

# Untersuchung zur Desintegration von Gärmedien in einer parallel betriebenen Pilotbiogasanlage

**Danny Echtermeyer, Steve Chrosziewski, Wolfgang Krause, Gunnar Schneider, Jörg Brutscher, Ulf Müller, Christian Krebs, Franziska Schäfer, Dieter Beckmann, Uwe Pliquet**

Die Behandlung (Desintegration) von Biogassubstraten und Gärmedien wird zum Ziel der Optimierung der Prozessführung und somit zur Steigerung der Effizienz durchgeführt. Neu entwickelte Desintegrationsverfahren werden zum Nachweis der Wirksamkeit in der ersten Versuchsphase oft im Labormaßstab oder in einsträngigen Pilotanlagen getestet. Aufgrund der sich stets ändernden qualitativen Eigenschaften von Biogassubstraten, insbesondere bei Feststoffsubstraten, ist ein paralleler Versuchsbetrieb, bei dem zeitgleich behandeltes und unbehandeltes Substrat in gleich aufgebauten Anlagenteilen vergoren wird, zu empfehlen. Bei Berücksichtigung des parallelen Versuchsbetriebes ist, auch bei sich wechselnden Eigenschaften der Substrateigenschaften, eine Einschätzung der Wirksamkeit der neu entwickelten Desintegrationsmethode möglich. Wir präsentieren ein Konzept, bei dem zwei identisch aufgebaute Anlagenlinien mit jeweils einem 200-L-Hauptfermenter (HF) und einem Nachgärer (NG, 100 L) in einer Pilotanlage parallel betrieben werden. Die Behandlung erfolgt in Anlagenlinie 1 (HFB, NGB; B = Behandlung), in der 2. Anlagenlinie (HFD, NGD; D = Durchfluss) durchströmt das Gärmedium bzw. Biogassubstrat eine Durchflussskammer ohne Beeinflussung.

## Schlüsselwörter

parallele Vergärung, Synergieeffekt, gepulste Hochspannung, Schockwelle, Biogasertrag

Die Vergärung von Biogassubstraten (Gülle, Feststoffe) ist ökonomischen Zwängen unterworfen (WIELAND 2010). Deshalb mehren sich Überlegungen, diesen Prozess mit gesteigerter Effizienz zu fahren. Die Bedeutung der Vorbehandlung von Biogassubstraten mit verschiedenen Methoden (ZEYNALI et al. 2017, ALMOMANI et al. 2019, WESTERHOLM et al. 2019), aber auch die Behandlung während der Vergärung, ist vielfach beschrieben (YADVIKA et al. 2004). Biogasanlagen wurden in der Vergangenheit mit sporadischer Prozessführung betrieben. Weder eine Steuerung wichtiger Betriebsparameter noch eine Analyse der Energiebilanz wurden für eine Optimierung der Ausbeute verwendet (VOLLMER 2011, WOLF et al. 2013). Durch die regelmäßigen Kostensteigerungen, nicht nur bei den Einsatzstoffen, rückt die Prozessoptimierung immer mehr in das Blickfeld (AHRING und ANGELIDAKI 1997). Insbesondere die Hydrolyse, also der geschwindigkeitsbestimmende Schritt bei der Vergärung von Biomasse (CLIMMENT et al. 2007, ALVIRA et al. 2009), spielt bei der Optimierung des Gesamtprozesses eine wichtige Rolle. Ebenso ist die mechanische Zerkleinerung wichtig, da hier die für Mikroorganismen erreichbare Oberfläche vergrößert wird. Verzögerungen bei der Vergärung sind außerdem auf die sehr inhomogenen, oftmals langfaserigen Ausgangsmaterialien zurückzuführen. Ohne Voraufschluss würde es zu sehr langen Verweilzeiten mit entsprechend geringer Ausbeute, aber auch zu Anlagenstörungen durch Verstopfen von Fördereinrichtungen kommen. Problematisch sind dabei ligninhaltige Bestandteile.

Jedoch kann Lignin thermisch oder chemisch aufgeschlossen werden (CARLSSON et al. 2012) wodurch Zellulose und Hemizellulose für die Vergärung zur Verfügung steht. Durch die Vergrößerung der erreichbaren Oberfläche wird die Geschwindigkeit des Prozesses erhöht, was allerdings die Biogas- oder Methanausbeute nicht wesentlich beeinflusst. Trotzdem kann durch den Aufschluss und der damit einhergehenden Verfügbarkeit von bisher nicht umsetzbaren Substratbestandteilen, der Abbau erhöht werden. Generell umfasst der Substrataufschluss eine Verringerung der mittleren Partikelgröße, die Freisetzung gelöster Stoffe sowie eine Verringerung der dynamischen Viskosität (CLIMENT et al. 2007).

Derzeit ist der mechanische Voraufschluss durch Schneidwerke und Mühlen am weitesten verbreitet. Ebenso gibt es erste kommerzielle Anbieter von Ultraschallaufschlussanlagen (CASTRILLÓN et al. 2011). Ultraschall im Frequenzbereich von 20 bis 50 kHz führt besonders an Übergängen unterschiedlicher Ultraschallimpedanz (z. B. Partikelgrenzen) zu Kavitation. Die beim Kollabieren der so gebildeten Gasblasen auftretenden schnellen Strömungen führen zu einer Zerstörung langfaseriger Strukturen wie beispielsweise bei Gras (RODRIGUEZ et al. 2017). Thermische und chemische Verfahren sind unter praxisnahen Bedingungen für verschiedene Ausgangsmaterialien untersucht worden, aber trotz teilweise erheblicher Steigerung der Ausbeute derzeit nur wenig im Einsatz. Besonders bei langfaserigen, stark ligninhaltigen Materialien bietet sich neben einer mechanischen Zerkleinerung auch eine Wärmebehandlung mit Temperaturen über 100 °C an (XIE et al. 2011). Die Kombination aus mechanischen und thermischen Verfahren ist besonders effektiv. Bei Verwendung eines Doppelschneckenextruders wird der Wärmeeintrag direkt durch die auftretende Reibungswärme bei der Zerkleinerung des Substrates realisiert (THOSS 2007, HJORTH et al. 2011). Biologische Aufschlüsse durch Zugabe von Enzymen oder Mikroorganismen sollen die Produktivität von Biogasanlagen verbessern. Die Wirkung der Zugabe wird in Wissenschaft und Praxis konträr diskutiert. Einerseits findet man für einige Substrate einen erheblichen Effekt von über 30 % (KARRAY et al. 2015), andererseits kann der Effekt wie bei Maisstroh erheblich geringer ausfallen (SCHROYEN et al. 2014). Ein erheblicher Nachteil der enzymatischen Vorbehandlung sind die teilweise hohen Kosten (BRULÉ et al. 2008, 2011, MÜLLER et al. 2016).

Der kombinierte Effekt einer sehr kurzen Druckwelle hoher Amplitude (Schockwelle) mit einem zeitlich abgestimmten hohen elektrischen Feld ( $E > 3 \text{ kV/cm}$ ,  $t < 10 \mu\text{s}$ ) kann die Biogasausbeute bei geringerem Energieeinsatz verbessern. Durch die mechanische Schockwelle werden zelluläre Strukturen (Gewebe) zerstört und Klumpen zerkleinert, während elektrische Pulse mit hoher Feldstärke Zellmembranen durchlässig machen. Durch diesen als Elektroporation bekannten Effekt können Teile des Zytoplasmas ausfließen und stehen somit der Vergärung zur Verfügung (VOROBIEV und LEBOVKA 2008). Es ist zu beachten, dass die Wirkung der Elektroporation an Zellen mit ihrer Größe zunimmt, sodass große Pflanzenzellen zerstört werden, aber Bakterien und Archaeen größtenteils überleben, was für die Prozessstabilität eine wesentliche Voraussetzung ist. Durch lang anhaltende elektrische Felder können Ionen und geladene Moleküle elektrophoretisch aus Zellen und Klumpen extrahiert werden (CASCIOLA 2016), was ihre schnelle Bioverfügbarkeit unterstützt.

Für den direkten Vergleich zwischen mit Schockwellen und Hochspannungspulsen behandeltem und nicht behandeltem Gärsubstrat wurde eine Pilotanlage mit paralleler Vergärung geschaffen, wobei beide Anlagenteile sich nur durch die Behandlungskammer bzw. eine baugleiche Durchflusskammer unterscheiden.

## Material und Methoden

### Aufbau der Pilotanlage

Die Anlage war für die Testvergärung von pumpfähigen Substraten konzipiert. Als Substratgemisch diente eine in der Praxis vielverwendete Kombination aus Maissilage und Rindergülle. Durch die parallele Auslegung von Hauptfermenter und Nachgärer konnte der Gärprozess mit behandelten und unbehandelten Gärsubstraten unter vergleichbaren Bedingungen ablaufen. Die Behandlungskammer war für die aktuelle Studie mit einem Elektrodensystem zur Applikation elektrischer Felder sowie einer Schockwelleneinrichtung versehen. Die Blindkammer stellte in Bezug auf die Durchströmung ein Duplikat zur Behandlungskammer dar.

### Fermenter

Die Pilotanlage bestand aus zwei Fermentern (2 x 200 L Gärvolumen) und zwei Nachgärern (2 x 100 L Gärvolumen). Jeder dieser Behälter besaß einen Rührer, der durch einen gemeinsamen Antrieb (M-1) betrieben wurde. Ein weiterer separat gerührter Behälter diente als Vorlagegefäß (ca. 60 L). Beide Hauptfermenter wurden mithilfe von zwei Kolbenpumpen (P-1 und P-2) nacheinander gefüttert. Zur Vorbeugung von Verstopfungen wurde das Substrat über Rohre mit 48 mm Durchmesser direkt in den Pumpzylinder gefördert. Das Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema der Pilotanlage ist in Abbildung 1 dargestellt.

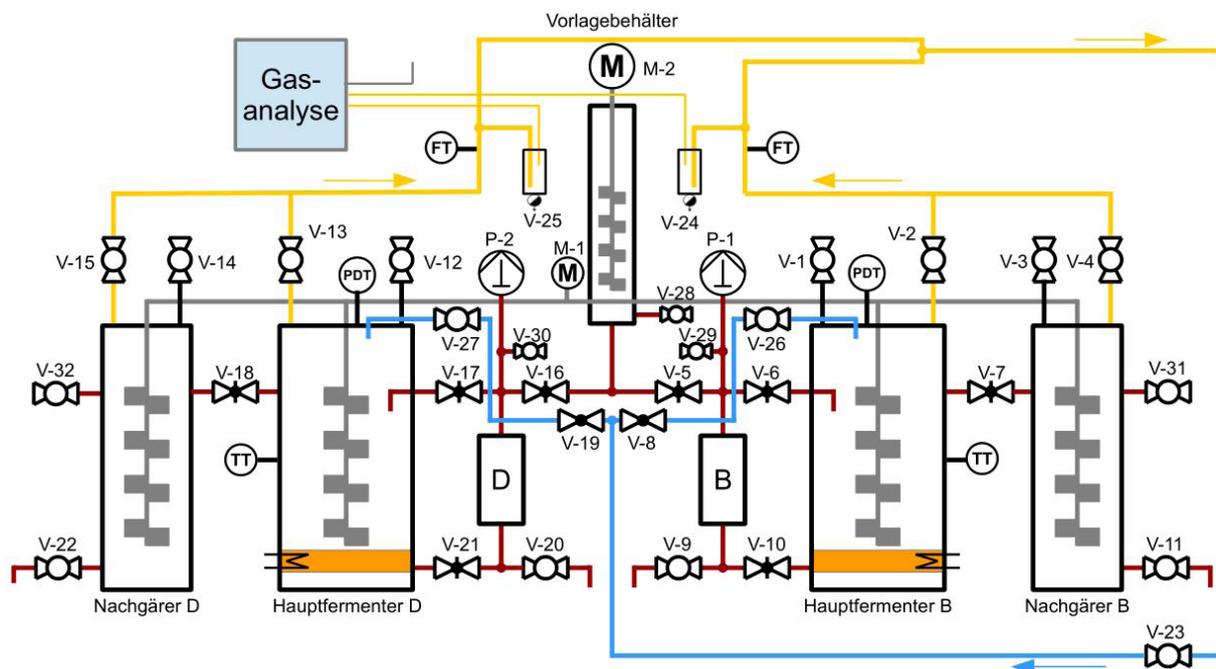


Abbildung 1: Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema der Pilotanlage. Bei den Behandlungskammern steht B für die eigentliche Behandlungskammer, während D eine Durchflusskammer gleicher Geometrie, aber ohne Elektroden und Piezoelemente darstellt (© D. Echtermeyer)

Durch Steuerung mit den Pumpen und Ventilen P-1/V-(5, 6,10) (Hauptfermenter mit Behandlung, HFB) und P-2/V-(16, 17, 21) (Hauptfermenter mit behandlungsfreiem Durchfluss, HFD) konnten zwei wesentliche Regimes eingestellt werden:

- (1) Fütterung aus dem Vorlagenbehälter mit bzw. ohne Behandlung und
- (2) Desintegration (bzw. Blindförderung) des über Ventil V-10 bei HFB (V-21 bei HFD) aus dem Fermenter geförderten Substrates (Rezirkulat)

Der Grundablass wurde durch V-30/V-9 realisiert. V-15/V-13 sowie V-4/V-2 dienten der Ausleitung des Gases. Über die Flüssigkeitsfallen V-24/V-25 wurde ein Teilstrom der Gasanalyse (Awite, Langenbach, Deutschland) zugeführt. Für die Entschäumung gibt es eine mit Wasser beaufschlagte Prallplatte (Verrieselung), die über V-8/V-19 aus dem Wassernetz versorgt wird.

Mit dem hier realisierten Aufbau konnte ein Prozess parallel und vergleichbar in zwei nahezu identischen Anlagenlinien betrieben werden. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Anlagen bestand darin, dass ein Anlagenteil eine Behandlungskammer (HFB, elektrische Behandlung und Schockwelle) und der andere Anlagenteil eine Durchflusskammer (HFD, ohne Behandlung) hatte. Die Geometrie der Kammern ist jedoch vollkommen identisch. Beide Fermenter sind mit einer Fassheizung (1 kW) ausgestattet, um das Gärsubstrat gleichmäßig auf die erforderliche Temperatur zu temperieren (Abbildung 2).



Abbildung 2: Teilansicht der Pilotanlage am Aufstellungsort am Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH Leipzig (DBFZ) 1 Hauptfermenter 2, HFB; 2 Nachgärer 2; 3 Hauptfermenter 1, HFD; 4 pneumatisch betriebene Schieber V-5 / V-6; 5 Vorlagebehälter; 6 Biogasleitung (© U. Pliquet)

## Datenerfassung

Es wurden folgende Daten kontinuierlich erfasst:

- Temperatur Fermenter 1 und Fermenter 2
- Relativdruck Fermenter 1 und Fermenter 2
- Gasertrag (getrennt nach Anlagenteil 1 und Anlagenteil 2 über Volumenstromsensoren (EL-FLOW, Bronkost, Ruurlo, NL))

Stündlich wurde die Gaszusammensetzung von Anlagenteil 1 und Anlagenteil 2 sowie der Umgebungsluft gemessen und gespeichert. Die Gasanalyse unterschied hierzu zwischen folgenden Gasen:

- Methan - CH<sub>4</sub>
- Kohlenstoffdioxid - CO<sub>2</sub>
- Sauerstoff - O<sub>2</sub>
- Wasserstoff - H<sub>2</sub>
- Schwefelwasserstoff - H<sub>2</sub>S

Zusätzlich zu den automatisiert erfassten Daten wurden Ereignisse wie Störungen und Fehler sowie prozessspezifische Werte und Ereignisse in einem Anlagentagebuch notiert.

### Steuerung und Regelung

Die Steuerung und Regelung des Prozesses bestand im Wesentlichen aus drei getrennten Abläufen sowie einer Zeitplanung für die Fütterung und Behandlung, die in der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS, Abbildung 3) umgesetzt wurden.

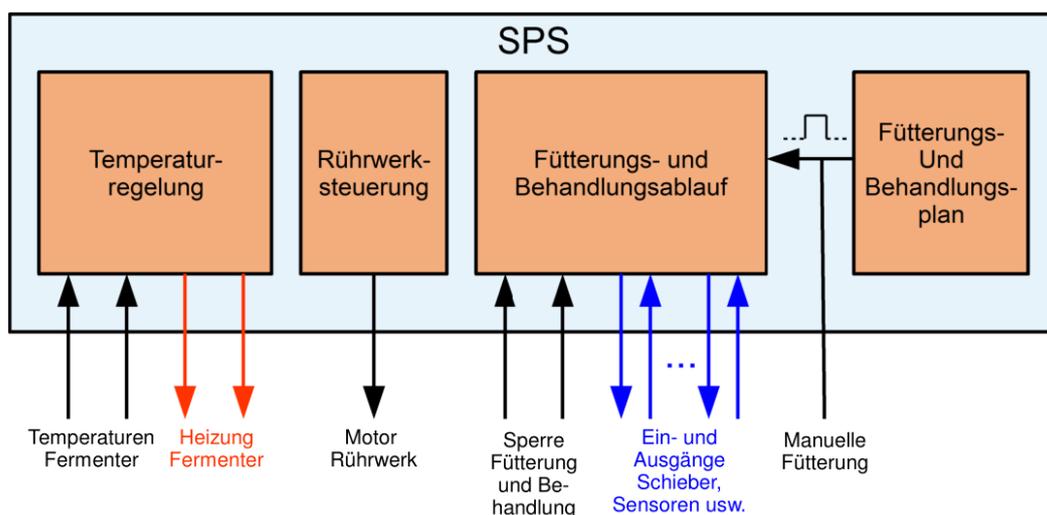


Abbildung 3: Blockschaltbild für die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) (© D. Echtermeyer)

### Temperaturregelung

Die Temperaturregelung erfolgte über eine Zweipunktregelung mit einer Hysterese von etwa 1 °C. Die Temperatur der beiden Fermenter wurde somit auf einer Temperatur zwischen 37 °C und 38 °C im mesophilen Bereich gesteuert. Als Heizelemente kamen 1 kW-Fassheizungen (80 cm x 160 cm) zum Einsatz.

### Steuerung der Rührwerke

Die kontinuierliche Durchmischung wurde über einen Getriebemotor gestaltet und durch die Bauart von Motor und Getriebe auf 71 U/min festgesetzt. Der Vorlagenbehälter wurde über eine separate Einrichtung ebenfalls gerührt. Je nach Beschaffenheit des Substrates konnte die Geschwindigkeit variiert werden.

### Fütterungs- und Behandlungsablauf

Beim Fütterungs- und Behandlungsablauf muss zwischen zwei Szenarien unterschieden werden:

- Behandlung des Substratgemisches während des Fütterungsvorgangs
- Behandlung des Rezirkulates

Die Abläufe (Abbildung 4) der beiden Versuchsarten sind in Form einer Zustandsmaschine in separaten Programmen für die SPS realisiert und müssen je nach Versuch auf diese übertragen werden.

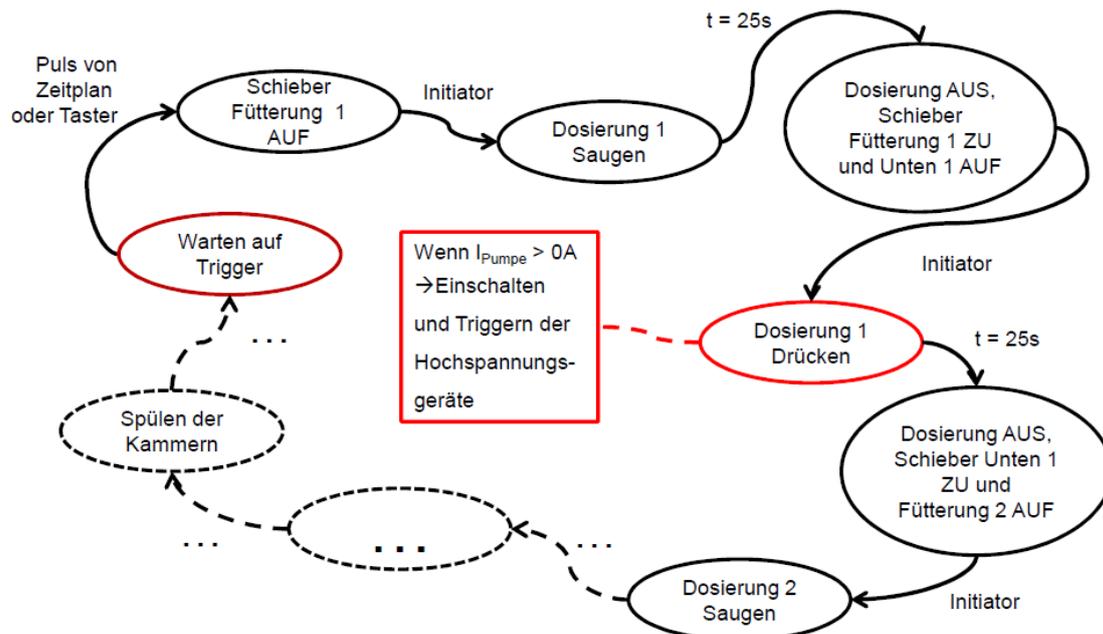


Abbildung 4: Zustandsdiagramm für den Fütterungs- und Behandlungsablauf. Im Ruhezustand wartet die Steuerung auf ein Triggersignal, welches im Normalfall durch einen Zeitgeber gegeben wird. Die Dosierung kann abhängig vom jeweiligen Experiment mehrfach erfolgen (© D. Echtermeyer)

Da bei der Behandlung des Rezirkulates weiterhin gefüttert werden musste, blieb das Fütterungsregime, jedoch ohne Behandlung, unbeeinflusst. Die Behandlung des Rezirkulates erfolgte in den Fütterungspausen.

### Dosierpumpe

Die Dosierpumpe wurde als Kolbenpumpe in Kombination mit drei Ventilen ausgeführt. Dabei konnten programmgesteuert die Betriebsarten

- Pumpe aus Vorlage füllen,
- Pumpe in Fermenter entleeren,
- Pumpe aus Fermenter füllen (Rezirkulat) eingestellt werden.

Um Verstopfungen beim Dosieren durch die im Vergleich zur Rohrleitung verengten Behandlungskammern zu vermeiden, werden nach der eigentlichen Fütterung beide Behandlungskammern zweimal in der entgegengesetzten Richtung gespült. Hierzu werden beide Dosierpumpen synchron angesteuert. Eine Verstopfung konnte trotzdem nicht immer verhindert werden. Daher wurden spezielle Kugelhähne eingebaut, die eine Entleerung der Behandlungskammern im Verstopfungsfall erlaubten.

## Behandlungseinrichtung zur Desintegration

### Behandlungskammer

Die Behandlungskammer ist ein wesentlicher Bestandteil für eine erfolgreiche Behandlung des Biogassubstrates. Der fluidische Teil wurde speziell im Hinblick auf die elektrische Feldverteilung bei geringstem Verstopfungsrisiko konstruiert. Dies war notwendig, da der Elektrodenabstand wegen der vorab festgelegten maximalen Spannung von 30 kV nicht beliebig groß gewählt werden konnte. Hier wurde ein Abstand von 1 cm festgelegt. Darüber hinaus wurde ein möglichst großer Bereich mit einer homogenen Feldverteilung angestrebt, weshalb planparallele Elektroden anstatt der oft verwendeten koaxialen Anordnungen zum Einsatz kamen. Der Grundkörper der Behandlungskammer wurde aus PVC gefertigt und mit Spezialkleber verklebt. Für den Übergang zwischen dem 2“-Rohrleitungssystem und der Kammer wurde ein Rohrstück unter Hitze verformt. Dadurch wurden Kanten im Übergang vermieden. Oben und unten wurden die Elektroden für die Hochspannungspulsapplikation sowie die Elektrophorese angebracht. In der Mitte befand sich der zwischen zwei Stahlplatten eingespannte Piezowandler für die Erzeugung der Schockwelle. Gegenüber dem Schockwellen-Piezoelement lag ein Blindstopfen, der im Falle einer Verstopfung, eine Reinigung gestattete. Eine weitere Kammer mit identischer Geometrie aber ohne Piezokeramik und Elektroden wurde im Referenzteil der Anlage (HFD/NGD, Anlagenteil 2) verbaut.

### Hochspannungspulsanlage

Die Hochspannungsanlage bestand aus drei separaten Geräten, die in sich geschlossene, unabhängige Einheiten bilden.

#### *Mikrosekundenpulsgenerator SCRPuls30-1500*

Dieser Generator diente der elektrischen Hochspannungsbehandlung, vor allem von Membranstrukturen. Durch Elektroporation wurden diese Membranstrukturen temporär durchlässig, sodass Bestandteile des Zytosols aus den Zellen entweichen konnte. Die Pulsenergie erreichte, je nach Last, bis zu 100 J. Der Generator eignete sich für einen Dauerbetrieb bei einer Pulsspannung von 30 kV, einer Pulsdauer von 1  $\mu$ s und einer Pulswiederholrate von 15 Pulsen/s wenn die Nennlast (Behandlungskammer) 50  $\Omega$  nicht unterschritt.

Der Generator (Abbildung 5) bestand aus einem 220-nF-Kondensator, der mit einem Thyristorschaltmodul in den Ausgang entladen wurde und mit einem Kondensatorlader von 30 kV und 1.5 kW wieder aufgeladen wurde.

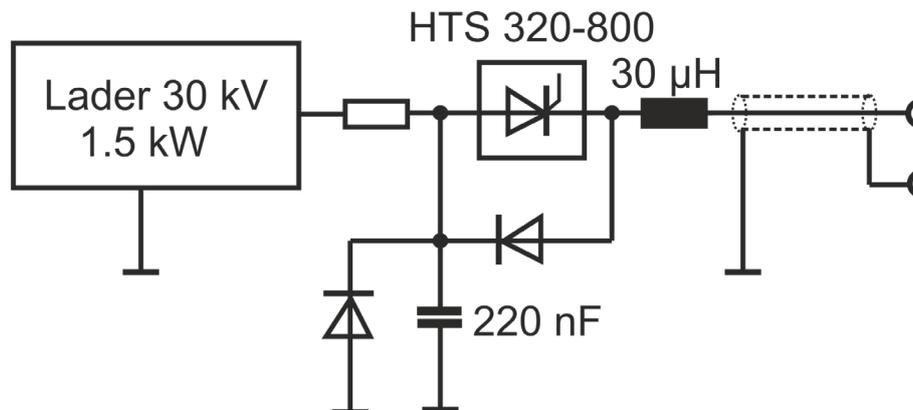


Abbildung 5: Prinzip des Hochspannungspulsgenerators. Ein Hochspannungsnetzteil (30 kV) lädt den Kondensator (220 nF) über einen Vorwiderstand auf. Durch ein Hochspannungsschaltmodul wird der Kondensator an den Ausgang gelegt. Die Spule (30 µH), das Koaxialkabel am Ausgang sowie die beiden Dioden dienen der Pulsformung und der Sicherung gegen Kurzschluss am Ausgang (© J. Brutscher)

Sowohl die Spannung als auch die Pulswiederholfrequenz waren variabel. Der SCRPuls30-1500 ist für Lastimpedanzen von 10 Ω bis maximal 1 kΩ konzipiert. Die Pulsdauer liegt dabei lastabhängig in der Größenordnung von 5 µs bis 20 µs. Bei niedrigen Lastimpedanzen (< 10 Ω) oder im Kurzschlussfall wird die Pulsdauer durch die Wirkung der Ausgangsdrossel wieder länger. Ein Dauerbetrieb im Kurzschlussfall führt nach einiger Zeit zur Abschaltung infolge der Übertemperatur an der Freilaufdiode. Der Pulsgenerator hat ein geschirmtes Ausgangskabel, bei dem der Schirm den Rückstrom von der Last trägt.

Durch niedrige Lastimpedanzen traten hohe Ströme bei langen Pulsdauern auf. Bei Spitzenströmen von 1.500 A schaltete sich die interne Überstromüberwachung ein und unterband die Pulstrigierung.

#### *Elektrophoresenetzteil*

Durch Elektrophorese werden geladene Moleküle und Ionen aus den vorher desintegrierten Zellen aber auch aus Klumpen und anderen Konglomeraten in das umgebende Medium transportiert, was ihre Bioverfügbarkeit erheblich erhöht. Das Netzteil diente der Generierung des dafür notwendigen elektrischen Feldes. Anders als bei den vorher applizierten Hochspannungspulsen reicht die mit diesem Gerät generierte Spannung nicht die Desintegration der Zellen aus. Zur Vermeidung schneller Korrosion an den Elektroden, aber auch zur Minimierung elektrochemischer Effekte in der Biogasgülle, wurde das Gerät als bipolare Quelle ausgeführt. Das Elektrophoresenetzteil (Abbildung 6) bestand aus einer Spannungsquelle von 1.000 V und 250 W sowie einer nachgeschalteten transistorierten Vollbrücke, mit der Frequenz und Phasenlage zueinander eingestellt werden konnten.

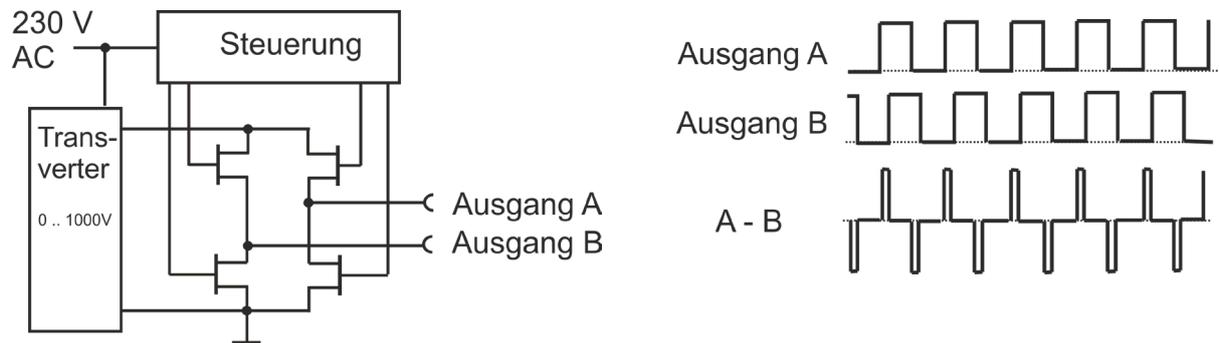


Abbildung 6: Links Prinzipschaltung, rechts Ausgangssignalform des Elektrophoresenetzteils als Überlagerung zweier Rechteckwellen. Damit konnte einerseits die Pulslänge eingestellt werden, andererseits wurden bipolare Pulse generiert, was die Standzeit der Elektroden erheblich verbessert (© J. Brutscher)

Das Elektrophoresenetzteil ist für Lastimpedanzen ab  $50 \Omega$  bis zu einigen  $k\Omega$  ausgelegt. Über die Phasenlage bzw. dem Tastverhältnis kann die Last gut an die zur Verfügung stehende Leistung angepasst werden. Im Kurzschlussfall oder bei Strömen über 20 A wird der Ausgang abgeschaltet.

*Schockwellengenerator*

Die Schockwelle wurde durch eine Hochleistungspiezokeramik von CeramTec (SONOX® P 8, SONOX® 4) mittels Hochspannungspuls erzeugt. Die verwendeten Piezoscheiben haben einen Durchmesser von 5 cm und eine Dicke von 6 mm bzw. 8 mm. Die Durchschlagsfestigkeit ist mit 1 kV/mm angegeben. Durch die Verwendung von bis zu 8 kV erübrigte sich die Verwendung eines Stapels, wie es bei Niederspannungssystemen üblich ist. Die Resonanzfrequenz des aufgebauten Systems liegt bei etwa 36 kHz, weshalb Pulslängen von etwa  $10 \mu s$  ( $1/3$  der Periodendauer) zur Anregung verwendet wurden. Hierfür wurde ein Pulsgenerator (Abbildung 7) entwickelt, der speziell für die bipolare Ansteuerung kapazitive Lasten bis 2 nF optimiert wurde. Der Pulsgenerator besteht aus einer 1.000-V-Vollbrücke und einem nachgeschalteten 1:5 Trafo. Auf ein Triggersignal hin liefert die Vollbrücke erst einen positiven, dann einen negativen Puls. Diese Spannung wird hochtransformiert. Je nach Justage der Pulsbreiten kommt noch eine resonante Spannungsüberhöhung dazu.

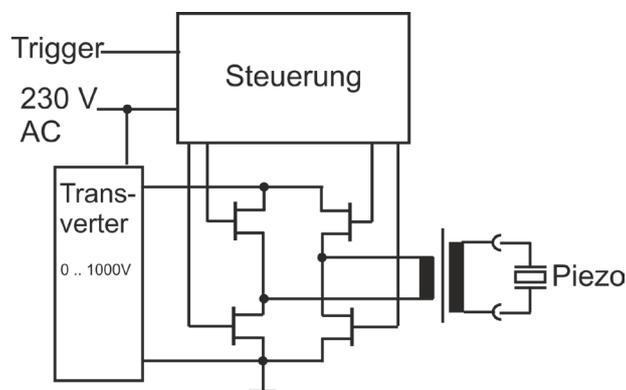


Abbildung 7: Prinzipschaltung des Pulsgenerators für die Schockwellenerzeugung (© J. Brutscher)

## Prozessbeschreibung

Die Fermenter wurden mit einer Substratmischung von 55 % Maissilage und 45 % Rindergülle (basierend auf dem Anteil organischer Trockensubstanz (oTS)) betrieben. Die Raumbelastung wurde zum Anfahren des Prozesses von  $2,5 \text{ kg}_{\text{oTS}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  auf  $3,5 \text{ kg}_{\text{oTS}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  in täglichen Schritten von  $0,2 \text{ kg}_{\text{oTS}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  gesteigert. Die Anpassung der Verweilzeit auf 30 d erfolgte durch Zugabe von Leitungswasser in der Anfahrphase. Im weiteren Versuchsverlauf war das nicht mehr notwendig. Maissilage und Rindergülle wurden von einem Landwirtschaftsbetrieb aus der Region bezogen. Die Lagerung einer Maissilagecharge erfolgte abgedeckt mit einer Plane für bis zu einer Woche. Die Rindergülle wurde in einem  $185\text{-m}^3$ -Behälter bei Umgebungstemperatur gelagert. Die Trockensubstanz (TS) der Maissilage variierte zwischen 27–35 % der Frischmasse, die organische Trockensubstanz (oTS) zwischen 89–98 % TS. Bei der Rindergülle betrug die Variation der TS = 5–11 % Frischmasse sowie oTS = 74–82 % TS. Die chemische Zusammensetzung der Substrate wurde nach Weender analysiert (VDLUFA 2007). Als Inokulum kam Gärmedium aus einem  $188\text{-m}^3$ -Rührkesselreaktor der Forschungsbiogasanlage am Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) zum Einsatz, der mit Maissilage-Monovergärung betrieben wurde. Eine zeitliche Übersicht der Versuchsphasen ist Tabelle 1 zu entnehmen. In allen Phasen wurde der Fermenter 2 (HFD, mit Durchflussskammer) ohne Behandlung von Substrat oder Rezirkulat betrieben. Die Zeiträume mit automatischer (6-mal täglich) und manueller Substratzufuhr (1-mal täglich) variierten in Abhängigkeit der Versuchsphase, wie in Tabelle 1 hinterlegt.

Tabelle 1: Zeitliche Abfolge der Versuchsphasen

Versuchsphase	Zeitraum d	Substrat		Rezirkulat	
		Fütterung	Behandlung	Fütterung	Behandlung
I	0 – 64	automatisch	nein	-	nein
II	65 – 112	automatisch	ja	-	nein
III	113 – 146	automatisch	nein	-	nein
	147 – 182	manuell	nein	-	nein
IV	183 – 268	manuell	nein	automatisch	ja
V	269 – 282	-	nein	automatisch	ja

In der Anfahrphase (Versuchsphase I) wurden beide Fermenter der Pilotanlage parallel, ohne Substrat- oder Rezirkulatbehandlung, betrieben. In Versuchsphase II erfolgte die Substratbehandlung im Anlagenteil 1 (HFB, Behandlungskammer), gefolgt von einer intermediären Phase (Versuchsphase III) ohne Behandlung. Aufgrund verschiedener Prozessstörungen, meist infolge von Verstopfungen, konnte Versuchsphase III später in unregelmäßige Fütterung (113–146 d) und manuelle Fütterung unterschieden werden (147–182 d). In Versuchsphase IV wurde Gärmedium des Fermenters HFB behandelt und anschließend in den Fermenter zurückgeführt (Rezirkulatbehandlung). Die abschließende Versuchsphase IV war gekennzeichnet von der Einstellung der Substratzugabe bei Weiterführung der Desintegration des Rezirkulates.

## Prozessüberwachung (Laboranalysen)

Zur Bewertung des Biogasprozesses wurde eine Reihe von Messdaten direkt an der Pilotanlage erfasst sowie die Substratzusammensetzung und das Gärmedium offline im Biogaslabor des DBFZ analysiert. An der Pilotanlage erfolgte die Erfassung der Biogasquantität und -qualität mittels AWIFLEX Gasanalysator (AWITE Bioenergie GmbH, Langenbach). Ferner wurde die Temperatur in den Hauptfermentern erfasst und der Füllstand optisch bzw. durch einen Überlauf eingestellt. Im Biogaslabor wurde regelmäßig die TS und oTS (STRACH 2015), die Summe der flüchtigen organischen Säuren (FOS), das Verhältnis von FOS-Gehalt zum anorganisch gebundenen Kohlenstoff (FOS/TAC) (STRACH 2015b) sowie der pH-Wert und der Ammoniumstickstoffgehalts (STRACH 2013) bestimmt. Die Proben zur Bestimmung stammten aus den Hauptfermentern. Einzelsäurespektren wurden mittels Gaschromatograph (Agilent 7980A mit FID-Detektor, Agilent Technologies; ZB-FFAP-Säule (30 m x 0,32 mm x 0,25 µm), Phenomenex) ermittelt (APELT 2015). Zur Einschätzung der möglichen Änderungen der Fließeigenschaften, insbesondere im Vergleich der beiden Anlagenlinien, wurden zusätzlich Untersuchungen mit einem Rotationsviskosimeter (Viscometer, Brookfield, Spindel 65) vorgenommen.

## Ergebnisse von Versuchsvergärungen

### Parallele Vergärung ohne Behandlung

Diese Versuche sollen die vergleichbaren Ergebnisse der Vergärung in beiden Anlagenteilen zeigen.

In Versuchsphase I (Anfahrphase) wurden beide Fermenter parallel betrieben, ohne die Behandlungseinrichtung zu aktivieren. Als Inokulum wurde Substrat aus einem laufenden Forschungsreaktor auf Grundlage einer Maissilage-Monovergärung verwendet. Nach einer Anfahrphase von etwa 10 Tagen hatte sich die spezifische Gasproduktion (Abbildung 8) stabilisiert und lag mit  $403 \pm 88 \text{ L kg}_{\text{oTS}}^{-1}$  für HFB und  $415 \pm 91 \text{ L kg}_{\text{oTS}}^{-1}$  für HFD über dem erwarteten Bereich von  $204 \text{ L kg}_{\text{oTS}}^{-1}$  bis  $275 \text{ L kg}_{\text{oTS}}^{-1}$  (AMON et al. 2006).

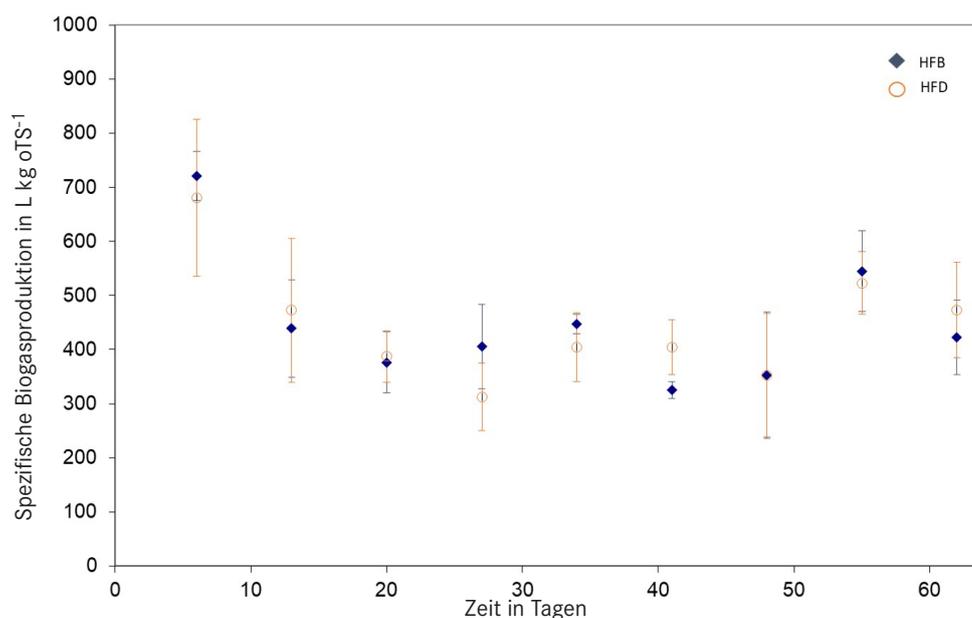


Abbildung 8: Spezifische Biogasproduktion der Fermenter HFB (mit Behandlung) und HFD (nur Durchfluss) in Versuchsphase I (Angabe als Wochenmittelwerte)

Ebenso lag die Gaszusammensetzung (Tabelle 2) im Rahmen der Erwartungen und war über den betrachteten Zeitraum stabil.

Tabelle 2: Gaszusammensetzung in den Fermentern HFB und HFD in den Versuchsphasen I bis V (Angabe von Mittelwerten und Standardabweichung). Die teilweise hohe Unsicherheit bei der Gaszusammensetzung resultiert aus der kurzzeitigen Belüftung während der Beseitigung von Verstopfungen.

Versuchsphase	CH <sub>4</sub> in %	CO <sub>2</sub> in %	O <sub>2</sub> in %	H <sub>2</sub> in ppm	H <sub>2</sub> S in ppm
<b>HFB</b>					
I	58 ± 2	42 ± 2	0,2 ± 0,4	29 ± 22	372 ± 144
II	60 ± 2	40 ± 2	0,1 ± 0,1	22 ± 20	282 ± 183
III	56 ± 2	44 ± 2	0,1 ± 0,3	15 ± 12	783 ± 505
IV	57 ± 2	43 ± 2	0,2 ± 0,6	11 ± 8	676 ± 485
<b>HFD</b>					
I	58 ± 2	41 ± 2	0,3 ± 0,5	25 ± 23	344 ± 154
II	59 ± 2	40 ± 2	0,1 ± 0,2	18 ± 18	281 ± 181
III	55 ± 4	43 ± 2	2,5 ± 5,1	14 ± 11	641 ± 501
IV	56 ± 3	42 ± 2	1,1 ± 4,1	10 ± 8	655 ± 485

Der pH-Wert (Abbildung 9) war anfangs relativ hoch (etwa pH 7,9) fiel während der Anfahrphase auf pH 7,8 ab. Im Mittel lag der pH-Wert in der Anfahrphase bei beiden Fermentern im Bereich von pH 7,6 - 7,9 und wies keine auffälligen Schwankungen auf.

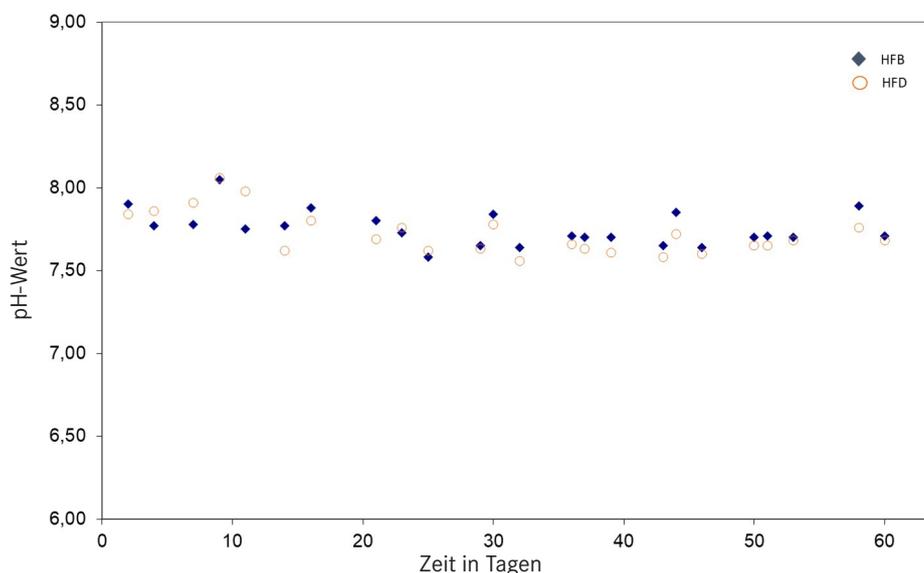


Abbildung 9: pH-Wert im Gärrest der Fermenter HFB und HFD in Versuchsphase I

In Versuchsphase I ist der FOS-Gehalt im Gärmedium  $1,4 \pm 0,4 \text{ g L}^{-1}$  bzw.  $1,2 \pm 0,4 \text{ g L}^{-1}$  und das FOS/TAC-Verhältnis  $0,18 \pm 0,04$  bzw.  $0,17 \pm 0,01$  in HFB und HFD. Damit liegen in beiden Reaktoren vergleichbare und stabile Prozessbedingungen vor. Bei der Essigsäurekonzentration waren während Versuchsphase I erhebliche Schwankungen aufgetreten, während sich durch die regelmäßige Fütterung stabile Werte bei  $28 \pm 11 \text{ mg L}^{-1}$  für Essigsäure im unbehandelten Anlagenteil sowie  $31 \pm 13 \text{ mg L}^{-1}$  im mit elektrischer Behandlung betriebenen Anlagenteil ergaben. Die Werte für alle

anderen Säuren (Propionsäure, iso-Buttersäure, *n*-Buttersäure, iso-Valeriansäure, *n*-Valeriansäure) lagen stabil unter  $10 \text{ mg L}^{-1}$  in beiden Anlagenteilen.

### Einfluss der kombinierten Behandlung mit Hochspannungspulsen und Schockwellen

In Versuchsphase II wurde das Substrat und in den Versuchsphasen IV und V das Rezirkulat mittels Hochspannungspulsen und Schockwellen behandelt. Die Behandlung hatten keinen wesentlichen Einfluss auf die spezifische Biogasproduktion (Abbildung 10). Auch bei einem Rückgang der spezifischen Biogasproduktion in Versuchsphase IV, der auf eine unregelmäßige Fütterung in diesem Versuchszeitraum zurückzuführen ist, ergab sich kein maßgeblicher Unterschied zwischen beiden Anlagenteilen. Die Gaszusammensetzung hinsichtlich  $\text{CH}_4$  lag in Versuchsphase II bei  $60 \pm 2 \%$  in HFB und bei  $59 \pm 2 \%$  in HFD bzw. bei  $57 \pm 2 \%$  in HFB und  $56 \pm 3 \%$  in HFD in Versuchsphase III. Es konnte kein Unterschied im Methangehalt festgestellt werden, der auf die Behandlung zurückzuführen war. Aufgrund von im Anlagenteil ohne Behandlung (HFD) häufiger auftretenden Verstopfungen, deren Lösen mit Sauerstoffeintrag einherging, war hier in den Versuchsphasen III und IV eine höhere Sauerstoffkonzentration zu verzeichnen als im behandelten Anlagenteil (HFB) (Tabelle 2).

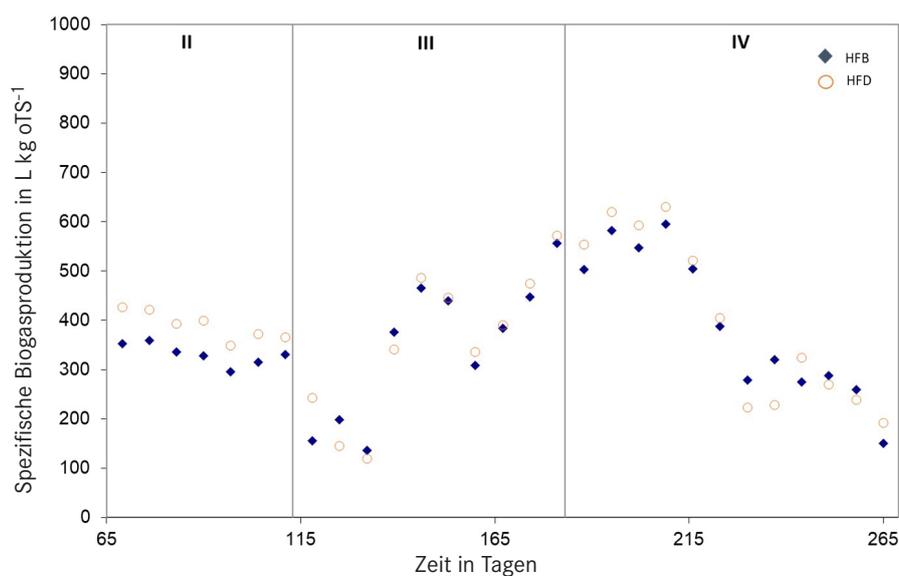


Abbildung 10: Spezifische Biogasproduktion der Fermenter HFB und HFD in Versuchsphase II bis IV (Angabe als Wochenmittelwerte)

Die elektrische Behandlung hatte keinen signifikanten Einfluss auf den pH-Wert, welcher stabil zwischen pH 7,6 und pH 7,8 lag. Der FOS-Gehalt betrug in Versuchsphase III  $0,9 \pm 0,05 \text{ g L}^{-1}$  in HFB und  $0,7 \pm 0,03 \text{ g L}^{-1}$  in HFD. Auch in den Versuchsphasen IV und V war der FOS-Gehalt im behandelten Anlagenteil stabil, allerdings um den Faktor 1,2 erhöht (Abbildung 11).

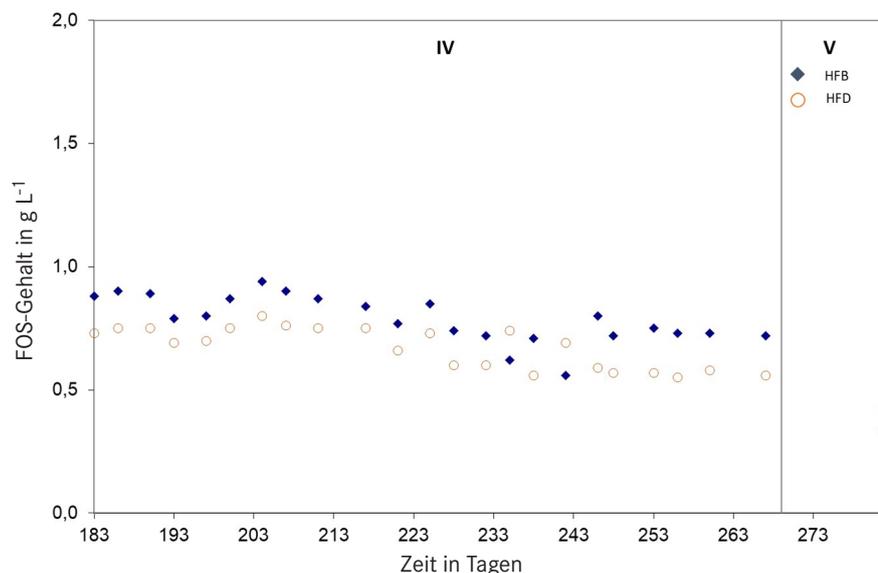


Abbildung 11: FOS-Gehalt im Gärmedium der Fermenter HFB und HFD in Versuchsphase IV und V

Bei der Essigsäurekonzentration im Gärmedium zeigten sich trotz der niedrigen Gesamtkonzentration deutliche Unterschiede zwischen dem Anlagenteil mit und dem ohne Behandlung in Versuchsphase IV (Behandlung Rezirkulat, Abbildung 12). Während die Essigsäurekonzentration mit elektrischer Behandlung bei  $30 \pm 10 \text{ mg L}^{-1}$  lag, war der Wert ohne Behandlung weitgehend stabil bei  $16 \pm 4 \text{ mg L}^{-1}$ . Es ist möglich, dass die mikrobielle Gemeinschaft durch die elektrische Behandlung regelmäßig gestört wurde und Zeit brauchte, um sich zu regenerieren. Ferner ist denkbar, dass in Folge der Behandlung bspw. Konglomerate reduziert wurden, die zusätzliche Nährstoffe freisetzen, die wiederum teilweise in Essigsäure umgesetzt werden konnten. In Versuchsphase V (Abklingphase) blieb der Unterschied im Essigsäuregehalt der Gärmedien im Verhältnis gleich (HFB:  $29 \text{ mg L}^{-1}$ ; HFD:  $15 \text{ mg L}^{-1}$ ). Der Essigsäuregehalt sowie auch der FOS-Gehalt sind bei beiden Reaktoren im „normalen“ Bereich und deuten nicht auf eine Hemmung hin.

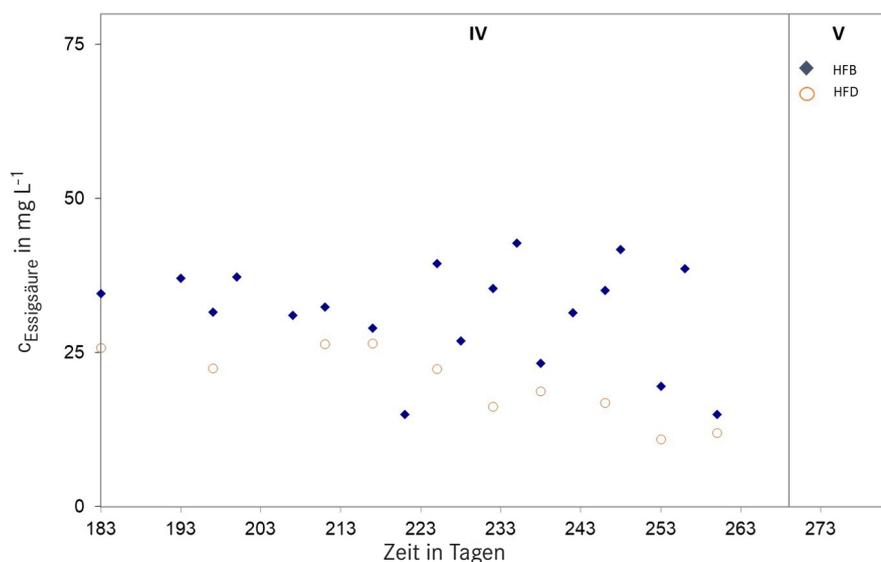


Abbildung 12: Essigsäurekonzentration im Gärmedium der Fermenter HFB und HFD in Versuchsphase IV und V

In Versuchsphase II war der Ammoniumstickstoffgehalt des Gärmediums im behandelten Anlagenteil mit  $1,6 \pm 0,3 \text{ g L}^{-1}$  etwas höher als im unbehandelten Fermenter, wo nur  $1,4 \pm 0,3 \text{ g L}^{-1}$  gemessen wurde. In den folgenden Versuchsphasen zeigten beiden Anlagenteilen vergleichbare Ammoniumstickstoffgehalte (Versuchsphase III: HFB mit  $1,1 \pm 0,06 \text{ g L}^{-1}$ ; HFD mit  $1,0 \pm 0,04 \text{ g L}^{-1}$  und Versuchsphase IV: HFB mit  $1,1 \pm 0,1 \text{ g L}^{-1}$ ; HFD mit  $0,9 \pm 0,1 \text{ g L}^{-1}$ ). Während der Abklingphase sank dieser Wert in HFB auf  $0,8 \text{ g L}^{-1}$  und in HFD auf  $0,7 \text{ g L}^{-1}$ .

## Diskussion

In diesem Vorhaben konnten die Vorteile einer parallelen Vergärung zur Untersuchung der Desintegration von Gärmedien und Biogassubstraten im Pilotmaßstab aufgezeigt werden. Trotz der sich ändernden Qualitäten der Ausgangssubstrate (insbesondere bei der Maissilage), war ein Vergleich der beiden Reaktorlinien möglich. Damit ist eine objektive Bewertung der Prozessbedingungen und hiermit eine Einordnung der generierten Messdaten in Bezug auf die zusätzliche Behandlung durchführbar. Eine weit genauere Differenzierung der Auswirkungen der dargestellten Desintegrationsmethode auf die Biogasbildung wurde durch die hohe Anzahl von Betriebsstörungen verhindert. Zwar gelang es im Projektverlauf durch Programmänderungen und Änderungen an der Rohrleitungsperipherie das Störrisiko zu senken, dennoch traten weiterhin typische Skalierungseffekte auf. Die Verwendung von 2" Rohrleitungen für eine Pilotanlage stellte einen üblichen Rohrquerschnitt für derartige Anlagengrößen dar. Allerdings zeigten sich bei den nicht zu skalierenden Faserlängen bzw. Klumpengrößen der Ausgangssubstrate Limitationen. Auf eine zusätzliche mechanische Vorbehandlung der Substrate wurde mit Hinblick auf die Bewertung der Desintegrationsmethode bewusst verzichtet. Zunächst erfolgte das gemeinsame Anfahren beider Reaktorlinien, ohne Behandlung, zum Ziele eines gemeinsamen stabilen Betriebes (Versuchsphase I). Dies konnte gezeigt werden, indem in beiden Reaktorlinien beispielsweise Parameter wie der pH-Wert oder der FOS-Gehalt einen stabilen Verlauf darstellten.

Die Behandlung der Substratzugabe mittels Hochspannungspulsen und Schockwellen erfolgte in Versuchsphase II und zeigte keine signifikante Änderung weder bei der spezifischen Biogasproduktion noch bei der Biogasqualität in Bezug auf Versuchsphase I. Versuchsphase III war geprägt von verschiedenen Betriebsstörungen bei der automatischen Beschickung, die durch den Wechsel von 6-maliger automatischer Beschickung in einmalige manuelle Beschickung pro Tag geändert wurde. Anschließend stabilisierte sich der Prozess, was sich in einer hohen spezifischen Biogasproduktion in beiden Anlagenteile zeigte. In Versuchsphase IV wurde die manuelle Beschickung weitergeführt und das Rezirkulat behandelt. Trotz gleichbleibender FOS-Gehalte, bei dem die Messwerte im HFB höher waren, kam es zu einer Senkung der spezifischen Biogasproduktion. Die höhere Biogasproduktion im HFB wird dem Abbau der durch die Störungen kumulierten Nährstoffe zugeschrieben, die durch den Aufschluss des Rezirkulats wieder verfügbar gemacht wurden. Die gemessenen FOS-Gehalte von  $0,5$  bis  $1 \text{ g L}^{-1}$  weisen auf einen stabilen Biogasprozess hin. FOS-Gehalte größer  $10 \text{ g L}^{-1}$  würden auf eine Störung der Prozessbiologie hindeuten (Voss et al. 2009). Dies wird über den gesamten Versuchszeitraum nicht erreicht, was zeigt, dass die auftretenden Störungen (Sauerstoffeintrag durch Lösen von Verstopfungen) keinen nachhaltig negativen Einfluss auf die Prozessstabilität hatten.

In Versuchsphase V wurde die Beschickung bei Weiterbetrieb der Behandlung eingestellt. Es kam zur erwarteten Absenkung der prozessbeschreibenden Parameter (ANGELIDAKI et al. 1999, MAUKY et al. 2016) in diesem Zeitbereich.

## Schlussfolgerungen

Im Zuge der wirtschaftlichen Nutzung von Biogas ist die Optimierung der Prozessführung ein wichtiger Bestandteil der Forschung und Entwicklung. Neue Konzepte werden im Labormaßstab entwickelt und anschließend in die Produktion überführt. Dabei muss sichergestellt werden, dass eine neue Behandlungsmethode den Vorgaben hinsichtlich Gasausbeute, Gaszusammensetzung und Stabilität des Gesamtprozesses den wirtschaftlichen Vorgaben entspricht. Vergleichende Versuche mit multiplen Einzelfermentoren sind im Labormaßstab wegen der geringen Mengen nicht problematisch, gestatten aber wegen des immensen Aufwandes kein Upscaling. Das Austesten der Grenzen eines neuen Verfahrens könnte in einer großen Biogasanlage im Regelbetrieb aber unter Umständen zu erheblichen Einbußen führen. Pilotbiogasanlagen sind ein wesentliches Werkzeug beim Übergang vom Labor- zum großtechnischen Maßstab. Besonders bei der Biogaserzeugung aus Substraten wie Gülle oder Maissilage ist das Ergebnis immer von der Beschaffung der Ausgangsmaterialien abhängig. Ein Vergleich der Prozessführung mit dem gleichen Substrat zu unterschiedlichen Zeiten birgt immense Risiken, aufgrund der sich ändernden Substratqualitäten bei fortschreitendem Zeitverlauf. Nur die parallele Vergärung behandelter und unbehandelter Substratgemische kann eine klare Aussage zum Effekt der Behandlung machen. Die hier beschriebene Pilotanlage erfüllt diese Ansprüche. Während bei aufeinanderfolgenden Vergärungen bei gleicher Behandlung teilweise erhebliche Unterschiede gefunden wurden (RITTMANN et al. 2008), gab es bei der parallelen Vergärung keine signifikanten Abweichungen. Diese traten erst bei unterschiedlichen Behandlungen zutage.

Eine abschließende Bewertung der prozessbeschreibenden Parameter zu einer allgemeingültigen Handlungsempfehlung lässt sich aufgrund des Vorhabenverlaufes mit diversen Betriebsstörungen kaum bewerkstelligen. Die Bestimmung der möglichen Einflüsse infolge der Behandlung mit Hochspannungspulsen in Kombination mit Schockwellen kann nur in Ansätzen nachvollzogen werden. Beide Reaktorlinien zeigten unabhängig von Behandlung und Störungsbeteiligung ähnliche Messwerte bei unterschiedlichen prozessbeschreibenden Parametern. Die hier gezeigten Ergebnisse des Vorhabens beziehen sich ausschließlich auf die heterogene Substratkombination aus Maissilage und Rindergülle. Zukünftig wäre interessant, die Behandlungsmethode mit homogeneren Substratkombinationen zu validieren.

## Literatur

- Ahring, B.K.; Angelidaki, I. (1997): Monitoring and controlling the biogas process. In: Holm-Nielsen, J.B. (Ed.): The future of Biogas in Europe. BioPress, Risskov, pp. 59-73
- Almomani, F.; Bhosale, R.R.; Khraisheh, M.A.M.; Shawaqfeh, M. (2019): Enhancement of biogas production from agricultural wastes via pre-treatment with advanced oxidation processes. *Fuel* 253, pp. 964-974
- Alvira, P.; Tomas-Pejo, E.; Ballestoros, M.; Negro, M.J. (2009): Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology* 101, pp. 4851-4861
- Amon, T.; Kryvoruchko, V.; Hopfner-Sixt, K.; Amon, B.; Ramusch, M.; Milovanovic, D.; Bodiroza, V.; Sapik, R.; Zima, J.; Machmüller A. (2006): Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiewertsystem: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
- Angelidaki, I.; Ellegaard, L.; Ahring, B.K. (1999): A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas. *Biotechnology and Bioengineering* 63, pp. 363-372
- Apelt, M. (2015): Bestimmung von aliphatischen organischen Säuren und Benzaldehyd mit Head-Space-GC. In: Liebetrau, J.P.; Thrän, D. Messmethodensammlung Biogas. Leipzig, DBFZ, S. 36-37

- Brulé, M.; Lemmer, A.; Oechsner, H.; Jungbluth, T.; Schimpf, U. (2008): Effect of adding fibrolitic enzymes to the methane yields of rye silage. *Landtechnik* 63, pp. 178-191
- Brulé, M.; Vogtherr, J.; Lemmer, A.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2011): Effect of enzyme addition on the methane yields of effluents from a full-scale biogas plant. *Landtechnik* 66, pp. 50-52
- Carlsson, M.; Lagerquist, A.; Morgan-Sagastume, F. (2012): The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: a review. *Waste Management* 32(9), pp. 1634-1650
- Casciola, M.; Tarek, M. (2016): A molecular insight into the electro-transfer of small molecules through electropores driven by electric fields. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes* 1858(10), pp. 2278-2289
- Castrillón, L.; Fernández-Nava, Y.; Ormaechea, P.; Marañón, E. (2011): Optimization of biogas production from cattle manure by pre-treatment with ultrasound and co-digestion with crude glycerin. *Bioresource Technology* 102, pp. 7845-7849
- Climent, M.; Ferrer, I.; del Mar Baeza, M.; Artola, A.; Vazquez, F.F.X. (2007): Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. *Chemical Engineering Journal* 133, pp. 335-342
- Hjorth, M.; Gränitz, K.; Adamsen, A.P.S; Møller, H.B. (2011): Extrusion as a pretreatment to increase biogas production. *Bioresource Technology* 102, pp. 4989-4994
- Karray, R.; Hamza, M.; Sayadi, S. (2015): Evaluation of ultrasonic, acid, thermo-alkaline and enzymatic pretreatments on anaerobic digestion of *Ulva rigida* for biogas production. *Bioresource Technology* 187, pp. 205-213
- Mauky, E.; Weinrich, S.; Nägele, H.-J.; Jacobi, H.F.; Liebetrau, J.; Nelles, M. (2016): Model Predictive Control for Demand-Driven Biogas Production in Full Scale. *Chemical Engineering & Technology* 39, pp. 652-664
- Müller, L.; Kretzschmar, J.; Pröter, J.; Liebetrau, J.; Nelles, M.; Scholwin, F. (2016): Does the addition of proteases affect the biogas yield from organic material in anaerobic digestion? *Bioresource Technology* 203, pp. 267-271
- Rittmann, B.E.; Lee, H.S.; Zhang, H.; Alder, J.; Banaszak, J.E.; Lopez, R. (2008): Full-scale application of focused-pulsed pre-treatment for improving biosolids digestion and conversion to methane. *Water Science and Technology* 58, pp. 1895-1901
- Rodríguez, C.; Alaswad, A.; Benyounis, K.Y.; Olabi, A.G. (2017): Pretreatment techniques used in biogas production from grass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68, pp. 1193-1204
- Schroyen, M.; Vervaeren, H.; Van Hulle, S.W.H.; Raes, K. (2014): Impact of enzymatic pretreatment on corn stover degradation and biogas production. *Bioresource Technology* 173, pp. 59-66
- Strach, K. (2013): Bestimmung des Ammoniumstickstoffgehaltes. Leipzig, DBFZ
- Strach, K. (2015a): Bestimmung der Trockensubstanz und der organischen Trockensubstanz. In: Liebetrau, J.P.; Thrän, D. *Messmethodensammlung Biogas*. Leipzig, DBFZ, S. 27-28
- Strach, K. (2015b): Bestimmung des FOS-Wertes (nach Kapp) und des FOS/TAC-Wertes (nach FAL). In: Liebetrau, J.P.; Thrän, D. *Messmethodensammlung Biogas*. Leipzig, DBFZ, S. 32-34
- Thoss, C. (2007): Bioenergie und Naturschutz: Sind Synergien durch die Energienutzung von Landschaftspflegeresten möglich? In: *Endbericht an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*. Darmstadt
- VDLUFA (2007): *Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch)*. Bd III Die Chemische Untersuchung von Futtermitteln
- Vorobiev, E.; Lebovka, N.I. (2008): Pulsed electric fields induced effects in plant tissue: fundamental aspects and perspectives of application. In: Vorobiev E, Lebovka NI, editors. *Electrotechnologies for Extraction from Food Plants and Biomaterials*. New York, Springer, pp. 39-82
- Vollmer, G.-R. (2011): Biogas in der Landwirtschaft-Stand und Perspektiven. In: *FNR/KTBL-Kongress vom 20. bis 21. September 2011*, Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe, Göttingen
- Voß, E.; Weichgrebe, D.; Rosenwinkel, K. (2009): FOS/TAC: Herleitung, Methodik, Anwendung und Aussagekraft. *Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science* 3, S. 675-682
- Westerholm, M.; Castillo, M.D.P.; Chan Andersson, A.; Jahre Nilsen, P.; Schnürer, A. (2019): Effects of thermal hydrolytic pre-treatment on biogas process efficiency and microbial community structure in industrial- and laboratory-scale digesters. *Waste Management* 95, pp. 150-160

- Wieland, P. (2010): Biogas production: current state and perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol* 85, pp. 849-860
- Wolf, C.; Gaida, D.; Bongards, M. (2013): Steuerungs- und Regelungskonzepte für landwirtschaftliche Biogasanlagen. In: *Biogas in der Landwirtschaft–Stand und Perspektiven*, Proceedings FNR/KTBL-Kongress, S. 10-11
- Xie, S.; Frost, J.P.; Lawlor, P.G.; Wu, G.; Zhan, X. (2011): Effects of thermo-chemical pre-treatment of grass silage on methane production by anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 102, pp. 8748-8755
- Yadvika, S.; Sreekrishnan, T.R.; Kohli, S.; Rana, V. (2004): Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques a review. *Bioresource Technology* 95, pp. 1-10
- Zeynali, R.; Khojastehpour, M.; Ebrahimi-Nik, M. (2017): Effect of ultrasonic pre-treatment on biogas yield and specific energy in anaerobic digestion of fruit and vegetable wholesale market wastes. *Sustainable Environment Research* 27, pp. 259-264

## Autoren

**Steve Chrosziewski** und **Wolfgang Krause** sind Geschäftsführer bzw. Konstrukteur der Triptiser Edelstahl GmbH, Straße der Deutschen Einheit 12, 07819 Triptis

**Gunnar Schneider** und **Dr. Jörg Brutscher** sind Geschäftsführer bzw. Konstrukteur der GBS Elektronik GmbH, Bautzner Landstraße 22, 01454 Radeberg

**Dr. Franziska Schäfer**, **Ulf Müller** und **Christian Krebs** arbeiten im Forschungsbiogasanlage DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Torgauer Straße 116, D-04347 Leipzig

**Prof. Dieter Beckmann**, **Prof. Dr. Uwe Pliquett** und **Danny Echtermeyer** arbeiten im Institut für Bioprocess- und Analysenmesstechnik e.V., Rosenhof 1, D-37308, Heilbad Heiligenstadt. E-Mail: uwe.pliquett@iba-heiligenstadt.de