probabilistischen Betrachtungsweise, die mögliche Schwankungen der Eingangsdaten mit berücksichtigt, werden zudem die potenziell erreichbaren Bereiche für den Gasertrag sichtbar.

Die Zusammensetzung und Qualität der Inputmaterialien in Bezug auf die Prozess-Stabilität lässt sich anhand der Parameter pH-Wert und Pufferkapazität in der Simulation beurteilen (Abbildung 5-32). Die Anlage *BGA01* erreichte im Beobachtungszeitraum einen günstigen Bereich für den pH-Wert (knapp unter 7,6) bzw. die Pufferkapazität (~ 210 meq/L). Dies ist eine gute Voraussetzung für einen stabilen Betrieb der Anlage.


 Abbildung 5-31: Biogasertrag Anlage *BGA01*

[det] .. Simulation auf deterministischer Basis (bifa); [prob] .. Simulation auf probabilistischer Basis (FITEC)


 Abbildung 5-32: Anlage *BGA01* - pH-Wert, Pufferkapazität, Methanpartialdruck in der Simulation



## 5.6.2 Anlage *BMPO2*

Anlage *BMPO2* ist eine einfache, einstufige Biogasanlage, die – neben geringen Mengen an Co-Substraten – hauptsächlich Schweinegülle und Hühnertrockenkot vergärt. Tabelle 5-9 bis Tabelle 5-11 zeigen das Substrat-Mengengerüst, die Behältervolumina und die Energieangaben für diese Anlage. In Abbildung 5-33 wird die Substratzufuhr über den Beobachtungszeitraum grafisch dargestellt.

Tabelle 5-9: Mengengerüst Substrate *BMPO2*

Substrat	Bezeichnung	Menge (Mg/Jahr)	TM-Gehalt (% FM)
1	Schweinegülle	3592	6 <sup>a)</sup>
2	Hühnertrockenkot	368	45 <sup>a)</sup>
3	Glycerin	109	90 <sup>a)</sup>
4	Kaffeereste <sup>b)</sup>	58	--
5	Sonnenblumenspelzen <sup>b)</sup>	34	--
6	Melasse <sup>b)</sup>	15	--

a) .. Literaturdaten, Annahmen; b) .. für die Simulation vernachlässigbar, da nur geringe Mengen

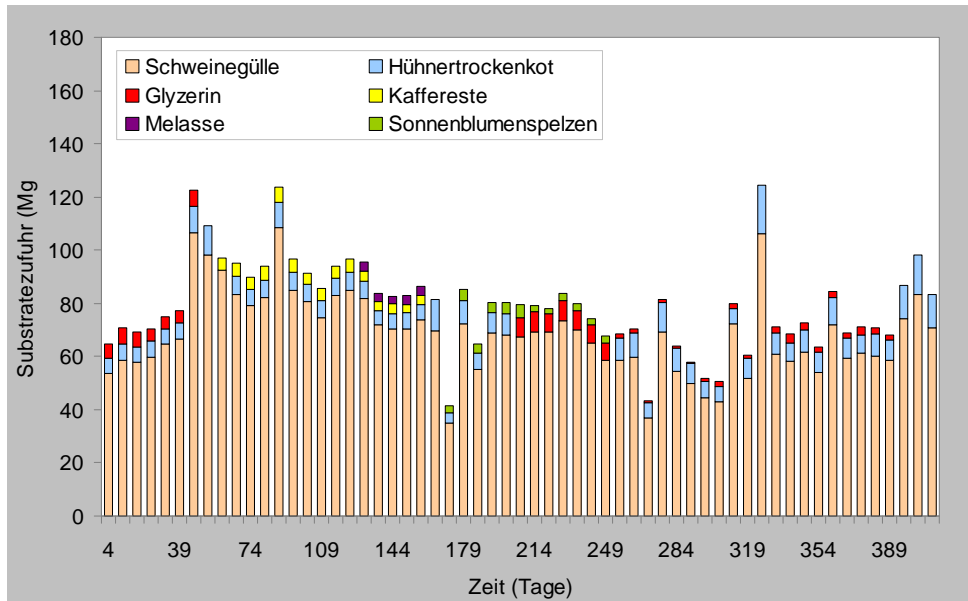
Tabelle 5-10: Behälter-Volumina *BMPO2*

Behälter	Teilprozess	Bauform	Arbeitsvolumen (m <sup>3</sup> )	Temperatur (°C)	Gaserfassung ja/nein
1	Hauptfermenter <sup>a)</sup>	stehend	609	35	ja
2	Gärrückstandslager <sup>a)</sup>	stehend	1.000	k. A.	nein

a) Betriebsweise: Substrat → Hauptfermenter → Gärrückstandslager

Tabelle 5-11: Energieangaben *BMPO2*

installierte elektrische Leistung		kWel	70		
jährliche Stromproduktion gesamt		kWh/Jahr	0,45 x 10 <sup>6</sup>		
BHKW	Typ	Ø Leistung (kWel)	Zündölanteil (%)	elektrischer Wirkungsgrad (%)	
1	Zündstrahlaggregat	64	13,5	30	

Abbildung 5-33: Substratzufuhr *BMP02*

### Ergebnisse

Abbildung 5-34 zeigt den Methanertrag in der Simulation und den vor Ort ermittelten Methanertrag der Anlage *BMP02*. Auf Basis einer deterministischen Betrachtungsweise folgt die Prognose in den ersten 250 Tagen in guter Übereinstimmung den Versuchsdaten. Danach ist allerdings eine deutliche Abweichung der simulierten Daten von den Messwerten zu beobachten. Ursache für diese Beobachtung dürfte eine, z. B. jahreszeitlich bedingte, Veränderung der Substratqualität – insbesondere des Gehalts an Trockenmasse im Input – sein. Bei einer probabilistischen Betrachtungsweise, die solche Schwankungen mit einschließt, liegen die Messdaten bis auf wenige Ausnahmen im prognostizierten Bereich. Daten zum Trockenmassegehalt der einzelnen Inputmaterialien waren aus den veröffentlichten Daten des *Messprogramms Biogas* leider nicht zu entnehmen.

Interessant ist nun – zumindest für die ersten 240 Tage des Beobachtungszeitraums – eine Betrachtung der Simulationsparameter pH-Wert bzw. Pufferkapazität (Abbildung 5-35). Hier ist zu sehen, dass der Prozess gemäß Prognose zeitweise bei pH-Werten über 7,6 bzw. knapp unterhalb von 7,8 gefahren wurde. In diesem pH-Bereich dürften die ersten beiden Phasen des anaeroben Abbaus (Hydrolyse und Versäuerungsphase) nicht mehr optimal ablaufen. Ausgewogener war der Prozess dagegen immer dann, wenn größere Anteile Glycerin und dafür weniger Schweinegülle bzw. Hühner trockenkot im Input enthalten waren. Dann lagen die Parameter pH-Wert und Pufferkapazität gemäß Prognose in einem günstigen Bereich.

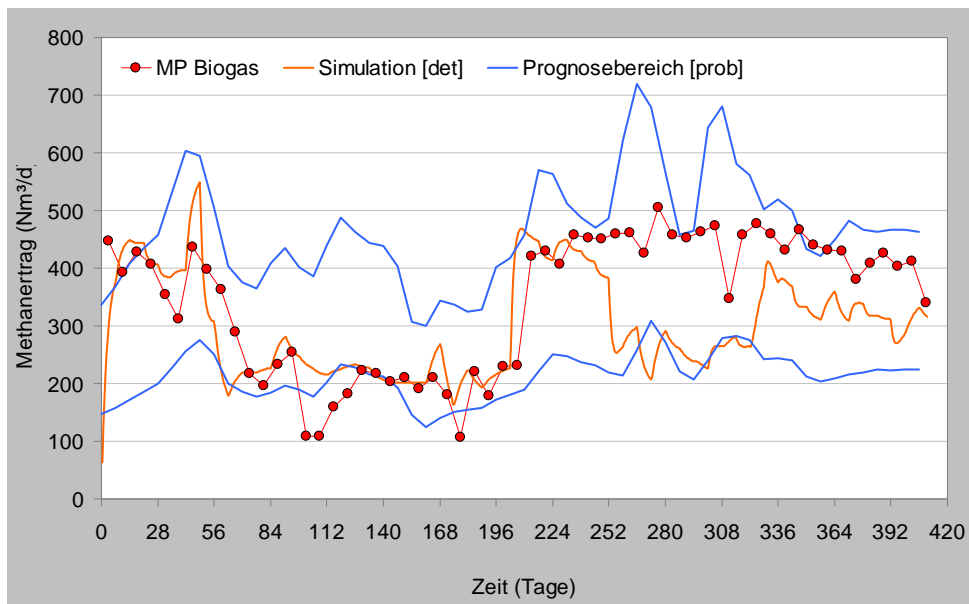


Abbildung 5-34: Methanertrag *BMP02*

[det] .. Simulation auf deterministischer Basis (bifa); [prob] .. Simulation auf probabilistischer Basis (FITEC)

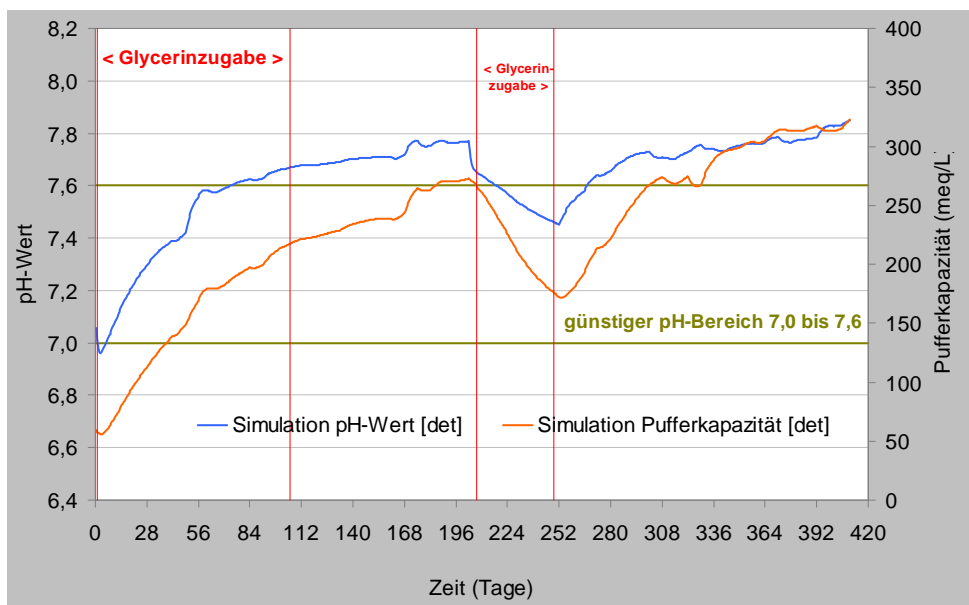


Abbildung 5-35: Prognose pH-Wert und Pufferkapazität *BMP02*

### 5.6.3 Anlage *BMP04*

Anlage *BMP04* ist eine zweistufige Biogasanlage, die ein breites Spektrum von Substraten, hauptsächlich aber Schweinegülle und Silomais, vergärt. Tabelle 5-12 bis Tabelle 5-14 zeigen das Substrat-Mengengerüst, die Behältervolumina und die Energieangaben für diese Anlage. In Abbildung 5-36 wird die Substratzufuhr über den Beobachtungszeitraum grafisch dargestellt.

Tabelle 5-12: Mengengerüst Substrate *BMP04*

Substrat	Bezeichnung	Menge (Mg/Jahr)	TM-Gehalt (% FM)
1	Maissilage	4.141	35,0 <sup>a)</sup>
2	Getreideausputz	828	87,0 <sup>a)</sup>
3	Schweinegülle	1.941	6,0 <sup>a)</sup>
4	Kartoffeln	200	22,2 <sup>a)</sup>
5	Zuckerrübenblatt-Silage	248	18,0 <sup>a)</sup>
6	Roggen-GPS	98	29,4 <sup>a)</sup>
7	Grassilage	81	34,6 <sup>a)</sup>
8	Molke	300	6,4 <sup>a)</sup>
9	Kartoffelpülpe	16	19,0 <sup>a)</sup>
10	Wasser	429	--

a) .. Literaturdaten, Annahmen

Tabelle 5-13: Behälter-Volumina *BMP04*

Behälter	Teilprozess	Bauform	Arbeitsvolumen (m <sup>3</sup> )	Temperatur (°C)	Gaserfassung ja/nein
1	Hauptfermenter 1 <sup>a)</sup>	stehend	1.046	44	ja
2	Hauptfermenter 2 <sup>a)</sup>	stehend	1.086	41	ja
3	Gärrückstandslager <sup>a)</sup>	stehend	1.000	k. A.	nein

a) Betriebsweise: Substrat → Hauptfermenter 1 → Hauptfermenter 2 → Gärrückstandslager

Tabelle 5-14: Energieangaben *BMP04*

installierte elektrische Leistung		kWel	500		
jährliche Stromproduktion gesamt		kWh/Jahr	2,98 x 10 <sup>6</sup>		
BHKW	Typ	Ø Leistung (kWel)	Zündölanteil (%)	elektrischer Wirkungsgrad (%)	
1	Zündstrahlaggregat	231	10,2	35	
2	Zündstrahlaggregat	244	8,9	35	

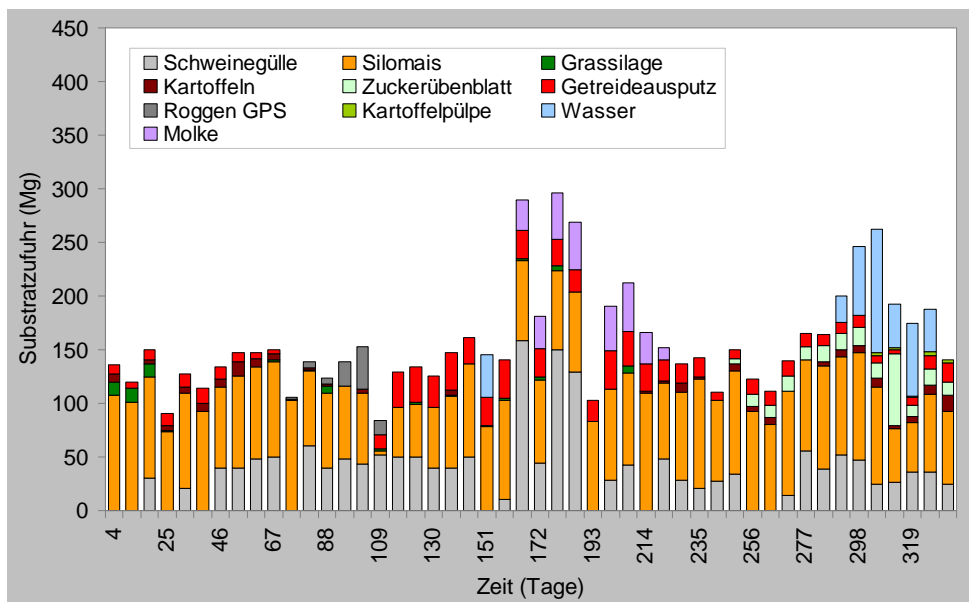


Abbildung 5-36: Substratzufuhr *BMP04*

## Ergebnisse

Abbildung 5-37 zeigt die Messwerte und die simulierten Daten für den Methanertrag der Anlage *BMP04*. Der Verlauf zeigt über den gesamten Beobachtungszeitraum nur geringe Abweichungen zwischen Prognose und Messwerten. Wiederum ist eine Analyse weiterer, simulierter Parameter aufschlussreich (Abbildung 5-38). Vor allem durch die Proteinzufuhr mit den Inputsubstraten steigt der pH-Wert in der Simulation auf Werte zwischen 7,6 und 7,7 an. Die Pufferkapazität bewegt sich dann um etwa 300 meq/L. Für den Aufschluss der schwieriger abbaubaren Pflanzenbestandteile wäre ein etwas niedrigerer pH-Wert sicherlich von Vorteil.

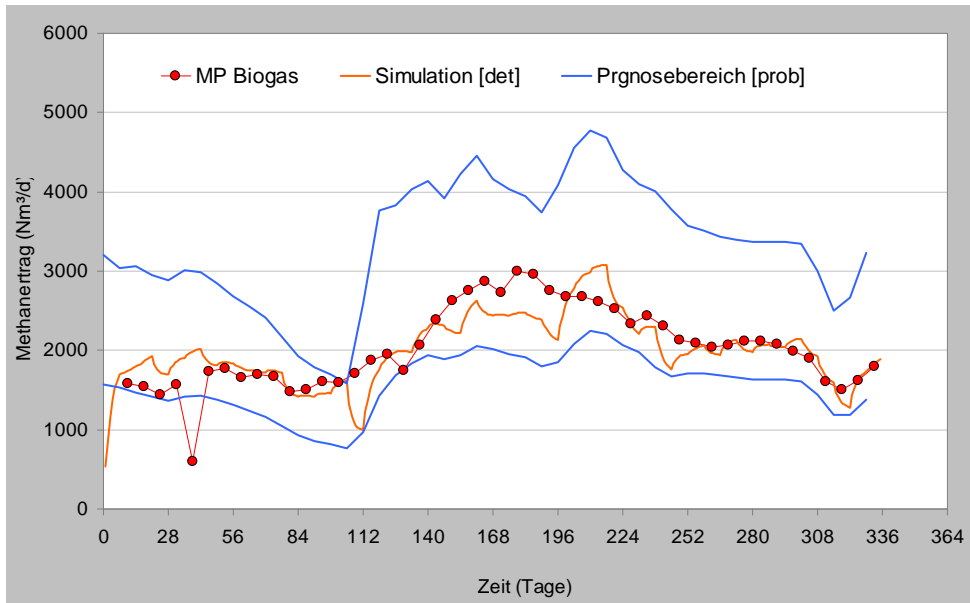


Abbildung 5-37: Methanertrag *BMP04*

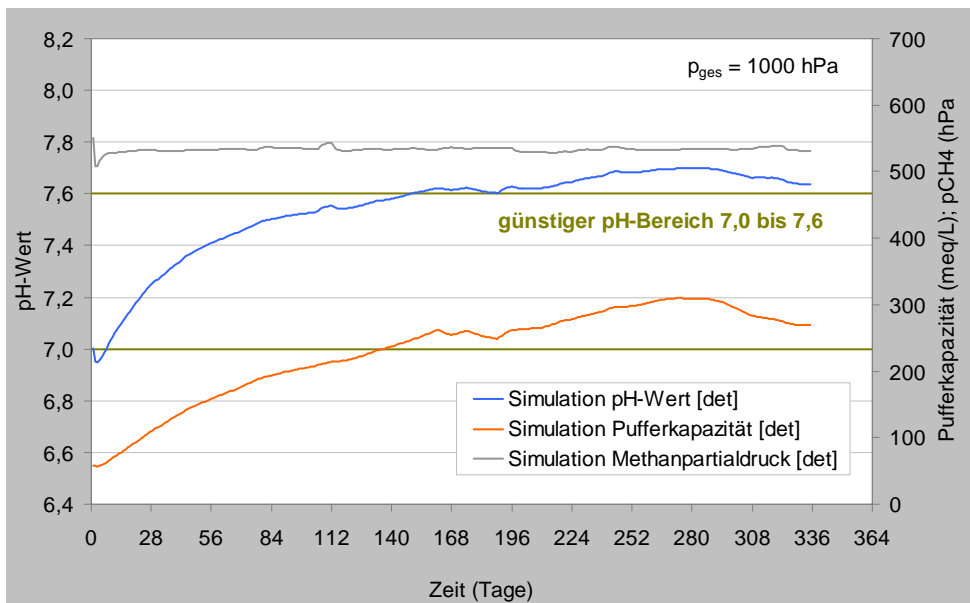


Abbildung 5-38: *BMP04* - pH-Wert, Pufferkapazität, Methanpartialdruck in der Simulation

#### 5.6.4 Anlage BMP05

Anlage *BMP05* ist eine zweistufige Biogasanlage, die neben *Nachwachsenden Rohstoffen* auch Abfälle aus der Nahrungsmittelindustrie vergärt. Tabelle 5-15 bis Tabelle 5-17 zeigen wiederum das Substrat-Mengengerüst, die Behältervolumina und die Energieangaben für diese Anlage. In Abbildung 5-39 ist die Substratzufuhr über den Beobachtungszeitraum in einer Grafik zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 5-15: Mengengerüst Substrate *BMP05*

Substrat	Bezeichnung	Menge (Mg/Jahr)	TM-Gehalt (% FM)
1	Silomais	3.560	35,0 <sup>a)</sup>
2	Rindergülle	1.836	8,5 <sup>a)</sup>
3	Schweinegülle	1.767	6,0 <sup>a)</sup>
4	Speisereste	1.716	23,5 <sup>a)</sup>
5	Grassilage	1.026	35,1 <sup>a)</sup>
6	Molke	755	6,4 <sup>a)</sup>
7	Kartoffelpülpe	676	19,0 <sup>a)</sup>
8	Schlempe	570	10,0 <sup>a)</sup>
9	Fett	515	20,0 <sup>a)</sup>
10	Hundefutter	387	80,0 <sup>a)</sup>
11	Sonnenblumensilage <sup>b)</sup>	98	--
12	Apfelprester <sup>b)</sup>	69	22,0 <sup>a)</sup>
13	Getreideaussatz <sup>b)</sup>	17	87,0 <sup>a)</sup>

a) .. Literaturdaten, Annahmen; b) .. für die Simulation vernachlässigbar, da nur geringe Mengen

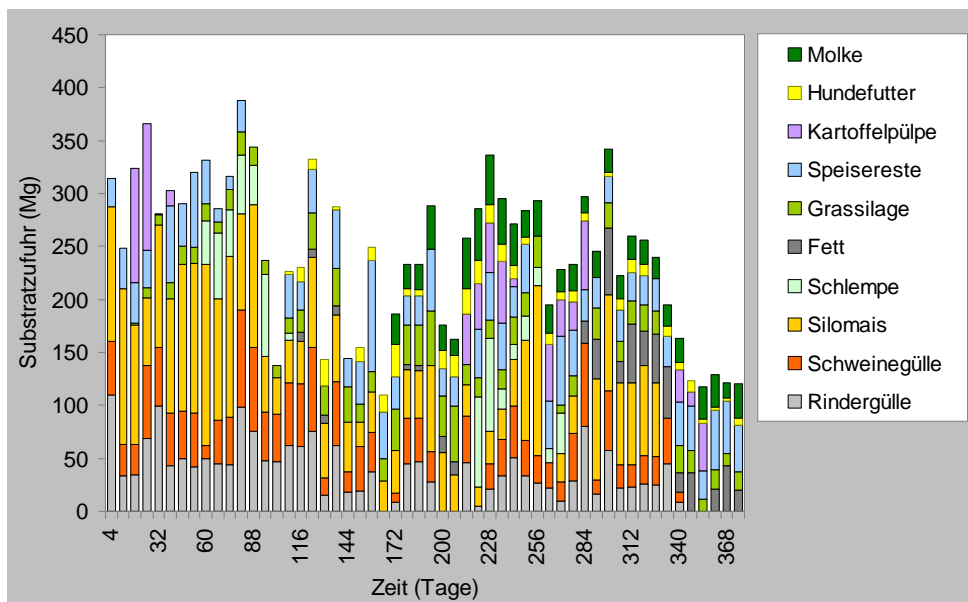
Tabelle 5-16: Behälter-Volumina *BMP05*

Behälter	Teilprozess	Bauform	Arbeitsvolumen (m <sup>3</sup> )	Temperatur (°C)	Gaserfassung ja/nein
1	Hauptfermenter 1 <sup>a)</sup>	stehend	2.125	49	ja
2	Hauptfermenter 2 <sup>a)</sup>	stehend	2.244	42	ja
3	Gärrückstandslager <sup>a)</sup>	stehend	2.400	k. A.	ja

a) Betriebsweise: Substrat → Hauptfermenter 1 → Hauptfermenter 2 → Gärrückstandslager

Tabelle 5-17: Energieangaben *BMP05*

installierte elektrische Leistung		kWel	555		
jährliche Stromproduktion gesamt		kWh/Jahr	4,03 x 10 <sup>6</sup>		
BHKW	Typ	Ø Leistung (kWel)	Zündölanteil (%)	elektrischer Wirkungsgrad (%)	
1	Zündstrahlaggregat	235	10,3	34	
2	Zündstrahlaggregat	245	10,3	34	
3	Zündstrahlaggregat	45	13,9	33	

Abbildung 5-39: Substratzufuhr *BMP05*

### Ergebnisse

In Abbildung 5-40 sind die Messwerte und die simulierten Daten für den Methanertrag der Anlage *BMP05* dargestellt. Über den gesamten Beobachtungszeitraum treten auch hier nur geringe Abweichungen zwischen Prognose und Messwerten auf. Die Analyse weiterer simulierter Parameter zeigt ein ähnliches Bild wie bei *BMP04* (Abbildung 5-41). Auch hier verlässt der pH-Wert in der Simulation den günstigen Bereich und steigt auf Werte zwischen 7,7 und 7,8 an (Pufferkapazität etwa 300 mmol/L).



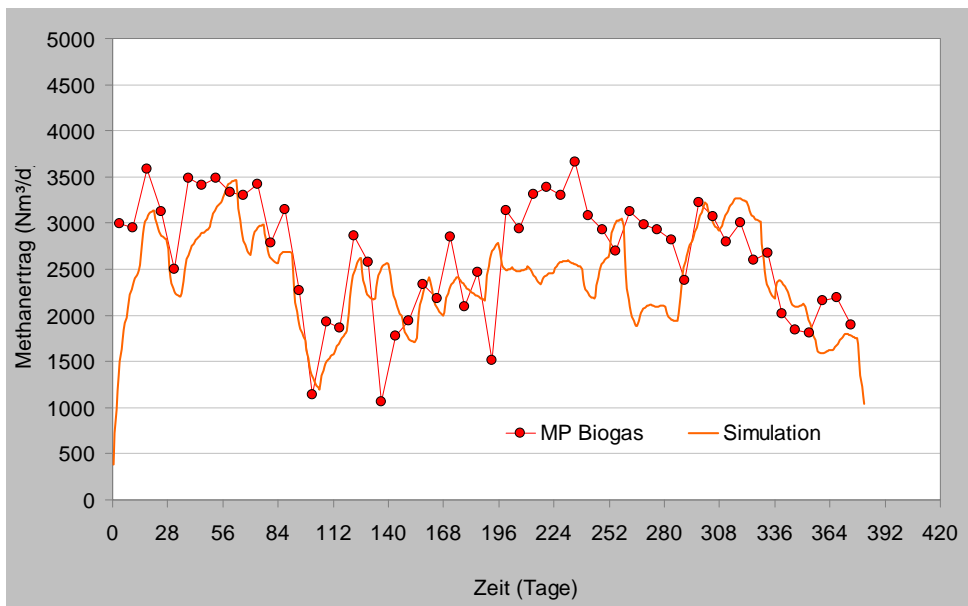


Abbildung 5-40: Methanertrag *BMP05*

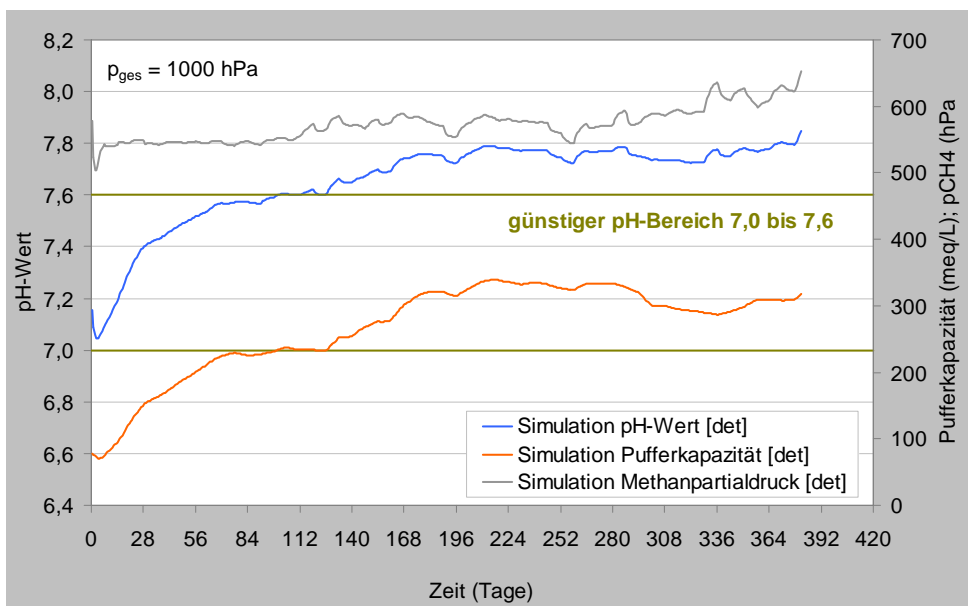


Abbildung 5-41: *BMP05* - pH-Wert, Pufferkapazität, Methanpartialdruck in der Simulation

### 5.6.5 Anlage *BMP07*

Anlage *BMP07* ist eine dreistufige Biogasanlage, die vor allem Kartoffelabfälle und Speisereste vergärt. Tabelle 5-18 bis Tabelle 5-20 zeigen das Substrat-Mengengerüst, die Behältervolumina und die Energieangaben für diese Anlage. In Abbildung 5-42 ist die Substratzufuhr über den Beobachtungszeitraum grafisch im Detail dargestellt. Wichtig ist darauf hinzuweisen, dass für die Simulation dieser Anlage die einzelne Fermenterstufen zusammengefasst betrachtet wurden.

Tabelle 5-18: Mengengerüst Substrate *BMP07*

Substrat	Bezeichnung	Menge (Mg/Jahr)	TM-Gehalt (% FM)
1	Kartoffelschälabfälle	6.592	10,9
2	Speisereste	1.702	23,5 <sup>a)</sup>
3	Kartoffelpülpe	791	19,0 <sup>a)</sup>
4	Zwiebeln	501	12,0
5	Rindergülle	496	8,5
6	Silomais	299	35,0 <sup>a)</sup>
7	Getreideausputz <sup>b)</sup>	165	--
8	Getreide <sup>b)</sup>	160	--
9	Kartoffeln <sup>b)</sup>	85	--
10	Weizen GPS <sup>b)</sup>	39	--
11	Rasenschnitt <sup>b)</sup>	22	--

a) .. Literaturdaten, Annahmen; b) .. für die Simulation vernachlässigbar, da nur geringe Mengen

Tabelle 5-19: Behälter-Volumina *BMP07*

Behälter	Teilprozess	Bauform	Arbeitsvolumen (m <sup>3</sup> )	Temperatur (°C)	Gaserfassung ja/nein
1	Hauptfermenter 1 <sup>a)</sup>	liegend	460	39	ja
2	Hauptfermenter 2 <sup>a)</sup>	liegend	720	39	ja
3	Nachgärer 1+2 <sup>a)</sup>	stehend	800	39	ja
4	Gärrückstandslager 1+2 <sup>a)</sup>	stehend	2.700	k. A.	nein

a) Betriebsweise: Substrat → Hauptfermenter 1+2 → Nachgärer 1 → Nachgärer 2 → Gärrückstandslager 1 → Gärrückstandslager 2

Tabelle 5-20: Energieangaben *BMP07*

installierte elektrische Leistung		kWel	260	
jährliche Stromproduktion gesamt		kWh/Jahr	1,79 x 10 <sup>6</sup>	
BHKW	Typ	Ø Leistung (kWel)	Zündölanteil (%)	elektrischer Wirkungsgrad (%)
1	Zündstrahlaggregat	79	12,8	37
2	Zündstrahlaggregat	79	11,4	34
3	Zündstrahlaggregat	91	13,0	32

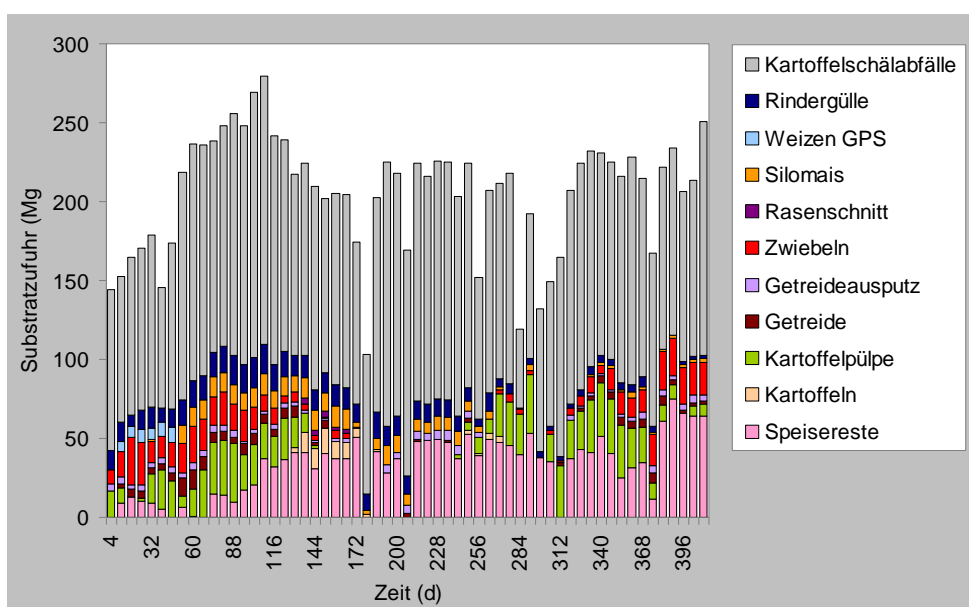
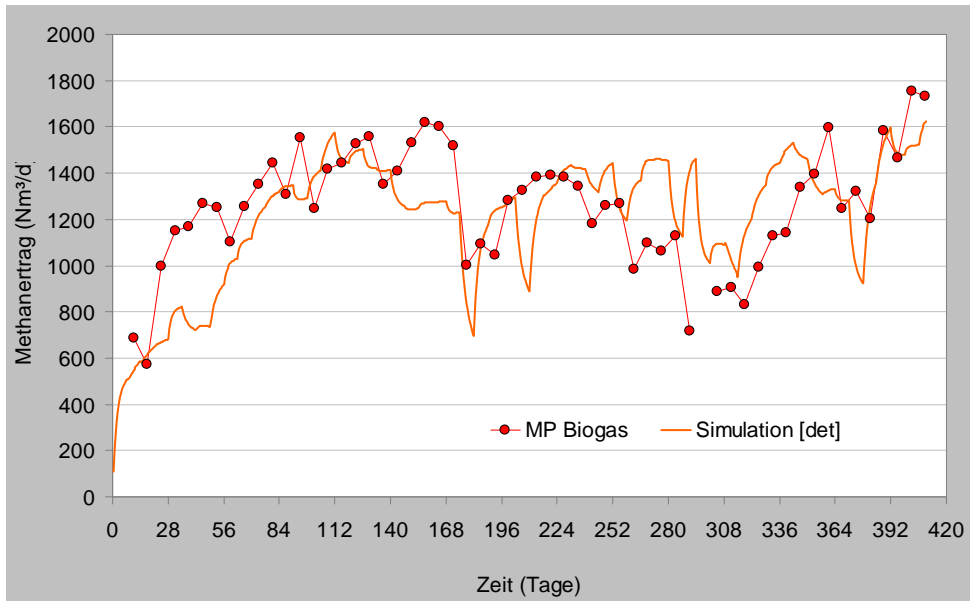
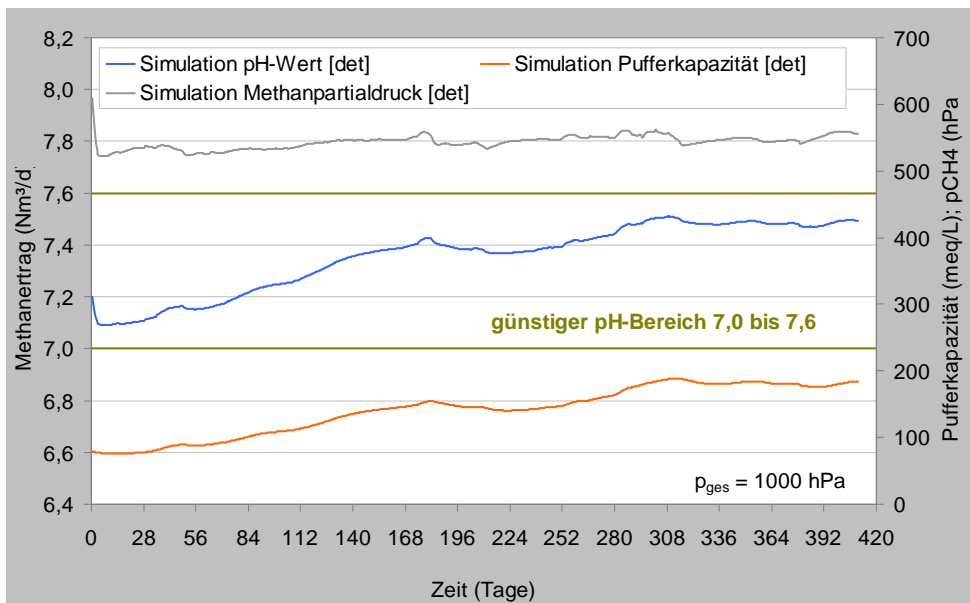


Abbildung 5-42: Substratzufuhr *BMP07*

### Ergebnisse

Die Messwerte und die simulierten Daten für den Methanertrag der Anlage *BMP07* sind in Abbildung 5-43 dargestellt. Wiederum ist festzustellen, dass die Abweichungen zwischen den simulierten Methanerträgen und den vor Ort bestimmten Werten gering sind.

Zwar konnte der Methanertrag für Anlage *BMP07* gut simuliert werden, Grundlage hierfür war jedoch eine zusammenfassende Betrachtung aller Reaktoren. Bis jetzt können mit *biotip* noch keine Prognosen für einzelne Pfropfenstromfermenter erstellt werden. Die in Abbildung 5-44 zusammen mit dem simulierten Verlauf des Methanpartialdrucks im Biogas dargestellten Prognosen für die Parameter pH-Wert und Pufferkapazität sind deshalb lediglich als Indikator für die Ausgewogenheit der Substratzusammenstellung zu interpretieren. Diese kann als gut bezeichnet werden, da die pH-Werte in der Simulation stets in einem günstigen Bereich lagen.

Abbildung 5-43: Methanertrag *BMP07*Abbildung 5-44: *BMP07* - pH-Wert, Pufferkapazität, Methanpartialdruck in der Simulation

## 6 Praxisbezug der Projektarbeiten

Der Boom der Biogasbranche und seine möglichen Risiken

Infolge des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) wurde in den letzten Jahren verstärkt in den Bau und in den Betrieb von Biogasanlagen investiert (Anonym, 2004; Bethge, 2004). Der Fachverband Biogas prognostizierte hierzu, dass sich die Zahl der Anlagen in Deutschland sprunghaft, d. h. in nur 2 Jahren von 2.000 (im Jahr 2003) auf 4.000 (im Jahr 2005) verdoppeln wird (BGK, 2004; Abbildung 6-1). Der Boom wird aller Voraussicht nach auch in den nächsten Jahren weiter anhalten, wobei insbesondere Bayern nach wie vor ein Zentrum der Aktivitäten sein dürfte.

### Strom vom Acker

Biogasanlagen in Deutschland (2002)

- Anlagen unter 70 Kilowatt (kW)
- 70 bis 499 kW
- ab 500 kW

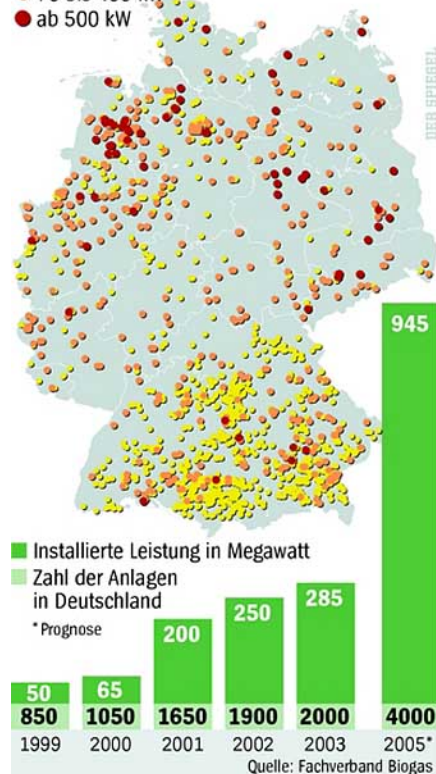


Abbildung 6-1: Entwicklung der Zahl der Anlagen in Deutschland und der installierten Leistung in Megawatt (Quelle: Bethge, 2004)

Vor diesem Hintergrund haben die Mitarbeiter der Finsterwalder Umwelttechnik als Betreiber einer Biogasanlage und eines Labors zur Kontrolle der eigenen Anlage festgestellt, dass der Boom der Biogasbranche auch Probleme mit sich bringt, da immer mehr Betreiber massive Probleme mit der Biologie in ihrer Anlage haben und Hilfestellung benötigen.

Die Bedeutung der Problematik zeigt eine Umfrage der KTBL aus dem Jahre 1997: Bereits damals wurde festgestellt, dass jeder vierte Anlagenbetreiber mindestens einmal einen Fermenter-„Absturz“ zu beklagen hatte (Quelle: [www.erneuerbareenergie.de/0902/bio.html](http://www.erneuerbareenergie.de/0902/bio.html)).

Ursache für die Probleme sind im Regelfall vermeidbare Fehler bei der Betriebsführung, die wiederum aus der Unkenntnis der Zusammenhänge herrühren. Die Betreiber haben oft über Wochen hinweg versucht, mit ungeeigneten Mitteln die Biologie wieder zu regenerieren. In den allermeisten Fällen ist die Biologie dann so stark geschädigt, dass sie sich in überschaubarer Zeit nicht wieder erholt. Die finanziellen Ausfälle durch Betriebsstörungen sind erheblich, da der „Neustart“ einer Anlage mehrere Wochen bis Monate erfordert, bis die Biologie wieder ihre „Sollleistung“ erreicht.

#### Hilfestellung durch *biotip*

*biotip* wird Anlagenbetreibern in Zukunft durch eine Beurteilung des Ist-Zustandes und eine Prognose der Prozessdaten Informationen zur Verfügung stellen können, die helfen, kritische Betriebszustände zu vermeiden.

Da die benötigte Anlagenkonfiguration von der Art der zur Vergärung eingesetzten Stoffe abhängt, kann *biotip* auch für Planer von Biogasanlagen ein wichtiges Instrument sein, um z. B. substratspezifisch optimale Fermentervolumina zu bestimmen – teure Planungsfehler können so vermieden werden.

Zusammenfassend wird *biotip* in den folgenden Bereichen zum Einsatz kommen:

Eignungsbeurteilung von neuen Substraten

Betreuung der Biologie bestehender Biogasanlagen zur Vermeidung von Anlagenstillständen

Optimierung von bestehenden Anlagen in Bezug auf Betriebssicherheit und Ertrag durch richtige Auswahl und Zufuhr von Substraten

Werkzeug für Planer, um Planungsschwächen und Planungsfehler zu erkennen

*biotip* wird somit auf vielfältige Weise dazu beitragen, die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen in den genannten Bereichen erheblich zu steigern.

#### Ergebnisse einer Umfrage zu *biotip*

Für eine erste Einschätzung, ob *biotip* am Markt auf Interesse stößt, wurden vom bifa 33 Betreiber von Biogasanlagen mit einer Ausbaugröße von etwa 70 bis 300 kW el. in der näheren Umgebung befragt. Grundsätzlich zeigten sich hierbei mehr als die Hälfte der befragten Betreiber an *biotip* interessiert. Kein Interesse an *biotip* zu haben, gaben 21 % an (Abbildung 6-2). Die Mehrzahl der befragten Betreiber, die insbesondere im Bereich der Landwirtschaft angesiedelt waren, betreiben ihre Biogasanlage jedoch mit einem sehr eingeschränkten Substratspektrum, das sich vorwiegend aus Rindergülle und Maissilage zusammensetzt. In diesen Fällen bestand kein reeller Bedarf für eine entsprechende Beratungsleistung durch *biotip*. Dies ist plausibel, da eine Mischung aus Rindergülle und Maissilage fast immer zu einem sehr stabilen Prozess führt.

Anders sieht die Situation bei Betreibern aus, die eine Erweiterung oder Änderung ihres Prozesses in der näheren Zukunft planen – hier wurde sehr viel häufiger ein größeres Interesse an *biotip* geäußert. Dies gilt insbesondere für eher „gewerblich orientierte“ Betreiber von Biogasanlagen, die ein sehr viel größeres Spektrum an Substraten verarbeiten. Andererseits besteht ebenfalls ein größeres Interesse an *biotip* bei denjenigen Betreibern, die ein sehr einseitiges Substratspektrum einsetzen wollen (Stichwort

Monovergärung). Voraussetzung ist in jedem Falle, dass mit dem System Leistungssteigerungen zu realisieren sind, die in einem vernünftigen Verhältnis zu den Kosten für den Einsatz von *biotip* stehen.

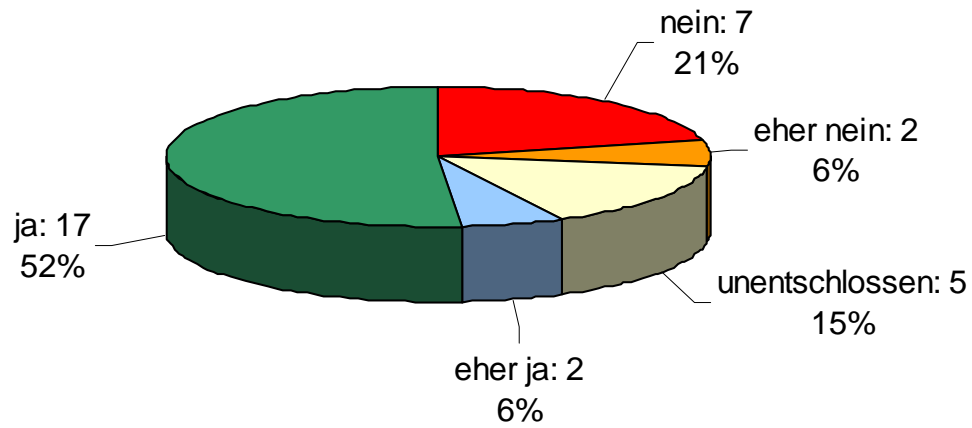


Abbildung 6-2: Ergebnisse der bifa-Umfrage zum Interesse an *biotip*

## 7 Literatur

- Andrews, J. F.; Graef, S. P. (1971): Dynamic Modeling and Simulation of the Anaerobic Digestion Process. Department of Environmental Systems Engineering, Clemson University, Clemson, S. C. 29631
- Angelidaki, I.; Ellegard, L.; Ahring, B. K. (1993): A Mathematical Model for Dynamic Simulation of Anaerobic Digestion: Focusing on Ammonia Inhibition. *Biotechnology and Bioengineering*, 42, 159-166
- Anonym (2004): Biogaserzeugung erlebt Aufschwung. Informationsdienst Humuswirtschaft & KomPost, 1, 21
- Bensmann, M. (2004): Sprich mit mir! neue energie, 11, 44-47
- Bethge, P. (2004): Kraft der Nawaros. Spiegel, 32, 132-134
- BGK – Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. (2004): Humuswirtschaft & Kompost. 10. Jahrgang, 4/04, ISSN 1432-5896, 282
- Bischofsberger, W.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K.-H.; Seyfried, C. F.; Böhnke, B. (Hrsg.) (2005): Anaerobtechnik. 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin
- Björnsson, L.; Murto, M.; Mattiasson, B. (2001): Evaluation of parameters for monitoring an anaerobic co-digestion process. *Applied microbiology and biotechnology*, 54, 844-849
- Boone, D.; Xun, L. (1987): Effects of pH, Temperature, and Nutrients on Propionate Degradation by a Methanogenic Enrichment Culture. *Applied and Environmental Microbiology*, 53, 7, 1589-1592
- Campos, E.; Flotats, X. (2003): Dynamic Simulation of pH in Anaerobic Processes. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 109, 63-76
- FNR – Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.) (2005): Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. FNR, Gülzow
- Gavala, H. N.; Angelidaki, I.; Ahring, B. K. (2003): Kinetics and Modeling of Anaerobic Digestion Process. *Advances in Biochemical Engineering / Biotechnology*, 81, 57-93
- Hütter, L. A. (1994): Wasser und Wasseruntersuchung. 6. Aufl., Otto Salle Verlag, Frankfurt am Main
- Kottmair, A. und Finsterwalder, K. (2005): *Ausgewogen Füttern*. BiogasJournal, 8. Jahrgang, Nr. 1/05, S. 18-20
- Kottmair, A.; Hoppenheidt, K.; Finsterwalder, K. (2006): Ernährungsberatung für Bio-gasanlagen mit biotip. In: Fachverband Biogas e. V. (2006): Wirtschaftsmotor Biogas. Tagungsband zur Jahrestagung des Fachverband Biogas e. V., 25. bis 27. Januar 2006, Convention Center Hannover, S. 137-143
- IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes: Batstone, D. J.; Keller, J.; Angelidaki, I.; Kalyuzhnyi, S. V.; Pavlostathis, S. G.; Rozzi, A.; Sanders, W. T. M.; Siegrist, H.; Vavilin, V. A. (2002): Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). Scientific and Technical Report No. 13, IWA Publishing
- KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.) (2005): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Landwirtschaftsverlag, Münster
- Lyberatos, G.; Skiadas, I. V. (1999): MODELLING OF ANAEROBIC DIGESTION – A REVIEW. *Global Nest*, 2, 1, 63-76





**bifa Umweltinstitut GmbH**

Am Mittleren Moos 46

86167 Augsburg

Tel. +49 821 7000-0

Fax. +49 821 7000-100

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