

Abschlussbericht

Studie zur Effizienzmessung eines neuartigen und innovativen Rührwerks für Substrate in Biogasanlagen und dessen Strömungsverhalten

von

Hans Oechsner, Hans-Joachim Nägele
Philipp Kress

Universität Hohenheim
Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie 740

Förderkennzeichen: L75 15002

Laufzeit: 01.12.2014 - 31.12.2016

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

Juni 2018



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung des Projektes	2
2	STAND DER TECHNIK	3
2.1	Rührwerkstechnik in Biogasanlagen	3
2.2	Strömungsgeschwindigkeiten und Modelle	6
2.3	Nährstoffverteilung	15
2.4	Rheologie	17
3	MATERIAL UND METHODEN	20
3.1	Versuchsaufbau Strömungsmessung	24
3.1.1	Messgerät	25
3.1.2	Messvorrichtung	26
3.1.3	Versuchsdurchführung	26
3.2	Versuchsaufbau Nährstoffverteilung	28
3.2.1	Versuchsdurchführung Nährstoffverteilung	30
4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	32
4.1	Versuch zur Strömungsgeschwindigkeit	32
4.1.1	Anlagenbetrieb im Versuchszeitraum	32
4.1.1.1	Fütterung	32
4.1.1.2	Gasmenge und Qualität	34
4.1.1.3	Energieaufnahme des bionischen Rührwerkes	38
4.1.2	Viskosität des Fermentersubstrates	39
4.1.3	Strömungsgeschwindigkeiten	43
4.1.4	Abkling- und Anfahrzeiten	56
4.1.5	Anströmwinkel an den Messschleusen	63
4.2	Versuch zur Nährstoffverteilung	64
4.2.1	Fütterung	64
4.2.2	Gasertrag und Gasqualität	68
4.2.3	Viskosität des Fermentersubstrates	71

4.2.4 Nährstoffverteilung	74
4.2.4.1 Vertikale Nährstoffverteilung	74
4.2.4.2 Horizontale Nährstoffverteilung	76
4.2.4.3 Diskussion Nährstoffverteilung	77
4.2.5 Stromverbrauch	80
4.2.6 Bewertung des Versuches Nährstoffverteilung	84
5 HIGHLIGHTS	85
6 ZUSAMMENFASSUNG	86
7 VERÖFFENTLICHUNGEN	88
8 LITERATURVERZEICHNIS	89

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Das Durchmischen von Biogasfermentern ist für einen effizienten Anlagenbetrieb unabdingbar. Die optimale Durchmischung des Fermenterinhalt soll mit möglichst geringem Energieaufwand erzielt werden. Hierbei werden die am Prozess beteiligen Mikroorganismen mit frischen Nährstoffen versorgt, deren Abbauprodukte abgeführt, die gleichmäßige Verteilung der Gärtemperatur erreicht sowie die Gasblasen aus der Flüssigkeit ausgetrieben. Hierfür benötigen klassische Rührwerke ca. 5% der an der Biogasanlage produzierten elektrischen Energie. Berechnungen zeigen, dass in Deutschland ca. 140 Millionen Euro nur für den Betrieb von Rührwerken aufgewendet werden müssen. Die Rührqualität verschiedener Rührwerkstypen wurde im Forschungsprojekt (Intensivmessprogramm Bioenergieforschungsplattform BW) anhand der Nährstoffverteilung ausgiebig untersucht. Hierbei zeigte es sich, dass die Nährstoffe im Fermenter häufig ungleichmäßig verteilt sind. Sowie das die Rührwerksart einen Einfluss auf deren Verteilung hat und das der Stromverbrauch einen Anteil von <50% der eingesetzten Rührerenergie aufweist. Darüber hinaus wurde ein theoretisches Einsparpotential von 50% an elektrischer Energie bestimmt (Nägele et al. 2012). Für die Biogasproduktion bedeutet dies, dass beim Einsatz optimaler Rührtechnik ca. 70 Millionen Euro alleine für das Rühren eingespart werden können.

In Baden-Württemberg waren im Jahr 2013 846 Biogasanlagen mit rund 292 MW installierter elektrischer Leistung am Netz (Fachverband Biogas e. V. 2015). In den letzten Jahren war hierbei eine deutliche Abnahme des Anlagenzubaues zu erkennen. Es ist zu erwarten, dass zukünftig der Anlagenneubau nicht zunehmen wird. Nahezu 75% der Anlagen sind seit 2009 oder früher in Betrieb. Vor allem bei diesen Anlagen zeichnet sich ein hoher Ersatz- und Modernisierungsaufwand ab. Die Rührwerkstechnik steht bei den Repowering-Maßnahmen aufgrund des hohen Effizienzsteigerungspotentials an erster Stelle. Rührwerke müssen in regelmäßigen Abständen zwischen 5-8 Jahren verschleißbedingt ausgewechselt werden. Die Betreiber von Biogasanlagen in Baden-Württemberg stehen in den kommenden Jahren vor der Entscheidung, welche Rührwerkstechnik die bestehende ersetzen soll. Die Ergebnisse dieses Projektes sollen hierbei unterstützend wirken. Mit zunehmender biologischer Flexibilisierung von Biogasanlagen und der bedarfsbezogenen Produktion von Biogasstrom wird die Bedeutung von Rührqualität noch weiter an Bedeutung gewinnen. Bei hoch belasteten Prozessen mit schwankender Fütterung bildet eine hohe Mischgüte die Basis, um Prozessstörungen zu verhindern.

Die Erforschung der Rührqualität in Biogasfermentern hat in den vergangenen Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Mehrere Forschergruppen arbeiten an diesem Themengebiet. Die Methoden zur Bestimmung der Rührqualität sind hierbei in den meisten Fällen Laboruntersuchungen, Computational Fluid Dynamics und Prozesstomographie (Lomtscher et al. 2013, Mönch-Tegeder et al. 2014, Lomtscher et al. 2017ab). Bislang ist es nicht gelungen, die theoretischen Ansätze der Forschung in die Praxis zu übertragen. Noch immer werden Rührwerke basierend auf der Erfahrung von Herstellern und Beratern eingebaut und betrieben. Der Biogasanlagenbetreiber muss sich beim Einsatz der Rührwerke ebenfalls auf seine Erfahrung verlassen und hat kaum die Möglichkeit die Effizienz zu steigern um dadurch Kosten zu sparen.

1.2 Zielsetzung des Projektes

In dem vorliegenden Forschungsprojekt soll ein äußerst innovatives, bionisches Rührwerk der Fa. WUSOA für zwei Verweilzeiten in einem der beiden Biogasfermenter an der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof am Standort Lindenhöfe der Versuchsstation Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim eingebaut und insbesondere auf die folgenden Faktoren getestet werden:

- Primärenergieverbrauch (kontinuierlich)
- Menge und Qualität des erzeugten Biogases (kontinuierlich)
- Nährstoffverteilung in den Fermentern (12 Messpunkte mit 3 Höhen)
- Prozessbiologische Aktivität des Gärsubstrates im Fermenter (vierzehntägig)
- Viskosität des Fermentersubstrates mit Hilfe eines Rohrviskosimeters
- Untersuchung des Strömungsbildes (zusammen mit Fraunhofer IKTS in Dresden)
- Vergleich des neuen Rührwerkes mit Messdaten der Rührwerke an der bestehenden Anlage

Im Vorlauf zu den Forschungsarbeiten wurde Versuchsfermenter 2 an der Forschungsbiogasanlage entleert und gereinigt und im Anschluss das bionische Rührwerk in den bestehenden Revisionsschacht eingebaut und getestet. Im Anschluss an die erste Versuchsphase wurde die Standard-Rührerausstattung untersucht. Aus den Datensätzen wurde die Rührleistung und Effizienz des neuen Rührwerkes mit der bestehenden Ausstattung verglichen.

2 STAND DER TECHNIK

2.1 Rührwerkstechnik in Biogasanlagen

Optimale und konstante Bedingungen in einem Biogasfermenter sind die Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen und störungsfreien Betrieb. Die Durchmischung des Substrates ist dafür ein wichtiger Prozess, bei dem Nährstoffe, Wärme sowie frisches Substrat schnell in den Fermenter eingemischt und gleichmäßig verteilt werden. Eine konstante Temperatur ohne große Schwankungen im gesamten Fermenter sowie die Einmischung der zugeführten Substrate sind notwendig, um die Bakterien mit frischen Nährstoffen zu versorgen und gleichbleibende Bedingungen zu gewährleisten. Durch thermische Konvektionsströmungen sowie durch das Aufsteigen des Biogases im Substrat mischt sich der Fermenter zu einem gewissen Teil selbst. Untersuchungen an Pilotanlagen zeigten, dass eine Durchmischung durch Konvektionsströmungen bei niedrigen TS-Gehalten möglich ist (Wellinger et al. 1991). Rindermastgülle mit einem TS-Gehalt von 6% wurde bei einer Heizleistung von 200 Watt pro m³ Gärbehälterinhalt innerhalb von 24 Stunden vollständig eingemischt. Markierungsversuche zeigten zudem keine Verlängerung der Verweilzeit der Gülle im Vergleich zu einem gerührten Fermenter. Da diese Mischwirkung nur bei einem dünnflüssigen und homogenen Biogassubstrat ausreichend ist bzw. problemlos funktioniert, ist eine zusätzliche Rührereinrichtung bei nahezu allen Anlagen im landwirtschaftlichen Bereich, besonders bei Anlagen mit Mist und festen Substraten, unabdingbar. Eine Untersuchung ergab je nach Rührwerksvariante einen 15 % bis 29 % höheren Biogasertrag im Vergleich zu einem nicht durchmischten Fermenter (Karim et al. 2005). Auch das Ausgasen des Biogases aus dem Substrat kann durch aktives Rühren verbessert werden. Durch die scherverdünnende Wirkung von Rührwerken können die Gasbläschen besser aus dem Substrat entweichen. Zudem können Schwimm- und Sinkschichten durch eine aktive Durchmischung besser aufgelöst bzw. die Bildung verhindert werden (Eder und Krieg 2012, Lemmer et al. 2013).

Bei 85-90 % der Anlagen werden in Deutschland mechanische Varianten, zu denen hauptsächlich die Rührwerke gezählt werden, installiert. In Biogasanlagen kommen auch pneumatische und hydraulisch Systeme für die Durchmischung des Fermenters zur Anwendung. Diese sind von geringer Bedeutung, weshalb im Folgenden nur auf die mechanischen Systeme eingegangen wird (FNR 2016). In stehenden Rundbehältern, auch Rührkessel-Fermenter genannt, welche zu über 80% in Biogasanlagen verbaut werden, kommen überwiegend Tauchmotorrührwerke (TMR), Langachs-rührwerke (LAR), Axialrührwerke sowie Paddel- oder Haspelrührwerke zum Einsatz.

Tauchmotorrührwerke werden vollständig in das Biogassubstrat eingetaucht und müssen deshalb wasserdicht und korrosionsbeständig sein (Eder und Krieg 2012, Kissel et al. 2014). Diese werden in schnell laufende Propellerrührwerke und langsam laufende Großflügel- bzw. Großpropellerrührwerke unterteilt. Schnell laufende Propellerrührwerke, welche von der Gülletechnik übernommen wurden, erzeugen durch ihre hohen Umdrehungszahlen von 500 bis 1.500 1/min eine turbulente Strömung (FNR 2016). Unter anderem erreichen sie durch ihre horizontale und vertikale Beweglichkeit eine gezielte Durchmischung in allen Schichten und Bereichen im Fermenter und haben sich besonders für niedrige TS-Gehalte unter 4 % bewährt (Eder und Krieg 2012). Großflügelrührwerke mit Propellerdurchmessern von bis zu 2,5 m rühren im Gegensatz dazu mit langsameren Umdrehungszahlen von 50-120 1/min und bewirken keine turbulente Strömung, sondern eine hohe Schubleistung und sind deshalb auch für höhere TS-Gehalte geeignet (FNR 2016). Mit einem Marktanteil von 47 % in Deutschland sind die TMR die am meisten eingesetzten Rührwerke zur Durchmischung von Biogasfermentern (Gemmeke et al. 2009).

Langachsührwerke befinden sich schräg im Fermenter. Der Motor ist am Ende der Rührwelle angebracht und außerhalb des Fermenters verbaut. Charakteristisch für LAR sind die großen Flügeldurchmesser (> 1,5 m) und die, im Vergleich zum TMR, niedrigen Umdrehungszahlen (< 40 1/min). Oftmals werden LAR mit anderen Rührwerksarten kombiniert (Kissel et al. 2014). Die Achse kann wahlweise am Boden gelagert oder in schwimmender oder schwenkbarer Variante verbaut werden und entweder im Intervall oder kontinuierlich betrieben werden. Ein Intervallbetrieb kann jedoch zu Sink- und Schwimmschichten führen (FNR 2016). LAR haben in Deutschland einen Marktanteil von 12,9 % (Gemmeke et al. 2009).

Axialrührwerke sind an einer Achse, die sich in der Regel an der Fermenterdecke befindet, verbaut und rühren kontinuierlich mit wenigen Umdrehungen pro Minute. Dadurch soll eine im Inneren des Fermenters nach unten und eine an der Fermenterwand nach oben ausgerichtete Strömung herbeigeführt werden, wodurch Sink- und Schwimmschichten erfolgreich verhindert werden können. Der Motor und das Getriebe sind, wie auch bei dem LAR, außerhalb des Fermenters angebracht. Dies ermöglicht eine einfache Wartung ohne Prozessunterbrechung (FNR 2016). Dieser Rührwerkstyp wird in 6 % der Anlagen in Deutschland verbaut (Gemmeke et al. 2009). Axialrührwerke sind besonders für dickflüssige Substrate geeignet und werden meistens in Hochbehältern (Behälterdurchmesser \approx Behälterhöhe), die hauptsächlich in Dänemark zur Anwendung kommen, eingesetzt (Kissel et al. 2014).

Paddel- und Haspelrührwerke werden in stehenden Rührkessel-Fermentern sowie in liegenden Fermentern, auch als Pfropfenstrom-Fermenter bezeichnet, eingebaut und haben in Deutschland einen Marktanteil von 8,2 % (Gemmeke et al. 2009). Diese langsam drehende Rührwerksart wird hauptsächlich in Intervallen betrieben. Die Rührwelle ist horizontal im Fermenter verbaut. Der Antrieb befindet sich außerhalb des Fermenters (FNR 2016).

Verschiedene Rührwerkstypen werden in der Praxis oft miteinander kombiniert, um eine optimale Durchmischung in allen Bereichen und Schichten im Fermenter zu erreichen (Kaltschmitt und Hartmann 2009). In Deutschland wird in 16 % der Anlagen eine Kombination aus langsam laufenden Rührwerken und schnell drehenden TMR eingesetzt (Gemmeke et al. 2009). Die Rührsysteme für den Biogasbereich wurden aus der Gülle- und Abwassertechnik übernommen und gezielt für die Anwendungen in Biogasanlagen angepasst und verbessert. Dadurch sind einige neue Rührwerksarten entstanden, für die jedoch keine Langzeitergebnisse im Praxisbereich vorhanden sind. Da es keine verlässlichen Daten bzw. Empfehlungen für die Auslegung von Rührwerken gibt, wird die Rührtechnik bis heute nach den Erfahrungswerten der Hersteller und Betreiber ausgelegt und verbaut. Um keine Störungen des Biogasprozesses zu riskieren, werden Rührwerke auf Kosten der Effizienz überdimensioniert und mit genügend Leistungsreserven ausgelegt (Görich und Helm 2014). In diesem Bereich besteht noch ein großer Forschungsbedarf. Für eine effizientere Biogasproduktion müssen Rührwerke optimiert werden, indem der hohe Eigenstromverbrauch gesenkt wird. Dabei sollte die Durchmischung des Fermenters nicht beeinträchtigt und somit die Bedingungen für die methanerzeugenden Bakterien nicht verschlechtert werden. Schwimm- und Sinkschichten, biologisch geringe Aktivitäten oder Totzonen sollten vermieden werden, um das volle Fermentervolumen für die Biogaserzeugung zur Verfügung zu haben. Als Totzonen werden Bereiche im Fermenter bezeichnet, die nicht mit frischem Substrat versorgt werden und in denen somit keine methanerzeugenden Mikroorganismen vorhanden sind (Lemmer et al. 2013). Für eine Bewertung der Mischwirkung von Rührsystemen können Untersuchungen der Temperatur- und Nährstoffverteilung sowie der Strömungsgeschwindigkeiten herangezogen werden. Um die Effizienz von Rührwerken bewerten zu können, muss der Energieverbrauch ermittelt werden. Dieser soll aufgrund des hohen Anteils der Rührwerke am Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen zukünftig verringert werden. Derzeit gibt es allerdings nur wenige Untersuchungen an Praxisanlagen, die für eine solche Bewertung herangezogen werden. Viele Untersuchungen wurden bisher nur an Laboranlagen durchgeführt und konnten noch nicht durch Praxisversuche bestätigt oder ergänzt werden. Die Firma Maier Energie und Umwelt GmbH definiert die Effizienz von horizontal ausgerichteten Rühr-

werken anhand des erzeugten Axialschubes pro aufgenommener Leistung. Der Axialschub entspricht dabei der Kraft, die von einem Rührwerk für die Beschleunigung des Substrates in horizontaler Richtung erzeugt wird (Maier Energie und Umwelt GmbH 2016).

Nach Empfehlungen vom Solarenergieförderverein Bayern e.V. ist es sinnvoll, vor allem bei langsam drehenden Rührwerken, durch einen Frequenzumformer die Leistung zu drosseln und mit einer geringeren Umdrehungszahl im Dauerbetrieb zu rühren als mit einer höheren im Intervall. Dadurch kann der hohe Anteil der Röhreinrichtungen am Eigenstromverbrauch reduziert werden (Dachs und Rehm 2006). Der Trend geht derzeit hin zu langsam laufenden Rührwerken mit größeren Propellerdurchmessern, die im Vergleich zu schnell laufenden Rührwerken bis zu 73 % Energie einsparen können. Langsam laufende Großflügelrührwerke erzeugen globale Strömungen, wodurch eine bessere Verteilung und Vermischung des Substrates erreicht werden. Schnell laufende Rührwerke dagegen neigen zu einer Kavernenbildung und somit zu einer lokalen Mischwirkung. Eine Optimierung der Rührtechnik kann somit die Energieeffizienz durch bessere Wirkungsgrade erhöhen und die Wirtschaftlichkeit der Anlage deutlich steigern (KSB Aktiengesellschaft 2016, Maier Energie und Umwelt GmbH 2016). Dies verdeutlicht auch eine Studie, bei der in einer bestehenden Anlage ein schnell laufendes TMR durch zwei langsam laufende TMR ersetzt und bei dem eingebauten Paddelrührwerk die Rührzeiten angepasst wurden. Dabei konnte der Energieverbrauch der Rührwerke bei gleichem Rührergebnis um 40 % verringert werden (FNR 2009). Allerdings können keine allgemein gültigen Aussagen über Rührzeiten getroffen werden, da die Eigenschaften und Zustände des Gärsubstrates im Fermenter bei jeder Anlage unterschiedlich und zu wenig erforscht sind. Die Rührtechnik und Rührzeiten müssen derzeit individuell angepasst werden (Kissel et al. 2014).

2.2 Strömungsgeschwindigkeiten und Modelle

Das Messen von Gas- oder Flüssigkeitsbewegungen bzw. Strömungen ist eine in vielen Branchen wichtige und unverzichtbare Methode zur Beurteilung und Weiterentwicklung von Maschinen oder Bauteilen. Dabei können z.B. aerodynamische Eigenschaften von Flugzeugen oder Automobilen, Strömungsverhalten von Flüssigkeiten oder Gasen in Rohren oder Kanälen oder auch thermische Strömungen bei Verbrennungs- oder Trocknungsanlagen genau ermittelt und verbessert werden. Auch in der Biogasbranche können Untersuchungen der Strömungen, beispielsweise im Fermenter, nützlich sein und Informationen über die Art, Auslegung und Handhabung von Rührwerken liefern, um diese wichtigen technischen Bauteile in Biogasanla-

gen zu optimieren. Dafür stehen einige Methoden im Technikumsmaßstab für die Laboruntersuchung zur Verfügung. Die größte Schwierigkeit bei solchen Modellanlagen stellt die Zusammensetzung des Biogassubstrates dar, da dieses oft nur mit transparenten, partikelfreien Modellfluiden simuliert werden kann. Dabei kommt oft Xanthan als Zugabe zu Wasser oder der Stoff Merat 550 zum Einsatz (Liebetau et al. 2015). Im Folgenden werden einige dieser Messmethoden zur Strömungsmessung in Technikumsanlagen erklärt und charakterisiert.

Bei optischen Messverfahren, zu denen die **Particle-Image-Velocimetry (PIV)** zählt, wird Laserlicht verwendet, um die Strömungsgeschwindigkeit in einem Fluid anhand Bewegungsaufnahmen von Partikeln, die in die Flüssigkeit gegeben werden, zu messen. Diese, auch Tracerpartikel genannt, sollten sich schlupffrei mit der Strömung bewegen. Gleichzeitig sollten sie fähig sein, Licht gut zu streuen. Mit diesem Verfahren können Messungen ohne eine Beeinflussung der Strömungen durchgeführt werden. Mit einem Preis von 50.000 € ist dieses Verfahren sehr teuer und aufwändig. Biogassubstrat kann aufgrund seiner Lichtundurchlässigkeit in diesem Verfahren nicht eingesetzt werden. Deshalb muss auf eine Hilfsflüssigkeit mit vergleichbaren Fließeigenschaften zurückgegriffen werden. Mit dem PIV-Verfahren wird der Behälter mit Laserlicht bestrahlt und die Lichtstreuungen an den Partikeln durch Momentaufnahmen aufgezeichnet. Daraus kann die Geschwindigkeit der Partikel berechnet werden. Dabei werden häufig Kreuzkorrelationskameras verwendet, die bis zu 7.000 Bilder pro Sekunde aufzeichnen können (Liebetau et al. 2015). Je nach PIV-System und Anzahl der eingesetzten Kameras können zwei- oder dreidimensionale Strömungsanalysen in Gas- und Flüssigkeitsphasen in einer Ebene oder im Raum realisiert werden (LaVision GmbH 2016).

Eine weitere Messmethode in Laboranlagen ist das **Computer Automated Radioactive Particle Tracking (CARPT)**, wobei radioaktive Teilchen in eine Flüssigkeit gegeben werden. Mit einem Gammastrahlungsdetektor können deren Positionen aufgezeichnet und die Strömungsverläufe in der Flüssigkeit ermittelt werden (Vieira et al. 2014). Dadurch ist es möglich, die Bewegungen der Partikel auch in einer undurchsichtigen Flüssigkeit aufzunehmen. In Abbildung 1 sind die Bewegungsverläufe eines radioaktiven Teilchens in Biogassubstrat während eines Rührvorgang dargestellt. Die Untersuchungen wurden in einem Fermenter im Labormaßstab durchgeführt. Dieser war bis zu einer Höhe von 175 mm gefüllt. Das Rührwerk war auf einer Höhe von 60 mm angebracht. Die Teilchenbewegungen wurden bei unterschiedlichen Drehzahlen des Rührwerkes jeweils über einen Zeitraum von 20 min untersucht. Es war deutlich zu erkennen, dass der Behälter bei höheren Drehzahlen besser durchmischt wurde. Bei der Drehzahl von 200 1/min durchströmte das Teilchen in dem Zeitraum von 20 min nahezu das

komplette Behältervolumen. Bei der niedrigsten Drehzahl von 50 1/min wurde der Behälter nur schlecht durchmischt. Das Teilchen bewegte sich nur in den Höhen unterhalb von 120 mm, meistens jedoch in dem Volumen oberhalb des Rührwerkes (Sindall 2014). Diese Untersuchungen zeigten, dass anhand des Bewegungsverlaufes eines Teilchens Aussagen über die Strömungen sowie die Durchmischung in einem Laborfermenter getroffen werden können. Das CARPT wurde mittlerweile zum Multiple Particle Tracking (MP-CARPT) weiterentwickelt. Dabei können mehrere radioaktive Teilchen ins Versuchsmedium gegeben und die Strömungen genauer aufgezeichnet werden (Al-Dahhan 2009, Al-Dahhan und Vesvikar 2006).

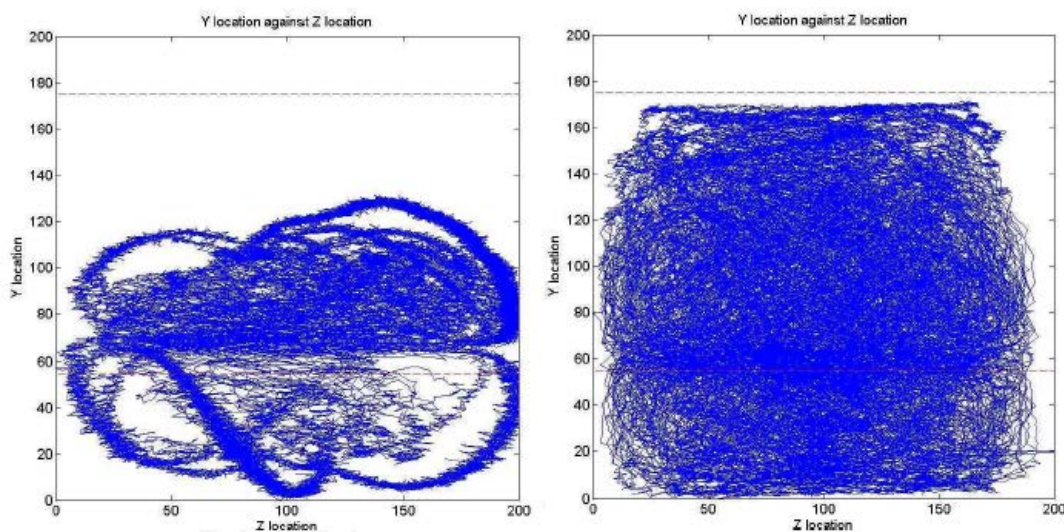


Abbildung 1: Bewegungsverlauf eines radioaktiven Tracerpartikels in einer Laboranlage bei den Rührwerksdrehzahlen 50 1/min (links) und 200 1/min (rechts) (Sindall 2014)

Ein weiteres Verfahren, bei dem radioaktive Strahlung eingesetzt wird, ist die **Computer Tomography**. Dabei durchdringen Gammastrahlen den Versuchsbehälter und die Flüssigkeit. Durch einen Detektor auf der gegenüberliegenden Seite werden diese aufgenommen. Dieses Messverfahren kann auch mit zwei Strahlungsquellen und Detektoren durchgeführt werden. Dies wird als Dual Source Tomography bezeichnet (Al-Dahhan 2009, Al-Dahhan und Vesvikar 2006).

Mit dem Verfahren der **thermoelektrischen Anemometrie** können mit Hilfe einer beheizten Messsonde genaue und hochauflösende Messdaten über die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden. Die Strömungsgeschwindigkeit verhält sich dabei proportional zu dem konvektiven Energieübergang, der durch die Temperaturdifferenz zwischen der Strömung und dem Sensor zustande kommt. Die am häufigsten verwendete Methode der thermoelektrischen Anemometrie ist die Konstanttemperaturanemometrie, bei der eine konstante Temperatur und somit

ein konstanter Sensorwiderstand gehalten werden. Bei einer Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit führt dieses Halten eines konstanten Widerstandes zu einer Veränderung der Spannung. Mit Hilfe dieser Spannungsänderung kann die Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden. Besonders vorteilhaft sind die niedrigen Anschaffungskosten von 10.000 € sowie die hohe Auflösung der Messdaten von 400 kHz. Dadurch können auch turbulente Bewegungen aufgezeichnet werden (Liebetau et al. 2015). Außerdem muss bei der thermoelektrischen Anemometrie kein Hilfsmedium verwendet werden, da diverse Ausführungen der Messsonde für verschiedene Strömungsumgebungen erhältlich sind. Dadurch wird auch eine Strömungsanalyse bei Biogassubstrat ermöglicht. Ein Nachteil im Vergleich zu den optischen Messverfahren ist die Beeinflussung der Strömungen durch den Sensorkopf (TSI GmbH 2016).

Die **Prozess-Tomographie** ermöglicht nicht nur eine örtlich und zeitlich gebundene Messung an einer Stelle, sondern eine Untersuchung des kompletten Strömungsvolumens (Liebetau et al. 2015). Dazu sind um einen Versuchsbehälter gleichmäßig Elektrodenringe in unterschiedlichen Höhen angebracht. Diese können zwischen 8 mm und 5 m groß sein (Industrial Tomography Systems 2016). Mit den angebrachten Elektroden wird mittels Induktion ein elektrisches Feld erzeugt. Die Untersuchung der Stoffverteilung basiert auf Widerstandsänderungen, die als Folge von unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeiten der zu mischenden Stoffsysteme entstehen. Für diese Messmethode ist eine unterschiedliche Leitfähigkeit im eingesetzten Substrat notwendig. Eine Untersuchung des Strömungsverhaltens von Biogassubstrat ist also möglich (Deutschmann et al. 2012). Oft wird allerdings ein partikelfreies Modellfluid mit strukturviskosen Fließeigenschaften verwendet, wie z.B. Carboxymethylcellulose (Fraunhofer IKTS Dresden 2016). Die ermittelte Leitfähigkeitsverteilung wird ausgewertet und entweder zwei- oder dreidimensional veranschaulicht, um die vertikalen Strömungsgeschwindigkeiten und Geschwindigkeitsprofile beurteilen sowie bewerten zu können (Liebetau et al. 2015). Zwar kann bei dieser Messmethode das gleiche Substrat wie in der Praxis verwendet werden, dennoch muss die Länge der Fasern und Partikel skaliert und an den kleineren Maßstab des Modellbehälters angepasst werden. Mit dieser Messmethode kann der Rührprozess im Modell nachgestellt und beurteilt werden. Bei der Prozess-Tomographie sind auch Totzonen sowie Sink- und Schwimmschichten erkennbar. (Deutschmann et al. 2012).

Ein weit verbreitetes Verfahren zur Strömungssimulation ist die **Computational Fluid Dynamics Simulation (CFD)**. Die Anwendung dieses Systems für einen Biogasfermenter ist allerdings nicht ohne weiteres möglich. Der Grund dafür ist, dass derzeit eine Simulation von Flui-

den mit unterschiedlichen Phasen, wie es bei Biogassubstrat der Fall ist, nicht möglich ist. Dieses setzt sich dabei, je nach eingesetztem Futter, aus Wasser, groben Stroh- oder Silagesubstraten, Säuren, Alkoholen, Fetten, Steinen sowie aus Gasen, wie CH₄ oder CO₂, zusammen. Dadurch wird die Simulation der Bewegungen in einem Fermenter erschwert (Lomtscher et al. 2013). Um trotzdem ein Strömungsfeld für einen Fermenter modellieren zu können, werden Simulationen an einzelnen Phasen durchgeführt, welche das reale Biogassubstrat repräsentieren sollen. Aus diesen einzelnen CFD-Simulationen kann ein Modell erstellt werden, aus dem Aussagen über das Mischverhalten und die Leistungsfähigkeit von Rührwerken getroffen werden können (Maier et al. 2010). Die Ergebnisse einer CFD-Simulation von Wu (2011) für zwei Rührwerke mit einer nach vorne gerichteten Schubströmung wurden durch unterschiedliche Farbkonturen visualisiert (Abbildung 2). Dabei konnte gezeigt werden, dass sich nach einer Erhöhung des TS-Gehaltes von 2,5 % auf 12,1 % die durchschnittlichen horizontalen Geschwindigkeiten von 0,60 m/s auf 0,32 m/s nahezu halbierten. Zudem wurden in den mittleren Bereichen die niedrigsten Geschwindigkeiten gemessen. (Wu 2011). Die Anwendung von CFD-Simulationen für die Bioenergiebranche ist zwar derzeit möglich, eine Weiterentwicklung ist aber notwendig (Wu 2013).

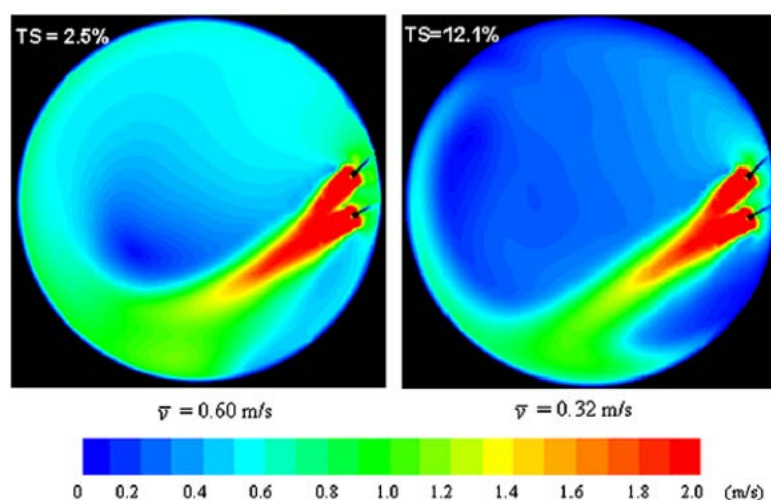


Abbildung 2: Visualisierung einer CFD-Simulation von Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des TS-Gehaltes (Wu 2011)

All diese Messverfahren und Simulationen sind nicht ohne Weiteres in die Praxis übertragbar, da kaum vergleichbare Messergebnisse von Praxisanlagen vorhanden sind. Es sind zwar Messsysteme für den Praxiseinsatz vorhanden bzw. in der Entwicklung, allerdings stellt die Unzugänglichkeit eines Fermenters eine große Schwierigkeit dar (Liebetrau et al. 2015). Nachfolgend werden einige dieser Messgeräte für den Einsatz in großtechnischen Anlagen vorgestellt.

Eine Möglichkeit bietet das von der Fraunhofer UMSICHT speziell für die Anwendung in Biogasfermentern entwickelte **Kanalrad (Biogasrad)**. Dabei wird die an einem Flügelrad anfallende Umdrehungszahl, die proportional zur Substratgeschwindigkeit im Fermenter ist, mittels magnetischer Induktion gemessen. Dadurch können Geschwindigkeiten ab 1,2 mm/s erfasst werden (Deerberg et al. 2009). Das Kanalrad kann entweder senkrecht vom Dach des Fermenters oder waagrecht an der Fermenterwand eingeführt werden. Somit sind horizontale sowie vertikale Strömungen messbar. Da das Flügelrad durch den hohen Anteil an Faser- und Feststoffen im Substrat leicht verstopft, muss die Sonde gelegentlich gespült werden. Dies erlaubt nur kurzzeitige Messungen (Deerberg et al. 2009, Liebetrau et al. 2015).

Eine weitere Messmethode stellt ein **Wireless Sensor Netzwerk** gestütztes Ortungssystem dar, das sich derzeit an der Fachhochschule Münster in der Entwicklung befindet. Durch die Positionsaufzeichnung tischtennisballgroßer, schwimmender Sendereinheiten sollen die Oberflächenströmungen im Fermenter aufgezeichnet werden können. Erste Untersuchungen zeigten, dass die Strömungen an der Oberfläche Rückschlüsse auf das Strömungsverhalten der unteren Substratebenen erlauben. Die dabei erhaltenen Messdaten können in ein CFD-Modell übertragen werden. Die Entwicklung dieses Messverfahrens ist zwar noch nicht beendet, zeigt aber, welche Möglichkeiten zur Strömungserfassung in einem realen Fermenter in naher Zukunft zur Verfügung stehen könnten (Jantzen 2016).

Der **magnetisch-induktive Strömungsmesser** (Typ OTT MF pro, OTT Hydromet GmbH, Deutschland) wurde ursprünglich für die Punktgeschwindigkeitsmessung in Gewässern, Kanälen oder Messrinnen entwickelt. Dieses Messgerät wurde für einen Einsatz zur Messung von horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten im Fermenter angepasst und auch in dieser Ausarbeitung verwendet. Der Sensorkopf kann aufgrund seines kompakten Aufbaus, im Gegensatz zum Kanalrad, ohne zu verstopfen in Praxisfermentern eingesetzt werden (OTT Hydromet GmbH 2016). Erste Untersuchungen über die Eignung des Strömungsmessers in einem Praxisfermenter zeigten, dass dieses Messverfahren für die Strömungsmessung sowohl in einem Fermenter mit Vorzerkleinerung als auch einem ohne Vorbehandlung des Substrates erfolgreich eingesetzt werden kann. Es können horizontale Strömungsgeschwindigkeiten sowie die ungefähre Strömungsrichtung ermittelt werden. Die Versuche in einem dreiwöchigen Zeitraum wurden in einem Fermenter ohne Vorbehandlung des Substrates durchgeführt. Der Fermenter war mit einem Langachs- bzw. Schrägachsrührwerk (Typ Biobull BIOE 114 G [11 kW], Streisal GmbH, Deutschland) und einem Tauchmotorrührwerk (Typ 4670 [13 kW], ITT Flygt, Deutschland) ausgestattet. Die höchsten Geschwindigkeiten wurden nahe der Oberfläche gemessen.

Dabei konnten bei einem durchschnittlichen TS-Gehalt von 10,4 % keine Strömungsgeschwindigkeiten über 6,0 cm/s gemessen werden. Als möglicher Grund für diese niedrigen Geschwindigkeiten wurde das nicht aufbereitete und deshalb sehr viskose Substrat genannt. Um zu prüfen, ob bei niedrigen TS-Gehalten und dünnflüssigen Substraten höhere Geschwindigkeiten gemessen werden können, wurden Versuche in einem Fermenter, welcher geleert und im Anschluss mit sehr dünnflüssigem Material befüllt wurde, durchgeführt. In diesem Fermenter war ein TMR (Typ 4670 [13 kW], ITT Flygt AB, Schweden) und ein LAR (Typ Biogator HPR 1 [15 kW], REMA GmbH, Deutschland) eingebaut. Messungen an einer Stelle im Fermenter zeigten durchschnittliche Geschwindigkeiten von 2 cm/s bis 16 cm/s für das TMR, 10-48 cm/s bei dem LAR und 30-65 cm/s bei einem kombinierten Betrieb von TMR und LAR (Debera 2016).

In der Ausarbeitung von Kolb (2016) wurde mit demselben Messgerät erstmalig ein Strömungsprofil in Abhängigkeit der Viskosität an einem Praxisfermenter an der Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“ erstellt. Der Fermenter wurde davor gereinigt, neu befüllt und wieder angefahren. Dabei wurden über einen Versuchszeitraum von sechs Wochen Strömungsgeschwindigkeiten in Fermenter 1 mit zwei Rührwerken, einem Tauchmotorrührwerk (Typ 4670 [13 kW], ITT Flygt AB, Schweden) und einem Langachs-rührwerk (Typ Biogator HPR 1 [15 kW], REMA GmbH, Deutschland), gemessen. Das Substrat wurde bei diesem Versuch mit einem Querstromzerspaner (QZ) (Typ Bio-QZ, ANDRITZ MeWa GmbH, Deutschland) vorzerkleinert, um einen homogenen Fermenterinhalt zu schaffen. Mit dem Messgerät von Ott Hydromet GmbH konnten erfolgreich die Strömungen in unterschiedlichen Bereichen und Höhen im Fermenter aufgezeichnet werden. Dafür standen sechs Messschleusen mit den Bezeichnungen 1.1, 1.3, 2.2, 2.4, 3.1 und 3.3 zur Verfügung. Zwischen der ersten Woche mit einem TS-Gehalt von 7,74 % zur sechsten Woche mit einem TS-Gehalt von 10,75 % ist ein deutlicher Rückgang der Strömungsgeschwindigkeiten zu erkennen (Abbildung 4). Die Viskosität stieg in diesem Zeitraum von 1,4 Pas in der zweiten Woche auf 2,3 Pas in der sechsten Woche. In der ersten Woche konnte keine Messung der Viskosität durchgeführt werden, da das Substrat zu dünnflüssig für die verwendete Viskositätsmessstrecke war. Dadurch konnte eine Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeiten von den TS-Gehalten sowie der Viskosität bewiesen werden. Anfangs konnten noch Geschwindigkeiten zwischen 8,75 cm/s und 63,77 cm/s gemessen werden, wohingegen in der sechsten Woche nur noch Geschwindigkeiten zwischen 0,05 cm/s und 37,36 cm/s gemessen wurden. In der ersten Woche zeigten sich an allen Messstellen große Geschwindigkeitsdifferenzen über die gesamte Höhe, in der sechsten Woche dagegen wurden nur geringe Schwankungen in den unterschiedlichen Höhen festgestellt. Dies verdeutlichte,

dass bei niedrigen TS-Gehalten die Geschwindigkeiten stärker von der Position der Rührwerke, der Höhe sowie dem Strömungsradius abhängen als bei höheren TS-Gehalten. Die Versuche von Kolb (2016) zeigten zudem, dass in den mittleren Radien und Schichten die höchsten Geschwindigkeiten erreicht werden, welche in Richtung Betonpfeiler, Wand oder Boden stark abnehmen (Kolb 2016). Verglichen mit den ersten Versuchen von Debera (2016) an einem Fermenter ohne Vorbehandlung des Substrates, waren die Geschwindigkeiten bei Kolb (2016) deutlich höher. Bei TS-Gehalten zwischen 10,16 % und 10,91 %, die mit dem TS-Gehalt von 10,75 % bei Kolb (2016) vergleichbar sind, konnten nur durchschnittliche Geschwindigkeiten unter 6,0 cm/s ermittelt werden. Diese sind, verglichen mit den Geschwindigkeiten von bis zu 37,4 cm/s bei Kolb (2016) in der sechsten Woche, um 84 % geringer. Dies lässt vermuten, dass eine Vorzerkleinerung des Substrates einen großen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeiten hat. Somit wurden auch in den Versuchen für diese Ausarbeitung mit dem bionischen Rührwerk deutlich niedrigere Geschwindigkeiten als bei Kolb (2016) erwartet.

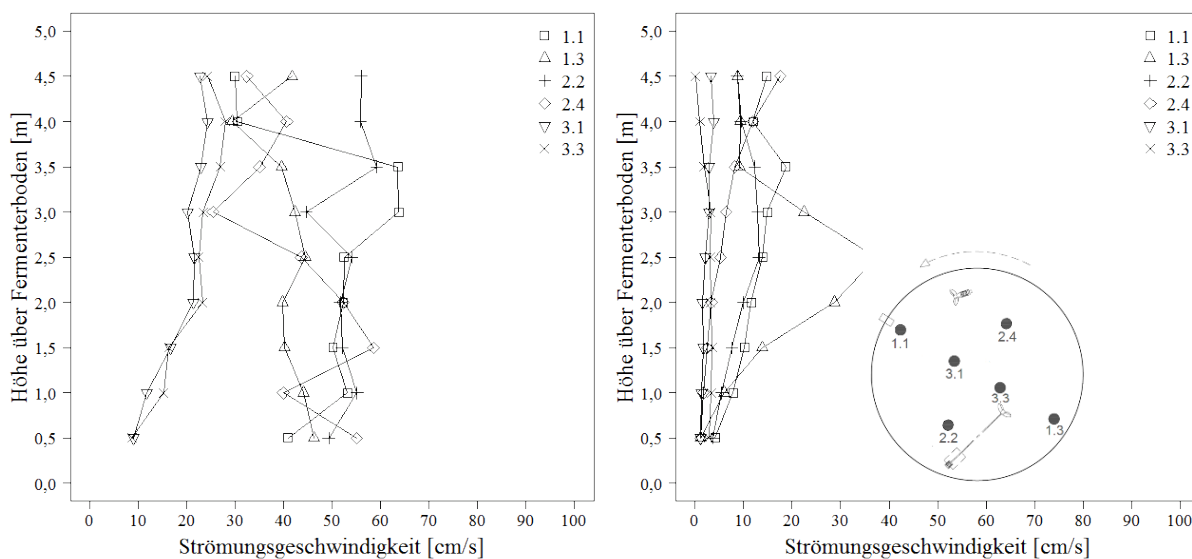


Abbildung 3: Strömungsgeschwindigkeiten in der ersten Messwoche (links) und sechsten Messwoche (rechts) (Kolb 2016)

Zudem wurden bei der Ausarbeitung von Kolb (2016) die Abklingzeiten nach einem Rührintervall bis zum Stillstand im Fermenter sowie die Anfahrzeiten von einem ruhenden zu einem voll beschleunigten Fermenterinhalt untersucht. Dabei verkürzten sich die Abklingzeiten während des Versuchszeitraums von 360 s bis 1.490 s um bis zu 95 % auf 60 s bis 80 s (Tabelle 1). Interessant ist, dass bei niedrigen TS-Gehalten die Zeiten bis zum Stillstand in den mittleren

Höhen (2,5 m) von 1.260 s (Position 1.1), 1.490 s (Position 2.2) und 930 s (Position 3.3) deutlich von den oberen und unteren Höhen abweichen. Es fiel auf, dass sich die Abklingzeiten über den Versuchszeitraum bei steigenden TS-Gehalten einander angleichen (Kolb 2016).

Tabelle 1: Abklingzeiten über den Versuchszeitraum (Kolb 2016)

Position	Woche 1 [s]	Woche 2 [s]	Woche 3 [s]	Woche 4 [s]	Woche 5 [s]	Woche 6 [s]
1.1 - 4,5m	690	520	320	140	100	70
1.1 - 2,5m	1.260	900	350	130	110	70
1.1 - 0,5m	740	660	310	110	110	60
2.2 - 4,5m	530	520	420	150	120	80
2.2 - 2,5m	1.490	1.170	430	150	120	70
2.2 - 0,5m	1.090	720	370	150	110	70
3.3 - 4,5m	630	530	290	120	100	NA
3.3 - 2,5m	930	1.040	430	130	90	60
3.3 - 0,5m	360	370	210	60	100	60
StABW	348,94	252,09	57,86	16,18	10,69	7,53

Die längste Abklingzeit wurde an der Schleuse 2.2 auf der Höhe von 2,5 m festgestellt (Abbildung 4). An dieser Stelle wurde selbst nach 1.500 s kein kompletter Stillstand erreicht. Im direkten Vergleich haben sich die Zeiten an Position 2.2 zwischen Woche 1 und Woche 6 um 95 % verringert. Hier ist deutlich zu erkennen, wie sich die Form der Kurve von einer Hyperbel zu einer nahezu linearen Form ändert (Kolb 2016). Die Ermittlung der Abklingzeiten ist besonders in Bezug auf die Beurteilung von Rührwerken ein geeigneter Indikator. Besonders beim Rühren im Intervallbetrieb ist es interessant zu wissen, wie lange sich das Biogassubstrat nach einem Rührintervall noch in Bewegung befindet. Auch die Anfahrzeiten können in die Beurteilung eines Rührwerkes, besonders bei intervallbetriebenen, miteinfließen, da geringe Zeiten bis zur maximalen Beschleunigung des Substrates für ein Rührwerk sprechen. Bei der Bestimmung der Anfahrzeiten ist es nach Kolb (2016) allerdings schwierig, einen Endpunkt der Messung zu finden, da dieser nicht ersichtlich ist.

Eine Untersuchung in diesem Umfang, wie sie in der Arbeit von Kolb (2016) durchgeführt wurde, ist derzeit einzigartig für einen Praxisfermenter, weshalb in diesem Bereich noch ein enormer Forschungsbedarf besteht.

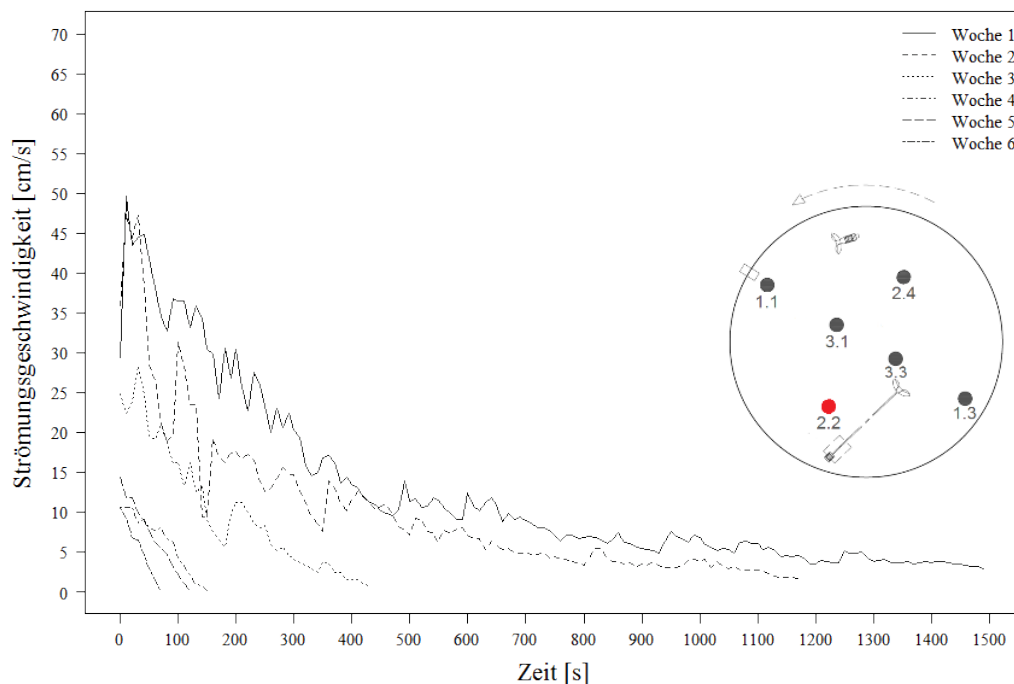


Abbildung 4: Abklingzeiten an der Schleuse 2.2 auf der Höhe von 2,5 m (Kolb 2016)

2.3 Nährstoffverteilung

Die Nährstoffverteilung beschreibt die Verteilung der für den Biogasprozess wichtigen Parameter. Ein Indikator für eine homogene Nährstoffverteilung stellt ein konstanter TS beziehungsweise oTS Gehalt innerhalb des gesamten Nutzvolumens des Fermenters dar. Hier konnte bei regulärem Betrieb mit einem Langachspropellerrührwerk, einem Tauchmotorrührwerk sowie einer Kombination aus beiden keine signifikanten Unterschiede in der Trockensubstanzverteilung nachgewiesen werden (Lemmer et al., 2013). Eine weitere Studie von Ruile, 2015, in der unter anderem mit verkürzten Rührzeiten gearbeitet wurde zeigt, dass weder ein gleichmäßiger TS Gehalt noch oTS Gehalt erreicht werden konnte. Zwar wurden in der vertikalen Verteilung keine statistisch signifikanten Unterschiede gefunden, aber in der horizontalen. Substratproben, die in Strömungsrichtung des Rührwerks nahe des Eintrags gezogen wurden, wiesen einen TS Gehalt von durchschnittlich 14,1 % auf. Wohingegen Proben in der Mitte des Fermenters bei einem Trockensubstanzanteil zwischen 13,7 % und knappen 14 % lagen. Diese geringen Unterschiede könnten durch Messfehler bedingt sein, deuten aber auf höhere Trockenmassekonzentration durch suboptimales Rühren im Bereich des Eintrags hin.

Bei der Essigsäurebildung, einer Vorstufe des Biogasprozesses, sind die Konzentrationsunterschiede noch gravierender. Versuche an Praxisfermentern belegen, dass die Essigsäureverteilung um mehr als 30 % schwankt (Ruile, 2015; Sondermann, 2011). Die höchsten Gehalte wurden bei Sondermann, 2011 mit 0,7243 g/kg angegeben, gemessen an einer Position nahe des Eintrags. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam Ruile, 2015, der an dieser Stelle durchschnittliche Essigsäuregehalte von 0,770 g/kg nachweisen konnte. Alle Werte liegen jedoch unter der für den Biogasprozess als kritisch angesehenen Grenze von 1,0 g/kg (Kaltschmitt et al., 2009). Niedrigere Essigsäurekonzentration waren an Probenstellen in der Mitte des Fermenters zu finden. Während Ruile, 2015 in der vertikalen Verteilung keine statistischen Unterschiede nachweisen konnte, zeigen die Ergebnisse von Sondermann, 2011 auch hier durchschnittlich bis zu 19 % Abweichung.

Ein weiterer Parameter, der mit der Essigsäureverteilung korreliert, ist die Pufferkapazität. Damit wird das Verhältnis von freien organischen Säuren zur Karbonatpufferkapazität beschrieben (Kaltschmitt et al., 2013). Der Karbonatpuffer sorgt zusammen mit dem Ammoniakpuffer für eine stabile Fermentation. Durch ihn können steigende Säurekonzentrationen, die beispielsweise durch eine Überfütterung hervorgerufen wurden, abgepuffert werden. Dadurch werden die Bakterien vor einem für sie kritischen Abfallen des pH-Wertes geschützt (Görisch; Helm, 2014). Auch hier werden im Vergleich zu andern Probenstellen in der Nähe des Eintrags erhöhte Werte von 0,28 gemessen. Während diese an den anderen Messstellen zwischen 0,25 und 0,26 liegen (Riehle, 2015).

Da die Pufferkapazität zur Stabilisierung des pH-Wertes dient, sollte sie immer in Verbindung mit diesem betrachtet werden. Fällt der pH-Wert zu stark ab, kann es zum kompletten Erliegen der anaeroben Vergärung kommen. Bei der einphasigen Vergärung, wie sie in einem Großteil der Biogasanlagen vorzufinden ist, liegt der Optimalbereich zwischen 7 und 7,5 (Kaltschmitt et al., 2013). Die Studie von Ruile, 2015 zeigt einen gleichmäßigen pH-Wert im Nutzvolumen des Fermenters.

Die für die Bakterien lebenswichtigen Grundnährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium sind dieser Studie zufolge ebenfalls gleichmäßig verteilt. Allerdings konnte hier nur eine Wiederholung realisiert werden. Daher haben diese Ergebnisse keine statistische Aussagekraft. Da die Wissenschaft bisher nur wenig Aufschluss über die Nährstoffverteilung beim Einsatz unterschiedlicher Rührwerke, Rührwerkseinstellungen und Inputsubstrate liefert, besteht hier noch ein hoher Forschungsbedarf.

2.4 Rheologie

Alle Rühr-, Pump- und Transportvorgänge von Gärsubstrat sind stark von dessen Viskosität abhängig (Kolb, 2016). Studien charakterisieren dieses als nicht-newtonsches, strukturviskoses Fluid (Kolb, 2016; Mönch-Tegender et al., 2015). Das heißt, mit zunehmender Fließgeschwindigkeit, beziehungsweise, Scherrate nimmt die Viskosität ab. Wie bei Biogassubstrat üblich wird die dynamische Viskosität bestimmt, welche im Folgenden als Viskosität bezeichnet wird. Diese kann nicht direkt gemessen werden, sondern leitet sich aus dem Verhältnis der Schubspannung (Pa) zur Scherrate (1/s) ab und wird daher in Pascalsekunden (Pas) angegeben. Zur Erhebung dieser Parameter bei Gärsubstrat werden in der Praxis häufig Rohrviskosimeter eingesetzt. Abhängig ist die Viskosität von mehreren Faktoren, wobei deren Einfluss und Zusammenhänge noch nicht endgültig geklärt sind. Mit steigendem Trockenmassegehalt nimmt die Viskosität zu (**Abbildung 5**).

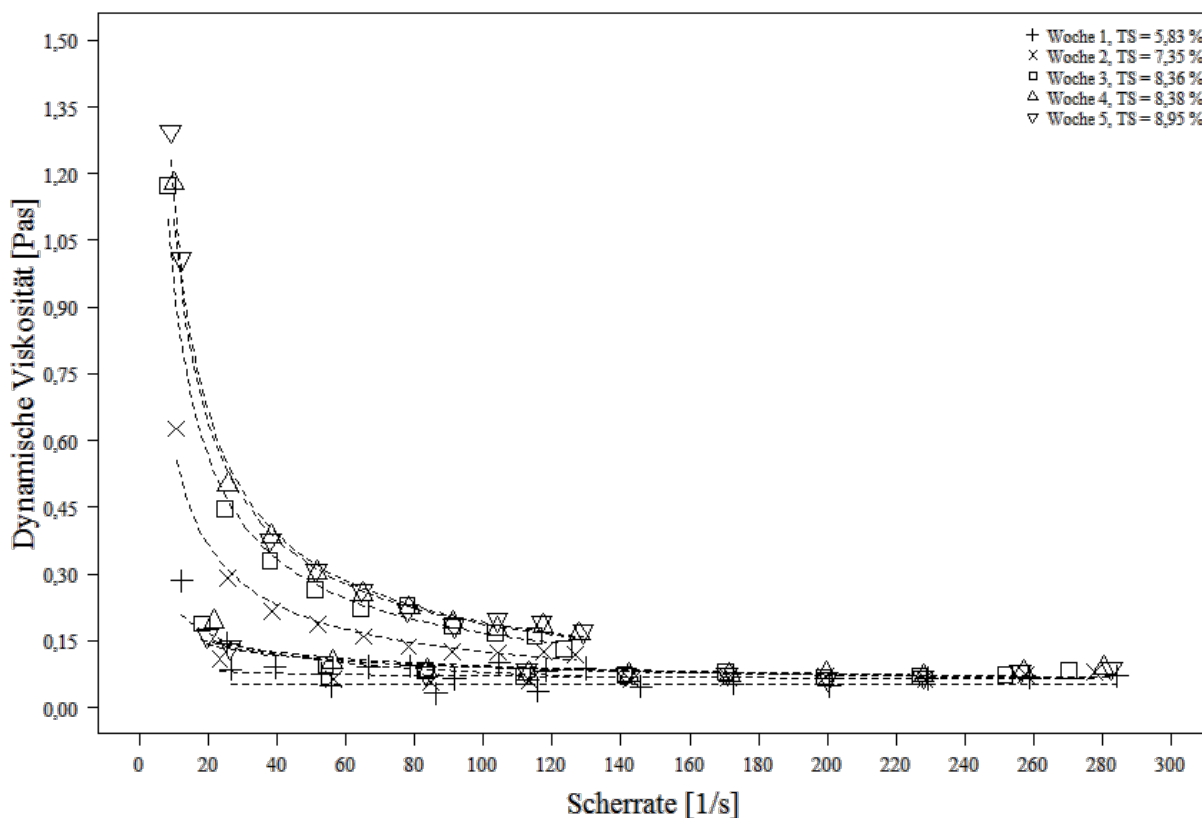


Abbildung 5: Dynamische Viskosität bei unterschiedlichem TS-Gehalt ohne QZ

Bei Versuchen mit Vorzerkleinerung durch einen QZ stieg die Viskosität von 2,5 Pas auf 12 Pas bei einer Scherrate von 5/s und einem Anstieg des TS-Gehaltes von 10,1 % auf 15,1 %

(Mönch-Tegender et al., 2015). Aufgrund des strukturviskosen Verhaltens von Biogassubstrat ist dieser Effekt vor allem bei kleinen Scherraten zu erkennen. Diese scherverdünnende Wirkung kann speziell bei schnell laufenden Rührwerken dazu führen, dass ausschließlich bereits vom Rührwerk vorverdünntes Substrat angesogen wird. Dadurch bricht die Globalströmung zusammen, es kommt zur Kavernenbildung. In dem zuvor genannten Versuch konnte dieses Phänomen bei einem TS-Gehalt von 13 % und einer Viskosität von 5 Pas bei einer Scherrate von 5/s ansatzweise beobachtet werden. Um die Prozessstabilität bei weiter steigendem TS-Gehalt gewährleisten zu können, musste zu einem kontinuierlichem Rührvorgang übergegangen werden (Mönch-Tegender et al., 2015). Auch in Abbildung 5 ist die Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt zu erkennen. Die Verkürzung der Faserlänge durch die Vorzerkleinerung scheint speziell bei höheren TS- Gehalten stärker zum Tragen zu kommen. Die Auswirkung der Vorzerkleinerung auf die Viskosität nimmt mit steigender Scherrate zu (Mönch-Tegender et al., 2015).

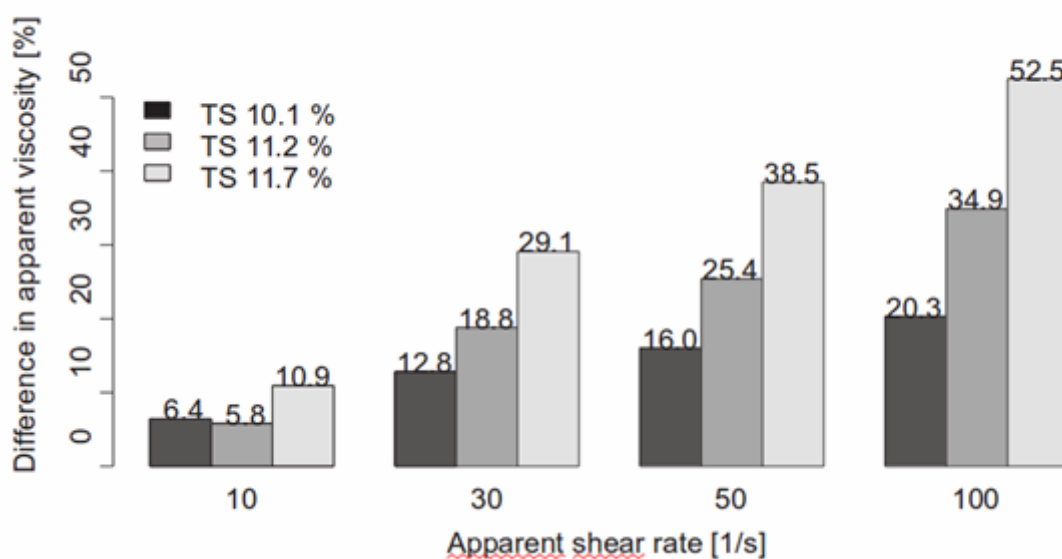


Abbildung 6: Prozentualer Viskositätsunterschied mit und ohne Vorzerkleinerung bei steigendem TS-Gehalt (Mönch-Tegender et al., 2015)

In einer anderen Studie mit Vorzerkleinerung war das Gärsubstrat erst bei einem TS-Gehalt von 7,85 % dickflüssig genug, um Messdaten zu erheben (Kolb, 2016). Das zeigt den Einfluss der Faserlängen des Substrats auf das Fließverhalten. Die Korrelation zwischen den physikalischen Eigenschaften des Inputsubstrates und der Viskosität wurde bei Untersuchungen

mit wechselnden Substratanteilen bei der Fütterung ebenfalls deutlich (Mönch-Tegender et al., 2015). Versuche an Praxisanlagen, bei denen mit einem mobilen Rohrviskosimeter gearbeitet wurde, kamen zu ähnlichen Ergebnissen (Tabelle 2). Der TS- Gehalt der Fermenter von Anlage 2. und 3. lag bei 10 %. Trotzdem lag die maximale Viskosität der Anlage 3., die nur mit Mais beschickt wird, um 26 % höher. Für Anlage 1., bei der der Gülleanteil am größten ist, wurde die geringste Viskosität im Fermenter gemessen, was auf eine Korrelation mit dem Gülleanteil der Futtermischung schließen lässt. Vergleicht man die Messungen an Fermenter und Nachgärer, ist diese im Nachgärer stets niedriger. Das könnte wiederum auf den Zusammenhang mit dem TS- Gehalt zurückgeführt werden, der im Nachgärer ebenfalls niedriger ist. Die bessere Zersetzung des Substrats und der geringere Anteil an Gasbläschen sind weitere mögliche Ursachen. Denn nach Austritt des Biogases hat sich in einem Versuch mit einem Rotationviskosimeter die Viskosität um etwa 16 % erhöht (Montgomery et al., 2016).

Tabelle 2: Vergleich dynamische Viskosität

Studie	max. Viskosität	Scher-rate:		TS- Gehalt	Fütterung (% FM)			
		10 1/s	50 1/s		Rüben/ Mais /Getreide	Gras / GPS	Mist	Gülle
Koll (2012) Anlage 1 FM	14	2,5	1,3	8,5	46,3	-	7,4	46,3
Anlage 1 NG	6,7	1,3	0,4	8				
Anlage 2 FM	17	2	0,6	10	47,2	2,8	16,7	33,3
Anlage 2 NG	8,2	2	0,5	9				
Anlage 3 FM	23,5	3,5	1,8	10	100	-	-	-
Anlage 3 NG	9,5	2,2	1,2	9				
Anlage 4 FM	23	4,7	2,1	10,5	62,8	3	34,2	-
Anlage 4 NG	13	2,1	0,6	9,5				
Anlage 5 FM	32	4,7	1,9	10,5	96,6	-	0,4	-
Anlage 5 NG	20,5	3	1,8	9,5				
Mönch-Tegender (2015) QZ								
1. Woche	4,5	2,61	0,74	10,1	23	15	32	30
4. Woche	3	1,78	0,53	11,7	25	7	36	32
8. Woche	3,2	1,8	0,64	15,1	17	23	37	23
Kolb (2016) QZ 2. Woche (Dünngülle)	-	-	0,1	7,85	-	-	-	100
4. Woche	1,6	1,5	0,5	9,45	3	46	51	-
6. Woche	2,3	1,8	0,65	10,75	3	46	51	-

3 MATERIAL UND METHODEN

Die Versuche dieser Arbeit zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit sowie der Viskosität wurden an der Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“ durchgeführt. Diese Anlage wurde im Jahr 2008 an der Versuchsstation für Nutztierhaltung und Tierzucht der Universität Hohenheim in Eningen u.A. bei Reutlingen gebaut, um die Untersuchungen in den Laboranlagen im Institut für Agrartechnik in Hohenheim mit Praxisuntersuchungen vergleichen und ergänzen zu können (**Abbildung 7**). Diese Anlage setzt sich aus zwei baugleichen Fermentern mit Betondecken und einem Nachgärer mit Tragluftdach als Biogasspeicher zusammen. Die sechs Meter hohen Behälter haben jeweils einen Durchmesser von 14 m und ein Bruttovolumen von 923 m³ (Lemmer et al. 2008).



Abbildung 7: Luftansicht der Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“ (Bild: Nägele 2013)

Die Messungen für diese Ausarbeitung wurden am Fermenter 2 durchgeführt. Dieser ist im Standardbetrieb mit einem Langachs- bzw. Schrägachsrührwerk (Typ Biobull BIOE 114 G [11 kW], Streisal GmbH, Deutschland) und einem Tauchmotorrührwerk (Typ 4670 [13 kW], ITT Flygt, Deutschland) ausgestattet (Lemmer et al. 2008). Das LAR ist am Fermenterboden und an der Fermenterdecke befestigt und im Gegensatz zum TMR nicht in der Höhe verstellbar und um 360° drehbar (**Abbildung 8**). Am 24.08.2016 wurde ein bionisches Rührwerk zu Test- bzw. Versuchszwecken eingebaut. Das Langachsrührwerk wurde während des Versuchszeitraums abgeschaltet, blieb jedoch im Fermenter verbaut.



Abbildung 8: Langachsührwerk (links) und Tauchmotorührwerk (rechts) im Fermenter an der Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“

Das bionische Rührwerk ist ein völlig neu entwickeltes System zur Durchmischung von Biogasfermentern. Die Firma Wusoa GmbH nahm die hohen Eigenstromkosten als Anlass für die Entwicklung eines effizienten Rührwerkes. Dieses mechanische Rührwerk imitiert das Strömungs- und Verdrängungsverhalten, wie es bei Enten beobachtet werden kann. Diese Art des Rührens bietet, laut Hersteller, viele Vorteile. Mit schubartigen, horizontalen Strömungsimpulsen und durch räumliches Verschieben des Biogassubstrates soll eine Durchmischung in alle Richtungen erzeugt werden. Dadurch ist das Rührwerk auch im Stande, hochviskose Substrate zu durchmischen und erreicht große Volumenbewegungen mit geringem Energieeinsatz. Im Vergleich zu konventionellen Rührreinrichtungen soll nach Angaben des Herstellers mit bionischen Rührwerken der Biogasertrag um 30 % gesteigert und gleichzeitig der Energieverbrauch um 60 % verringert werden (Wusoa GmbH 2016a). Das bionische Rührwerk besteht aus zwei sich selbst drehenden Paddelblättern, die im Winkel von 90° zueinander angebracht sind (**Abbildung 9**). Diese Paddel sind an einer um sich selbst drehenden Antriebsachse, in einem Winkel zwischen 20° und 40° zu dieser, befestigt (Wusoa GmbH 2015).

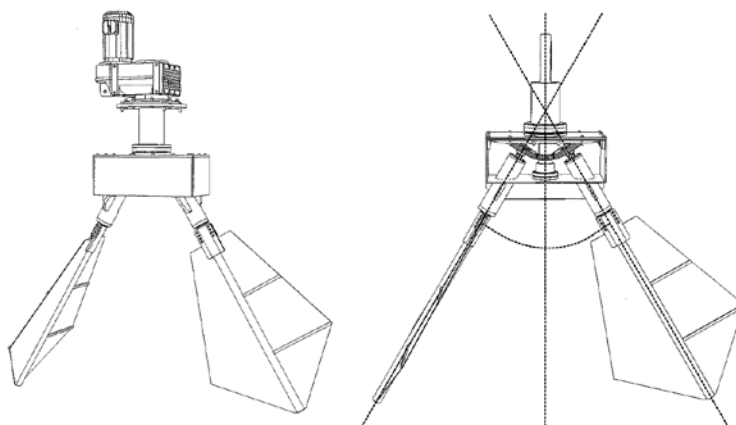


Abbildung 9: Zeichnerische Darstellung des bionischen Rührwerkes (Wusoa GmbH 2015)

Das bionische Rührwerk ist bereits im Labormaßstab mittels Prozess-Tomographie am Fraunhofer IKTS in Dresden untersucht worden. (Fraunhofer IKTS Dresden 2016). Erfahrungswerte an Praxisanlagen sind derzeit noch nicht vorhanden. Aus diesem Grund wurde das neu entwickelte Rührwerk in die Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“ eingebaut (**Abbildung 10**). Für den Einbau stand ein Schacht auf der Fermenterdecke zur Verfügung. Dafür musste ein Anschlusskasten konstruiert werden, der zusammen mit dem Rührwerk in den Fermenter eingebaut werden konnte (**Abbildung 11**).

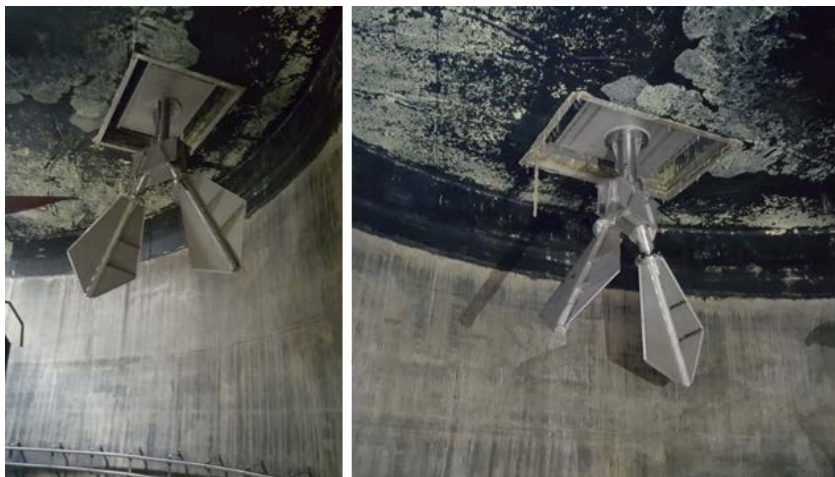


Abbildung 10: Bionisches Rührwerk im Biogasfermenter an der Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“

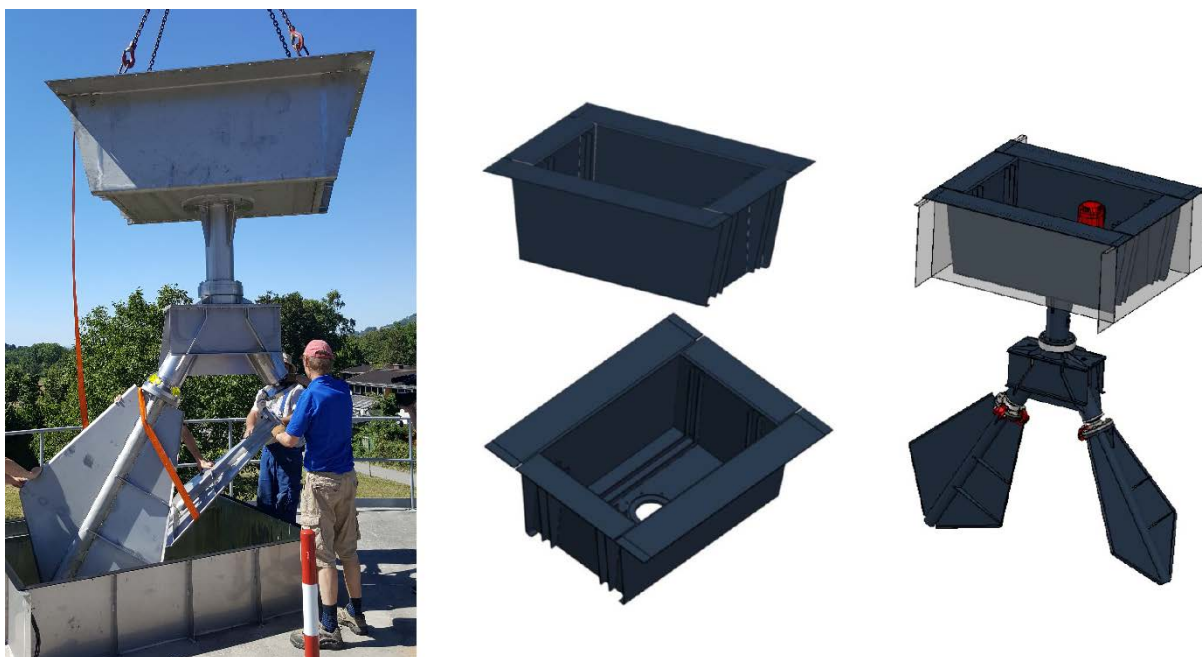


Abbildung 11: Einbau des bionischen Rührwerkes mit Anschlusskasten (rechts) in den vorhandenen Einbauschacht (links) an der Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“ (Wusoa GmbH 2016b)

Vor Beginn des ersten Versuchszeitraumes wurde anlässlich einer Routinewartung der Fermenter geleert und gereinigt. Nach dem Einbau des neuen Rührwerkes wurde der Fermenter mit separiertem Gärrest aus dem Nachgärer befüllt, um die Messungen mit einem niedrigen TS-Gehalt zu beginnen und den Fermenter im Anschluss auf Last zu fahren. Feststoffe werden dem Fermenter über einen stationären Vertikalmischer (Typ Eco-Line VM 20, AP Agritechnic Pflengle GmbH, Deutschland) zugeführt, der das Einsatzstoffgemisch über ein Schneckensystem (Typ R 350, AP Agritechnic Pflengle GmbH, Deutschland) mit einem Schneckendurchmesser von 350 mm unten in den Fermenter einbringt. Die Futterzuführung erfolgt im Standardbetrieb alle zwei Stunden. Diese wurde während den Messungen ausgesetzt und zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt. Über eine Waage werden die genauen Fütterungsmengen ermittelt und an die zentrale Anlagensteuerung übertragen. Zudem stehen Messgeräte wie ein Gasdurchflussmesser (Typ GD 100/50/3, Esters Elektrotechnik GmbH, Deutschland) für die Ermittlung der Gasmenge, ein Biogas Analysator (Typ InCa 4000, Union Instruments GmbH, Deutschland) für die Bestimmung der Gasqualität, ein Gastemperatursensor (Typ Pt 100) sowie ein Druckmessumformer (Typ VEGABAR 53, VEGA Grieshaber KG, Deutschland) für die Messung des Gasdruckes zur Verfügung. Auch Messdaten der Füllstandsmessung (Typ VEGAWELL 51, VEGA Grieshaber KG, Deutschland), die Gärsubstrattemperatur, die mit Hilfe eines Temperaturfühlers (Pt 100, Klasse B) gemessen wird, sowie die Fütterungszeiten oder die Stromproduktion des Blockheizkraftwerks (Typ MB 3042 L9, MTU Onsite Energy GmbH, Deutschland) werden an die Anlagensteuerung übermittelt (Lemmer et al. 2008).

Als Zugang für Messinstrumente oder zur Probenentnahme stehen auf der Betondecke des Fermenters elf in den Fermenter eingelassene Öffnungen zur Verfügung, welche von 1.1 bis 3.4 durchnummeriert sind (**Abbildung 12**). In den Versuchen dieser Ausarbeitung wurden sechs Öffnungen, mit den Bezeichnungen 1.1, 1.3, 2.2, 2.4, 3.1 und 3.3, verwendet. Diese sind alle mit gasdichten Schleusen ausgestattet (Lemmer et al. 2008).

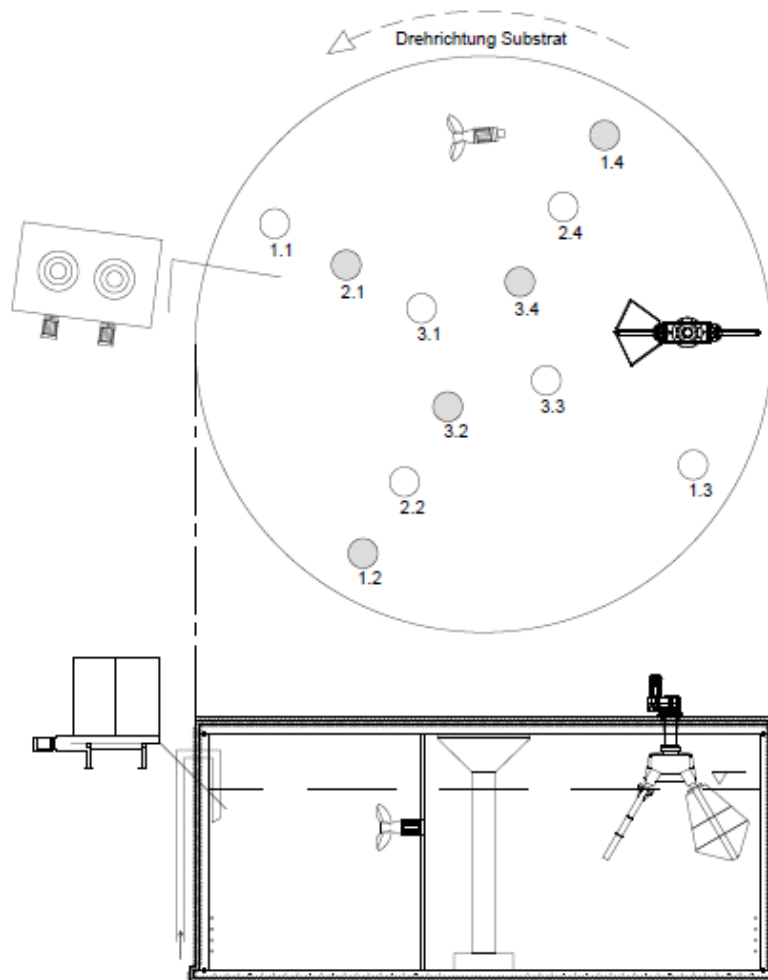


Abbildung 12: Schleusenordnung und Schnittzeichnung von Fermenter 2 (Kress 2016)

3.1 Versuchsaufbau Strömungsmessung

Um das Messinstrument in den Fermenter einführen zu können, wurde eine Vorrichtung entwickelt, die gasdicht auf die Schleusen verschraubt werden kann und zudem mit einer Höhenverstellung ausgestattet ist, um in allen Höhen und Richtungen im Fermenter messen zu können (**Abbildung 13**). Dieses Messgerät war schon Grundlage für die Messungen von vorigen Studien (Debera 2016, Kolb 2016). Im Folgenden werden das Messgerät, die Messvorrichtung sowie die Versuchsdurchführung genauer erläutert.

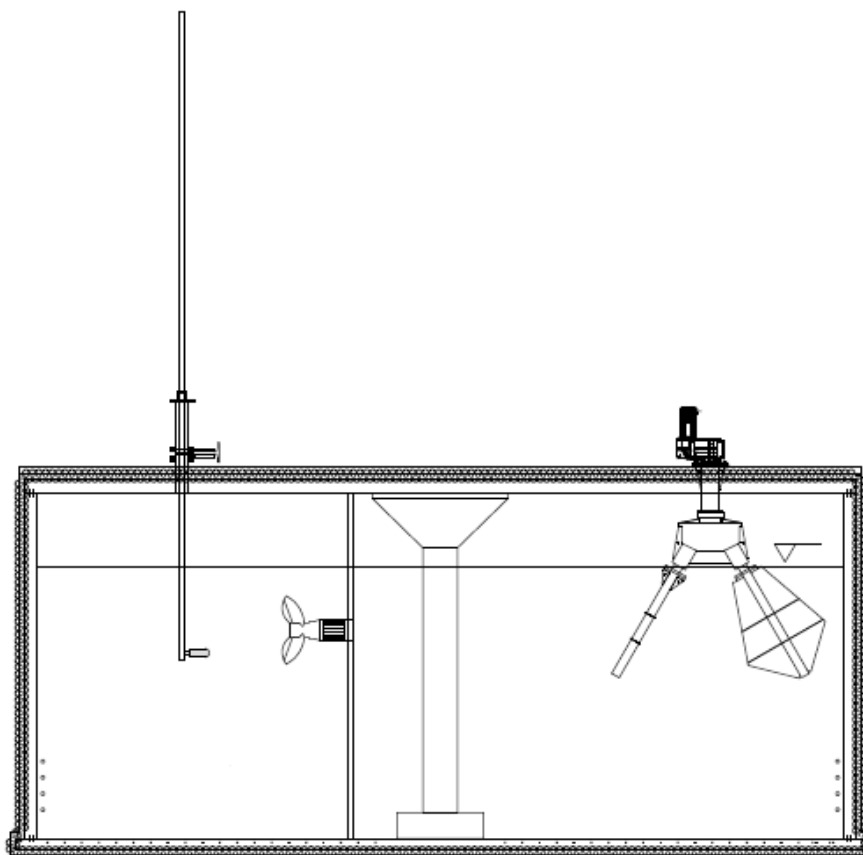


Abbildung 13: Schnittzeichnung von Fermenter 2 mit Rührwerksposition und eingetauchter Messvorrichtung (Kress 2016)

3.1.1 Messgerät

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit wird in dieser Arbeit das magnetisch-induktive Strömungsmessgerät (Typ OTT MF pro, OTT Hydromet GmbH, Deutschland) verwendet. Dieses System beinhaltet eine Strömungssonde, ein Kabel und ein robustes, akkubetriebenes Mess- bzw. Bediengerät (**Abbildung 14**). Dieses Messverfahren wurde primär für die Geschwindigkeitsmessung in Gewässern, Kanälen oder Messrinnen entwickelt. Für eine Messung der Strömungen in einem Biogasfermenter wurde dieses Messverfahren angepasst. Untersuchungen von Debera (2016) zeigten, dass dieses Messsystem für die Anwendung in einem Biogasfermenter geeignet ist und funktioniert. Das Messprinzip beruht auf der elektromagnetischen Induktion. Durch vorbeifließende Flüssigkeiten wird im Sensor eine elektrische Spannung induziert, die proportional zur Strömungsgeschwindigkeit ist. So können Geschwindigkeiten von 0 m/s bis 6 m/s bei Temperaturen bis zu 60 °C ermittelt werden. Das Messgerät besitzt eine Genauigkeit von $\pm 2\%$ des gemessenen Wertes $\pm 0,015$ m/s im Messbereich von 0 m/s bis 3 m/s, welcher für diesen Versuch relevanten ist. Um eine korrekte Strömungsgeschwindigkeit

messen zu können, ist es wichtig, den Sensorkopf vor der Messung gegen die Strömung zu richten (OTT Hydromet GmbH 2016).



Abbildung 14: Strömungssonde (links) und das Mess- bzw. Bediengerät (rechts) (OTT Hydromet GmbH 2016)

3.1.2 Messvorrichtung

Die Messvorrichtung (**Abbildung 14**) ist aus einem Rohr, das auf die Schleuse geschraubt werden kann, aus einer Stangenführung und aus drei Stangen, an denen die Strömungssonde montiert ist, aufgebaut. Diese drei Hohlstangen sind jeweils drei Meter lang und können miteinander verschraubt werden, wodurch eine Stangenlänge von neun Metern erreicht wird. Dies ist für eine Strömungsuntersuchung in allen Höhen im Fermenter ausreichend. Dadurch ist ein einfaches Versetzen der Messvorrichtung von Hand auf dem Fermenter zwischen den Messschleusen möglich. Das Kabel von der Strömungssonde zum Messgerät befindet sich in der Hohlstange und ist somit vor äußeren Einwirkungen geschützt (Debera 2016).

3.1.3 Versuchsdurchführung

Um die Strömungen im Fermenter bei konstanten Bedingungen zu messen, wurde während den Messungen kontinuierlich mit dem bionischen Rührwerk gerührt und im Gegensatz zum Standardbetrieb, nicht im Intervall für 30 Minuten zu jeder vollen Stunde. Im Standardbetrieb wurden zusätzlich das TMR in Intervallen zugeschaltet, um der Bildung von Schwimmschichten, welche während der Anfahrphase verstärkt gebildet wurden, vorzubeugen. Während den Messungen wurde dieses Rührwerk abgeschaltet. Notwendige Pump- und Fütterungsvorgänge wurden während der Messphase nicht durchgeführt und im Anschluss an die Messungen nachgeholt. Vor Beginn der Strömungsmessungen wurde das Substrat bei vorhandener Schwimmschicht nochmals mit dem TMR aufgerührt, um das Gärsubstrat zu homogenisieren.

Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden an sechs Messschleusen in neun unterschiedlichen Höhen gemessen. Wie auch schon bei vorherigen Untersuchungen mit diesem Messsystem (Kolb 2016), wurden an der Messstange Markierungen in 0,5 Meter Schritten für Messhöhen zwischen 0,5 m und 4,5 m über dem Boden angebracht. Gemessen wurde von der untersten Höhe (0,5 m) zur obersten Höhe (4,5 m). Ebenfalls durch Markierungen an der Stange und einer Schablone zur Winkelbestimmung konnte die Messsonde gegen die Strömungsrichtung ausgerichtet und somit durch einen Winkel die ungefähre Strömungsrichtung angegeben werden. Diese Schablone war in 30° Schritte unterteilt und wurde vor jeder Messung in Richtung Norden (0°) ausgerichtet. Ein Sensor, der über ein Kabel mit dem Messgerät verbunden ist, ermittelt alle 250 ms eine Geschwindigkeit. Aus diesen Werten wird die Durchschnittsgeschwindigkeit für ein eingestelltes Intervall berechnet und angezeigt (OTT Hydromet GmbH 2016). Für die Messungen der Strömungsgeschwindigkeit wurde für diesen Versuch in Anlehnung an Kolb (2016) ein Intervall von einer Sekunde ausgewählt, um Geschwindigkeitsschwankungen besser darzustellen. Dabei wurde an jeder Messstelle und Höhe ein vollständiger Datensatz mit 75 Messwerten aufgenommen. An den Messstellen 1.1, 2.2 sowie 3.3 wurden zusätzlich in den Höhen 0,5 m, 2,5 m und 4,5 m die Anfahr- und Abklingzeiten aufgezeichnet. Da das Messgerät nur drei Speicherplätze zur Verfügung hat und bei der Ermittlung die Zeiten und nicht die Geschwindigkeitsspitzen im Vordergrund standen, wurde für die Anfahr- und Abklingzeiten ein größeres Intervall verwendet. Für die Abklingzeit, d.h. die Zeitdauer nach dem Abschalten des Rührwerkes bis zum Stillstand der Strömungen im Fermenter, wurde ein Intervall von fünf Sekunden gewählt. Für die Anfahrzeit, d.h. die Zeitdauer vom Stillstand bis zur Strömungshöchstgeschwindigkeit, wurde ein Intervall von zwei Sekunden vorgegeben. In der ersten Messwoche wurde für die Anfahrzeiten bei den ersten Messungen ein Intervall von fünf Sekunden eingestellt. Aufgrund der schubartigen Bewegungen des Substrates, die von dem bionischen Rührwerk erzeugt werden, war der Mittelwert in einem Intervall von fünf Sekunden zu ungenau und wurde deshalb auf zwei Sekunden verringert. Wie in der Ausarbeitung von Kolb (2016) schon festgestellt wurde, ist es sinnvoll, die Messungen der Anfahr- und Abklingzeiten direkt nach der Geschwindigkeitsmessung durchzuführen. Dadurch konnte ein Richtwert für die Geschwindigkeit an dieser Messstelle und Höhe im Fermenter erhalten werden. Danach wurde das Rührwerk abgeschaltet und die Abklingzeit bis zum Stillstand gemessen, die nach Herstellerangaben des Messgeräts unter 1,5 cm/s liegt (OTT Hydromet GmbH 2016). Daraufhin konnte nach dem Anschalten des Rührwerkes die Anfahrzeit bis zum Erreichen der zuvor gemessenen Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden.

Es gab keine Empfehlungen zur optimalen Umdrehungszahl für dieses Rührwerk und speziell für diese Fermentergröße, da von dem neu entwickelten bionischen Rührwerk noch keine Erfahrungs- bzw. Vergleichswerte von anderen Biogasanlagen zur Verfügung standen. Vor der ersten Messung einigte man sich mit dem Hersteller (Wusoa GmbH 2016a) auf zwei unterschiedliche Motordrehzahlen für die Strömungsmessung. An jeder Messstelle wurden deshalb die Messungen zunächst für die Drehungszahl von 900 1/min und danach für 1.200 1/min durchgeführt. Eine Motordrehzahl von 900 1/min entspricht neun Umdrehungen pro Minute an der Antriebsachse des Rührwerkes. Dabei führt das Rührwerk 18 Paddelschläge aus. Dementsprechend sind dies zwölf Umdrehungen an der Antriebsachse und 24 Paddelschläge pro Minute bei einer Motordrehzahl von 1.200 1/min. In der letzten Messwoche wurden zum Vergleich jeweils die Strömungsgeschwindigkeiten nur für das TMR sowie für den kombinierten Betrieb von TMR und dem bionischen Rührwerk (1.200 1/min) untersucht. Das TMR wurde dabei auf eine Höhe zwischen 4 m und 4,5 m eingestellt. Die Reihenfolge der Messschleusen wurde im Vorfeld randomisiert (**Tabelle 3**).

Tabelle 3: Datum und Reihenfolge der Strömungsmessungen

Datum	Reihenfolge
14./15.09.2016	2.2 – 3.3 – 2.4 – 1.1 – 1.3 – 3.1
27./28.09.2016	3.1 – 2.4 – 2.2 – 1.3 – 1.1 – 3.3
04./05.10.2016	3.3 – 1.1 – 3.1 – 1.3 – 2.2 – 2.4
10./11.10.2016	2.4 – 1.3 – 3.3 – 1.1 – 3.1 – 2.2
18./19.10.2016	2.2 – 1.1 – 3.3 – 1.3 – 2.4 – 3.1

Zur Beurteilung des Energieverbrauches des Rührwerkes wurde dessen Verbrauch während den Messungen ermittelt. Hierfür wurde ein im Schaltschrank des Rührwerkes installierter Stromzähler (Typ MGKIZ065, Schrack Technik GmbH, Österreich) eingesetzt und der Energieverbrauch innerhalb einer Stunde für jeweils beide Motordrehzahlen abgelesen. Das bionische Rührwerk rührte währenddessen kontinuierlich.

3.2 Versuchsaufbau Nährstoffverteilung

Um Substratproben von unterschiedlichen Stellen in unterschiedlichen Höhen des Fermenters zu ziehen, wurde vom Biogaskontor Köberle in Zusammenarbeit mit der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie Hohenheim ein Probennehmer entwickelt (**Abbildung 15**).



Abbildung 15: links: Probennehmer auf Schleuse; rechts: entleeren der Substratprobe aus innerem Kunststoffrohr (Ruile, 2015)

Der Probennehmer besteht aus einem äußeren Edelstahlrohr, das unten mit einem Flansch gasdicht auf die Schleusen geschraubt werden kann. Durch das Edelstahlrohr wird von oben gasdicht ein Aluminiumrohr geführt. An diesem ist die eigentliche Probenkammer befestigt, die nach Öffnen des Gasschiebers auf beliebige Höhen in den Fermenter gelassen werden kann. Die Probenkammer besteht aus einem Kunststoffrohr, das oben und unten mit zwei durch Druckluft gesteuerten Gummiblasen verschlossen und geöffnet werden kann. Wenn so die Probenkammer auf der gewünschten Höhe gefüllt wird, kann sie an der Aluminiumstange nach oben gezogen und der Gasschieber wieder geschlossen werden. Das äußere Edelstahlrohr wird dann von der Probenöffnung abgeschraubt und der Inhalt der Probenkammer kann entleert werden. Der gesamte Probennehmer steht auf einem fahrbaren Gestell und wird so zu den unterschiedlichen Schleusen auf der Fermenterdecke geschoben. Eine detaillierte Beschreibung des Probennehmers ist in den Arbeiten von Sondermann, 2011; Lemmer et. al., 2013 und Ruile, 2015 zu finden. Die Weiterverarbeitung der Proben erfolgt ebenfalls nach den in der Literatur beschriebenen Methoden. Dabei wird das Substrat nach dem Messen der Temperatur und des pH-Werts auf unter 10 °C abgekühlt und in einem Tischcutter (Robot Coupe, R8, Vincennes Cedex, Frankreich) für etwa 1 Minute homogenisiert. Anschließend

werden die Substratproben bei -21 °C eingefrorenen, bis im Labor der Universität Hohenheim mittels Gaschromatographie der Säuregehalt bestimmt wird. Der Trockensubstanzgehalt wird nach der VDI-Richtlinie 4360 gemessen. Abschließend werden alle verschmutzten Utensilien nach jeder Probe mit Wasser gereinigt.

3.2.1 Versuchsdurchführung Nährstoffverteilung

Der Fermenter wurde für den Betrieb mit dem bionischen Rührwerk und dem TMR sowie im Standardbetrieb mit TMR und LAR hinsichtlich der Nährstoffverteilung beprobt. Aus terminlichen Gründen, der Einbau des Rührwerks verschob sich mehrmals nach hinten, konnten nicht mehr als zwei Wiederholungen der aufwändigen Versuche realisiert werden. Das ergab vier Blöcke, von denen jeder einen Versuchstag beanspruchte. Die Proben zum Betrieb mit dem WUSOA Rührwerk wurden am 03.11.2016 und 17.11.2016 gezogen. Für den Standardbetrieb wurden die Versuche am 01.12.2016 und 22.12.2016 durchgeführt. An jeder Schleuse wurde eine Probe in der Höhe von 0,2 m, 2,5 m und 4,5 m über dem Fermenterboden gezogen. Die unterschiedlichen Höhen werden als Unten, Mitte und Oben bezeichnet. Die Reihenfolge der Beprobung wurde randomisiert (**Abbildung 16**). Das Rührintervall setzte immer zur vollen Stunde ein und betrug 30 Minuten. Die Fütterung startete nach 20 Minuten Rühren. Es wurden etwa 300 kg innerhalb von circa 5 Minuten eingebracht. So wurde das eingebrachte Substrat noch etwa 5 Minuten eingerührt. Stündlich wurde eine Probe 5 Minuten vor und eine direkt nach dem Rühren des Fermenters gezogen. Wie die Arbeit von Sondermann, 2011 zeigt, führt eine spätere Probennahme am Ende der Rührpausen zu einer Entmischung im Fermenter. Daher sind die Gegebenheiten für jede Probe nicht gänzlich konstant, was die statistische Aussagekraft einschränkt. Die Zeitschaltuhr des WUSOA Rührwerks ermöglichte nur dieses Rührintervall. Daher war das die einzige praktikable Lösung, um alle 18 Proben eines Blocks an einem Tag zu ziehen. Jeder Versuchstag begann mit einer Probe um 7:55 und endete mit der 18. Probe um 16:30.

Wusoa 1.	Wusoa 2.	Standard 1.	Standard 2.
3.3 O	1.3 O	2.4 M	3.1 U
1.3 U	3.3 M	2.2 O	1.1 O
1.1 O	2.4 U	3.1 O	2.4 O
3.3 M	3.3 O	1.1 O	1.1 U
2.4 O	2.2 O	2.2 U	2.4 M
2.4 U	2.4 M	3.3 M	2.2 O
2.2 U	1.3 M	3.1 M	3.3 O
3.3 U	1.1 O	3.3 O	3.1 M
3.1 O	1.3 U	2.4 U	2.2 M
3.1 U	1.1 U	1.3 M	3.3 U
2.4 M	1.1 M	1.1 U	1.3 O
1.3 O	2.2 U	2.2 M	3.3 M
2.2 O	2.2 M	1.3 U	1.1 M
1.1 M	2.4 O	3.3 U	2.2 U
1.3 M	3.1 M	3.1 U	3.1 O
1.1 U	3.3 U	2.4 O	1.3 U
2.2 M	3.1 O	1.1 M	2.4 U
3.1 M	3.1 U	1.3 O	1.3 M

Abbildung 16: Beprobungsabfolge der vier Versuchsblöcke

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Versuch zur Strömungsgeschwindigkeit

4.1.1 Anlagenbetrieb im Versuchszeitraum

4.1.1.1 Fütterung

Nach der Reinigung des Fermenters und dem Einbau des bionischen Rührwerkes wurde der Fermenter mit separiertem Gärrest aus dem Nachgärer befüllt und die ersten Messungen durchgeführt. Der Fermenter wurde von Beginn an beheizt und in einem mesophilen Temperaturbereich mit einer Zieltemperatur von ca. 43 °C betrieben. Am 19.09.2016 wurde mit der Fütterung begonnen, um den Fermenter hochzufahren. Die verwendeten Substrate waren Festmist, Mais-silage, Grassilage und Ganzpflanzensilage (GPS). An zwei Tagen wurde die Fütterung mit Getreide ergänzt. Die tägliche Fütterungsmenge schwankte, mit Ausnahme des ersten Tages, zwischen 4.927 kg FM/d und 8.990 kg FM/d (**Abbildung 17**). Auffällig war die hohe Fütterungsmenge von 8.990 kg FM/d am 04.10.2016 mit einem großen Anteil an Grassilage. An den Wochenenden wurden die geringsten Mengen gefüttert, damit die Vorratsbehälter der Feststoffeinträge nur einmal vor dem Wochenende befüllt werden mussten. Über den kompletten Versuchszeitraum wurden durchschnittlich 6.218 kg FM/d gefüttert. Für die großen Schwankungen während des Versuchszeitraumes konnten keine Gründe gefunden werden. Die Auswertung der Fütterungsmengen zeigte eine der größten Herausforderungen der Forschung im Praxismaßstab. Grundsätzlich wurde der Versuchsablauf darauf ausgelegt, eine gleichbleibende Fütterungsmenge zu dosieren. Fehler in der Steuerung, Schwankungen in der Silagequalität, Anpassungen an Betriebsvoraussetzungen oder Fehler des Bedienpersonals können zu Schwankungen führen. Auf die korrekte Zuführung der Inputstoffe muss bei zukünftigen Arbeiten noch intensiver geachtet werden.

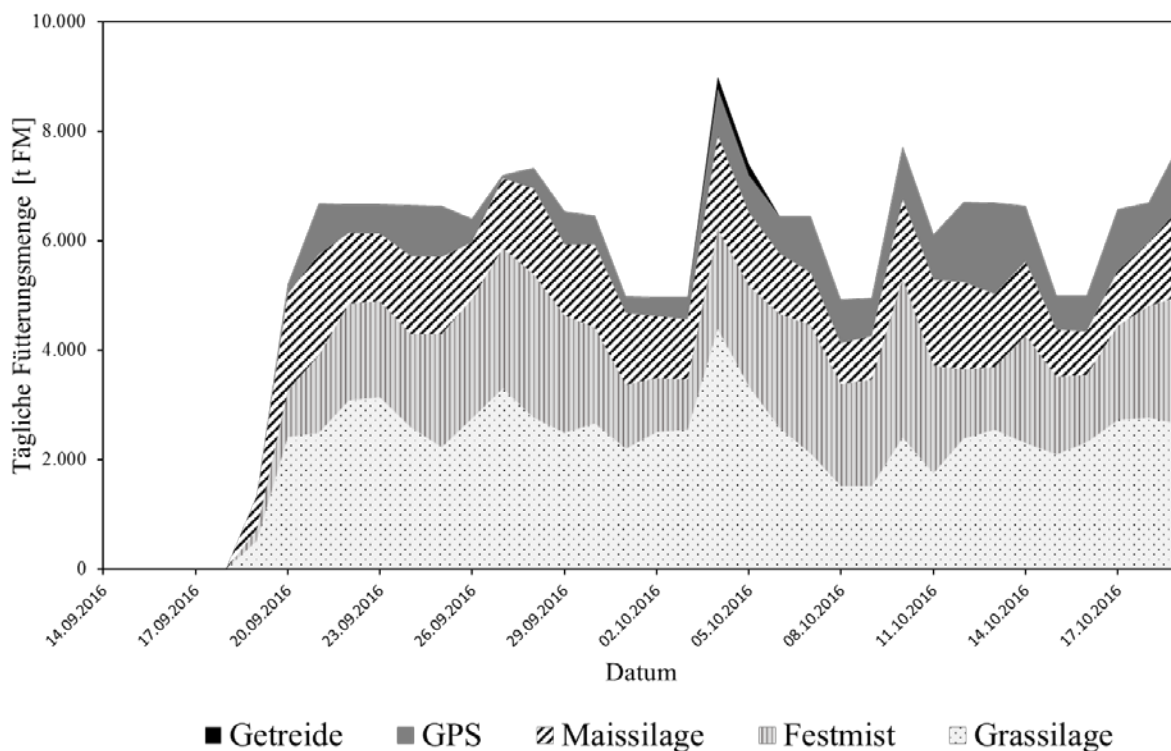


Abbildung 17: Fütterungszusammensetzung über den Versuchszeitraum

Im Versuchszeitraum konnte ein Anstieg des TS-Gehaltes im Gärsubstrat durch die Zuführung von Feststoffen von 5,83 % auf 8,95 %, eine Steigerung von 53,5 %, gemessen werden (**Tabelle 4**). Analog dazu steigerte sich der oTS-Gehalt um 64,0 % von 3,86 % auf 6,33 % und dementsprechend der oTS-Anteil an der Trockensubstanz von 66,21 % auf 70,73 %. Auffällig ist der sehr geringe Anstieg des TS-Gehaltes von der dritten zur vierten Woche von 8,36 % auf 8,38 %. Der oTS-Gehalt sank von 5,92 % auf 5,87 %. Vermutlich führten die hohen Fütterungsmengen von bis zu 9.000 kg FM/d und vor allem die zusätzliche Getreidefütterung in der dritten Messwoche zu einer deutlichen Erhöhung der TS-Gehalte von 7,35 % in der zweiten Woche auf 8,36 % und der oTS-Gehalte von 4,89 % auf 5,92 %. Die Fütterungsmenge reduzierte sich wieder zwischen der dritten und vierten Woche. Auch die Getreidefütterung wurde wieder gestoppt. Dadurch veränderten sich die TS- und oTS-Gehalte der vierten Woche kaum im Vergleich zur dritten Woche. Im Vergleich zu der Ausarbeitung von Kolb (2016), der zu Beginn der Versuche einen TS-Gehalt von 7,74 % ermittelt hatte, wurden die ersten Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten sowie der Viskosität bei einem dünnflüssigeren Biogassubstrat mit einem niedrigeren TS-Gehalt von 5,83 % durchgeführt.

Tabelle 4: TS- und oTS-Gehalte des Gärsubstrates über den Versuchszeitraum

Datum	TS-Gehalt [%]	StABW TS [%]	oTS-Gehalt [%]	StABW oTS [%]	oTS-Anteil [%]
15.09.2016	5,83	0,03	3,86	0,01	66,21
27.09.2016	7,35	0,01	4,89	0,19	66,53
05.10.2016	8,36	0,95	5,92	0,08	70,81
11.10.2016	8,38	0,23	5,87	0,01	70,05
18.10.2016	8,95	0,01	6,33	0,07	70,73

Die Ergebnisse der TS-Gehalte von den Inputstoffen unterschieden sich über den Versuchszeitraum deutlich. Maissilage mit einem durchschnittlichen TS-Gehalt von 32,3 % zeigte die geringsten Schwankungen zwischen 27,2 % und 34,5 %. Die größten Unterschiede wurden bei Grassilage festgestellt, wobei TS-Gehalte zwischen 20,1 % und 51,2 % (Mittelwert 38,0 %) gemessen wurden. Bei GPS mit einem durchschnittlichen TS-Gehalt von 35,3 % schwankten die Ergebnisse zwischen 23,6 % und 38,8 %. Über die TS-Gehalte von Festmist und Getreide liegen keine Ergebnisse vor, da der NIRS-Sensor für diese Substrate nicht kalibriert war und somit keine Messungen möglich waren. Für die Einsatzstoffe wurden während des Versuchszeitraumes keine Trockensubstanz- und Ascheanalysen im Labor durchgeführt, da diese aufwändig und zeitintensiv sind. Für zukünftige Studien wird eine Untersuchung aller Einsatzstoffe durch geeignete Kalibrierungskurven für den NIRS-Sensor angestrebt.

4.1.1.2 Gasmenge und Gasqualität

Zu Beginn des Versuches wurden dem Fermenter keine Feststoffe zugeführt, weshalb die Gasproduktion erst nach dem Einsetzen der Fütterung am 19.09.2016 anstieg. Bis zum 24.09.2016 erhöhte sich die Biogasproduktion auf 48,91 m_n³/h (**Abbildung 18**). Danach wurden Gasmengen zwischen 49,98 Nm_n³/h und 63,97 m_n³/h gemessen. Am 05.10.2016 stieg die Gasproduktion kurzzeitig auf 62 m_n³/h. Dieser Sprung ist vermutlich auf die hohen Frischmasseeinträge von ca. 9000 kg sowie die zusätzliche Getreidefütterung am 04.10.2016 und 05.10.2016 zurückzuführen. Der Methangehalt, der die Gasqualität maßgeblich bestimmt, stieg nach der ersten Fütterung bis zum 26.09.2016 auf einen Wert von 53,17 Vol.-% und schwankte danach zwischen 51,54 Vol.-% und 55,12 Vol.-%. Zwischen dem Methangehalt und dem Kohlenstoffdioxidgehalt erkennt man eine klare Abhängigkeit, da bei steigendem Methangehalt der Koh-

lenstoffdioxidgehalt um den gleichen Anteil sinkt. Zusammen erreichten Methan und Kohlendioxid ab dem 26.09.2016 Anteile zwischen 98 Vol.-% und 100 Vol.-%. Der Sauerstoffgehalt betrug zu Beginn der Fütterung 1,01 Vol.-% und sank im Laufe des Versuchszeitraums auf 0,0 Vol.-%. Auch der Schwefelwasserstoffgehalt sank bis zur dritten Messwoche von Anfangswerten bis 553,72 ppm auf Gehalte zwischen 63,05 ppm bis 97,66 ppm. Der hohe Rühraufwand an den Messtagen zeigte keine erkennbaren Veränderungen der täglichen Gasproduktion sowie der Gasqualität und Gaszusammensetzung.

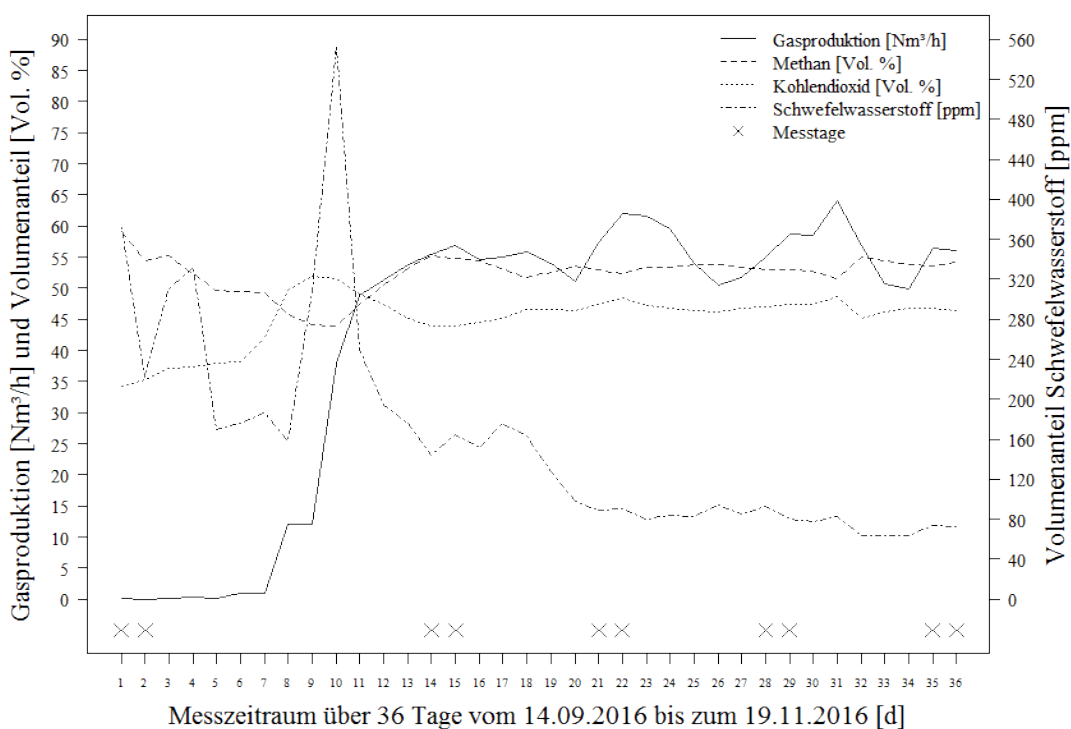


Abbildung 18: Biogasproduktion und Gaszusammensetzung über den Versuchszeitraum

Betrachtet man bei der Gasproduktion nicht die Mittelwerte eines Tages, sondern die einzelnen Werte, die alle fünf Minuten aufgezeichnet wurden, sind große Schwankungen, die unmittelbar auf die Rührwerke zurückzuführen sind, erkennbar. In **Abbildung 19** erkennt man in dem Verlauf der Gasproduktion innerhalb von fünf Stunden deutlich die intervallbetriebene Fahrweise der Rührwerke. Diese rühren zu jeder vollen Stunde 30 min lang. Währenddessen wurden jeweils Gasspitzen ermittelt, die sich nach dem Abschalten des Rührwerkes wieder verringerten. Bei dem bionischen Rührwerk schwankten die Einzelwerte bei einer durchschnittlichen Gasproduktion von $41,63 \text{ m}_n^3/\text{h}$ zwischen $33 \text{ m}_n^3/\text{h}$ und $51 \text{ m}_n^3/\text{h}$. Im Standardbetrieb mit LAR und TMR waren Schwankungen von $31 \text{ m}_n^3/\text{h}$ bei ausgeschaltetem Rührwerk und $57 \text{ m}_n^3/\text{h}$ bei angeschaltetem Rührwerk größer als bei dem bionischen Rührwerk. Der Mittelwert von

41,91 m_n³/h unterscheidet sich jedoch kaum von dem bionischen Rührwerk. Dies lässt vermuten, dass das LAR und TMR in Kombination in der Lage sind, mehr Gas aus dem Substrat zu rühren als das bionische Rührwerk. Wird das bionische Rührwerk in Kombination mit dem TMR betrieben, fällt besonders ein erneuter Anstieg der Gasproduktion bei ausgeschalteten Rührwerken auf. Die Gasmengen schwankten dabei zwischen 36 m_n³/h und 58 m_n³/h. In dem ausgewählten Zeitintervall von fünf Stunden wurde eine etwas höhere durchschnittliche Gasproduktion von 47,39 m_n³/h ermittelt als bei dem bionischen Rührwerk im Einzelbetrieb. Es ist zu erwähnen, dass dieser Vergleich keine Rückschlüsse auf unterschiedliche Gaserträge bei verschiedenen Rührwerken zulässt. Um konkrete Aussagen über die Gasproduktion treffen und verschiedene Rührwerke und Rührverfahren miteinander vergleichen zu können, muss die Gasproduktion über einen längeren Zeitraum untersucht und mit weiteren Parametern wie der Fütterungszusammensetzung, den TS- und oTS-Gehalten des Biogassubstrates und den Inputstoffen abgeglichen werden. Die Fütterungsmengen am Tag der Messungen sind zwar bei dem bionischen Rührwerk mit 6.634 kg FM und bei Standardbetrieb mit LAR und TMR mit 6.807 kg FM vergleichbar, allerdings wurden zum Zeitpunkt der Messung der Gasproduktion bei einem kombinierten Einsatz von dem bionischen Rührwerk und TMR nur 5.430 kg FM gefüttert. Dieser Vergleich zeigt die Einflüsse von unterschiedlichen Rührsystemen auf die Ausrührung des Biogases. Aufgrund der geringen Datengrundlagen können die Rührwerke hinsichtlich der Gasausbeute nicht ausreichend bewertet und verglichen werden. Kontinuierliche Fütterungsintervalle sowie eine gleichbleibende Substratqualität für lange Zeiträume sind die notwendige Grundlage für vergleichende Forschungsarbeiten im Praxismaßstab.

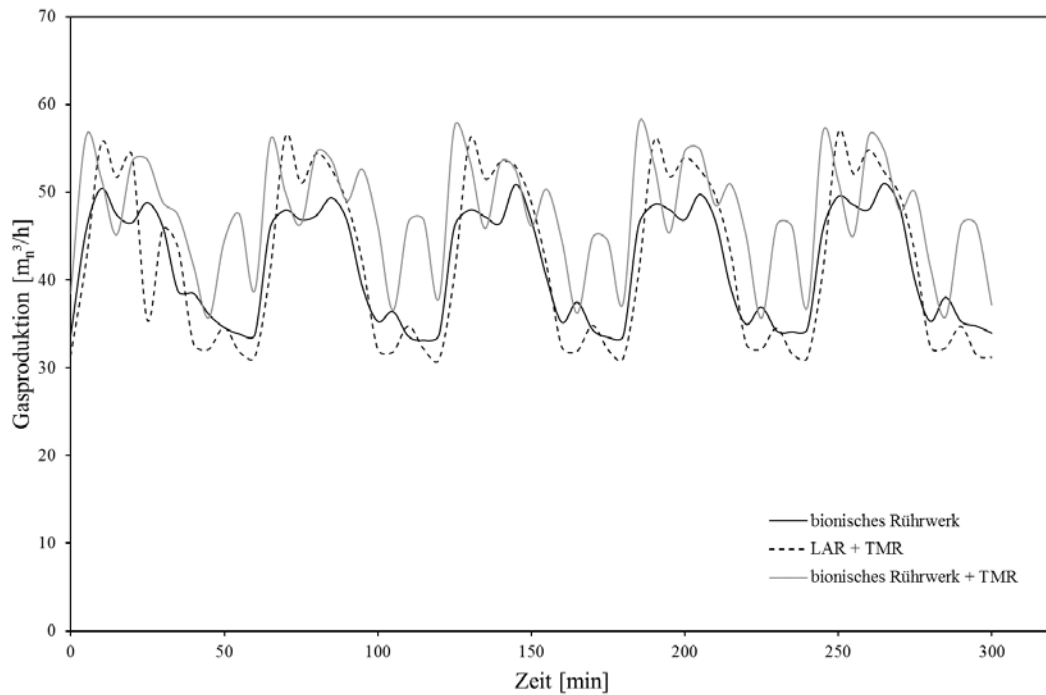


Abbildung 19: Vergleich der Gasproduktion bei dem bionischen Rührwerk (mit und ohne TMR) und bei Standardbetrieb (LAR und TMR) innerhalb von fünf Stunden

In **Abbildung 20** ist die Gasproduktion im Zeitraum eines Tages dargestellt. Nach ca. der Hälfte der Zeit bei 700 min wurde das bionische Rührwerk abgeschaltet und im Gegenzug das LAR und TMR eingeschaltet. Nach diesem „Umschalten“ stieg die Gasproduktion schlagartig für einen kurzen Zeitraum auf bis zu $84,1 \text{ m}_n^3/\text{h}$. Die durchschnittliche Gasproduktion von ca. $40,9 \text{ m}_n^3/\text{h}$ in den ersten 700 min erhöhte sich auf einen Durchschnittswert von $49 \text{ m}_n^3/\text{h}$ in der zweiten Hälfte des Diagrammes. Diese hohe Gasproduktion sank allerdings nach einer gewissen Zeit wieder auf durchschnittliche Gasmengen, die mit denen des bionischen Rührwerkes vor dem „Umschalten“ vergleichbar sind. Dies lässt vermuten, dass das bionische Rührwerk weniger Gas aus dem Substrat als das LAR und TMR zusammen ausrühren kann. Durch das „Umschalten“ von dem bionischen Rührwerk auf das LAR und TMR wird dieser hohe Gasanteil im Substrat sofort ausgerührt. Dadurch entsteht ein schlagartiger Anstieg der Gasproduktion.

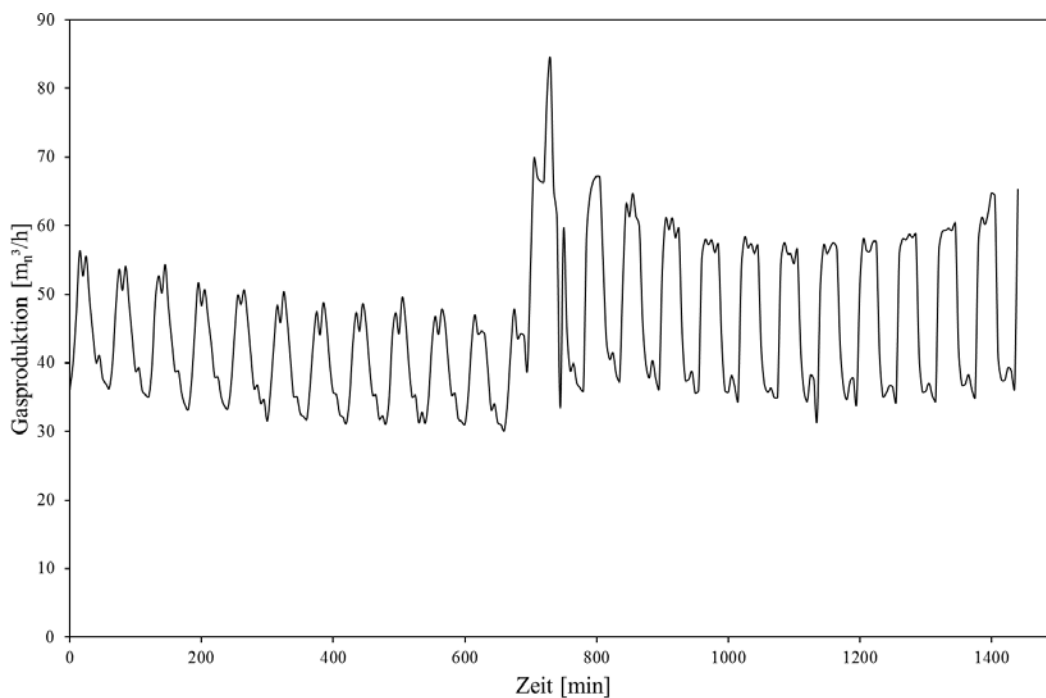


Abbildung 20: Gasproduktion während dem „Umschalten“ von einem Rührvorgang mit dem bionischen Rührwerk auf den Standardbetrieb mit LAR und TMR

4.1.1.3 Energieaufnahme des bionischen Rührwerkes

Die Energieaufnahme des bionischen Rührwerkes während einer Stunde ist im Schnitt bei der Drehzahl von 1.200 1/min mehr als doppelt so hoch als bei 900 1/min (**Tabelle 5**). Es wurde keine Abhängigkeit der Energieaufnahme von dem TS-Gehalt festgestellt. Mit dem Anstieg des TS-Gehaltes ging keine Erhöhung der Stromaufnahme einher. Im gesamten Versuchszeitraum schwankte die Energieaufnahme während einer Rührzeit von einer Stunde zwischen 1,65 kWh und 2,05 kWh (Mittelwert 1,76 kWh) bei 900 1/min und zwischen 3,52 kWh und 3,88 kWh (Mittelwert 3,71 kWh) bei 1.200 1/min. Ausgehend von einer Energieaufnahme von 3,71 kWh/h bei der Umdrehungszahl von 1.200 1/min ergibt dies bei einem dreißigminütigen Rührintervall pro Stunde einen Energieverbrauch von ca. 44 kWh pro Tag. Verglichen mit dem Energieverbrauch von 89 kWh pro Tag bei Standardbetrieb mit einem TMR und LAR im selben Fermenter können mit dem bionischen Rührwerk ca. 50 % an Stromkosten eingespart werden (Naegle et al. 2012b). Es ist anzumerken, dass die Mischqualität der beiden Rührsysteme bei diesem Vergleich nicht berücksichtigt, sondern nur der Energieverbrauch bei identischen Rührzeiten verglichen wurden. Während der Anfahrphase wurde mehrmals das TMR benötigt, um entstehende Schwimmschichten einzurühren. Ohne die Hilfe des zweiten redundanten Rühr-

werkes wäre ein sicherer Anlagenbetrieb nicht möglich gewesen. Der dadurch entstandene zusätzliche Stromverbrauch ging in diese Berechnung nicht mit ein. Der niedrigere Energieverbrauch zeigt aber das hohe Potential des bionischen Rührwerkes, den Anteil der Rührwerke am Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen zu reduzieren. Der niedrigere Verbrauch wirkt sich jedoch negativ auf die Rührqualität aus.

Tabelle 5: Stromverbrauch des bionischen Rührwerkes über den Versuchszeitraum

Messwoche	900 1/min [kWh/h]	1.200 1/min [kWh/h]
1	1,77	3,88
2	2,05	3,64
3	1,65	3,52
4	1,67	3,60
5	1,66	3,71
Mittelwert	1,76	3,67
StABW	0,17	0,14

4.1.2 Viskosität des Fermentersubstrates

Eine Betrachtung der Fließkurven aller fünf Messwochen zeigt ein strukturviskoses Verhalten des Biogassubstrates, da mit zunehmender Scherrate die Steigung der Schubspannung abnimmt (**Abbildung 18**). Auffällig ist der nahezu lineare Verlauf der Trendlinie bei einem TS-Gehalt von 5,83 %. Allerdings zeigen alle Trendlinien zum Nullpunkt, weshalb auch in der ersten Woche von einer Strukturviskosität des Biogassubstrates gesprochen werden kann. Bei Scherraten unter 300 1/s wurden Schubspannungen bis zu 25,0 Pa gemessen. Die Zunahme des TS-Gehaltes führt nicht nur zu einer Zunahme der Schubspannung, sondern auch zu einem steileren Verlauf der Fließkurven. Eine deutliche Steigerung der Schubspannung wurde nach einer Erhöhung des TS-Gehaltes von 5,83 % auf 7,35 % beobachtet. In der vierten und fünften Woche sind die Fließkurven nahezu identisch.

Ein Vergleich der Viskosität aller fünf Wochen zeigt ebenfalls ein strukturviskoses Verhalten des Biogassubstrates (**Abbildung 19**). Bei steigender Scherrate nimmt die Viskosität exponentiell ab. Die Kurven werden bei höheren TS-Gehalten steiler. Die höchste Viskosität von 1,29 Pas wurde in der fünften Woche bei einer Scherrate von 8,9 1/s gemessen. In der ersten Woche war die maximale Viskosität mit 0,28 Pas im Vergleich zur fünften Woche um 78 % geringer. Von der zweiten zur dritten Woche stieg die Viskosität deutlich an. Dies ist vermutlich

auf die hohen Fütterungsmengen zurückzuführen. Die Viskosität in der vierten und fünften Woche war nahezu identisch, da der TS-Gehalt nur minimal von 8,38 % auf 8,95 % anstieg. Dies lässt einen großen Einfluss des TS-Gehaltes auf die Viskosität im Fermenter vermuten.

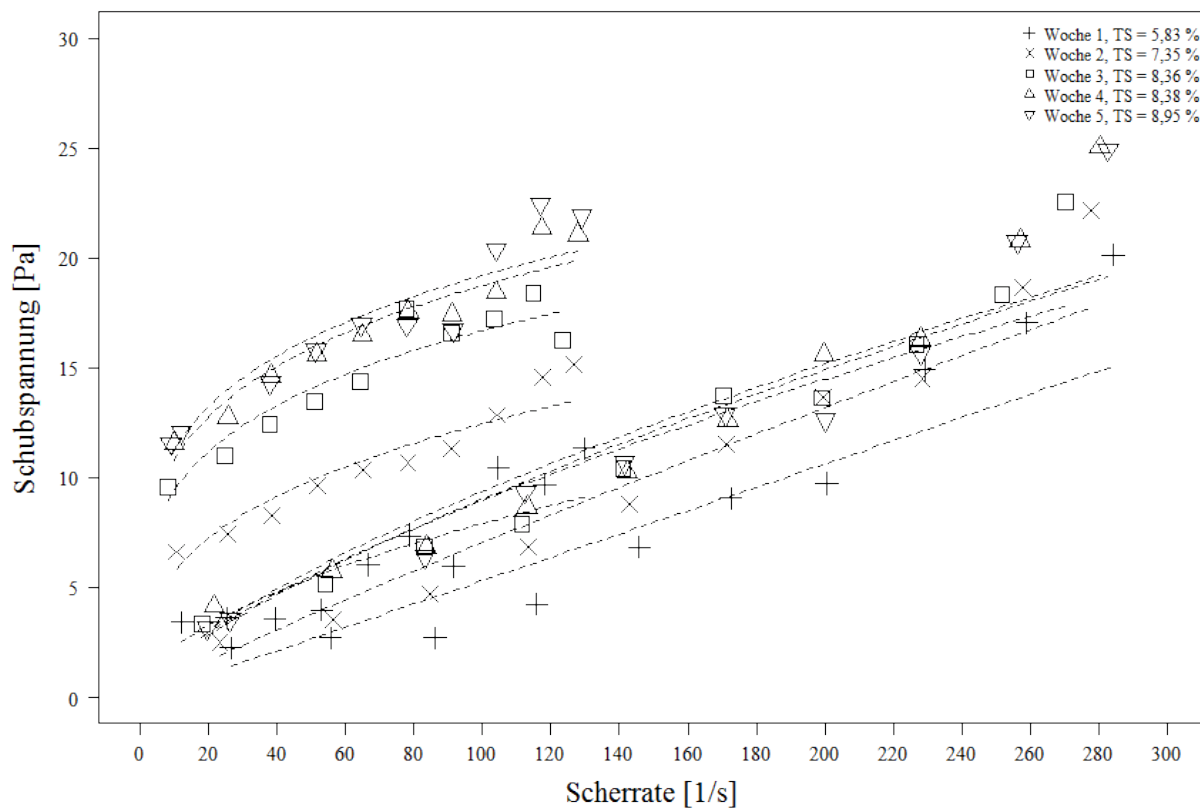


Abbildung 21: Vergleich der Fließkurven der ersten bis zur fünften Woche

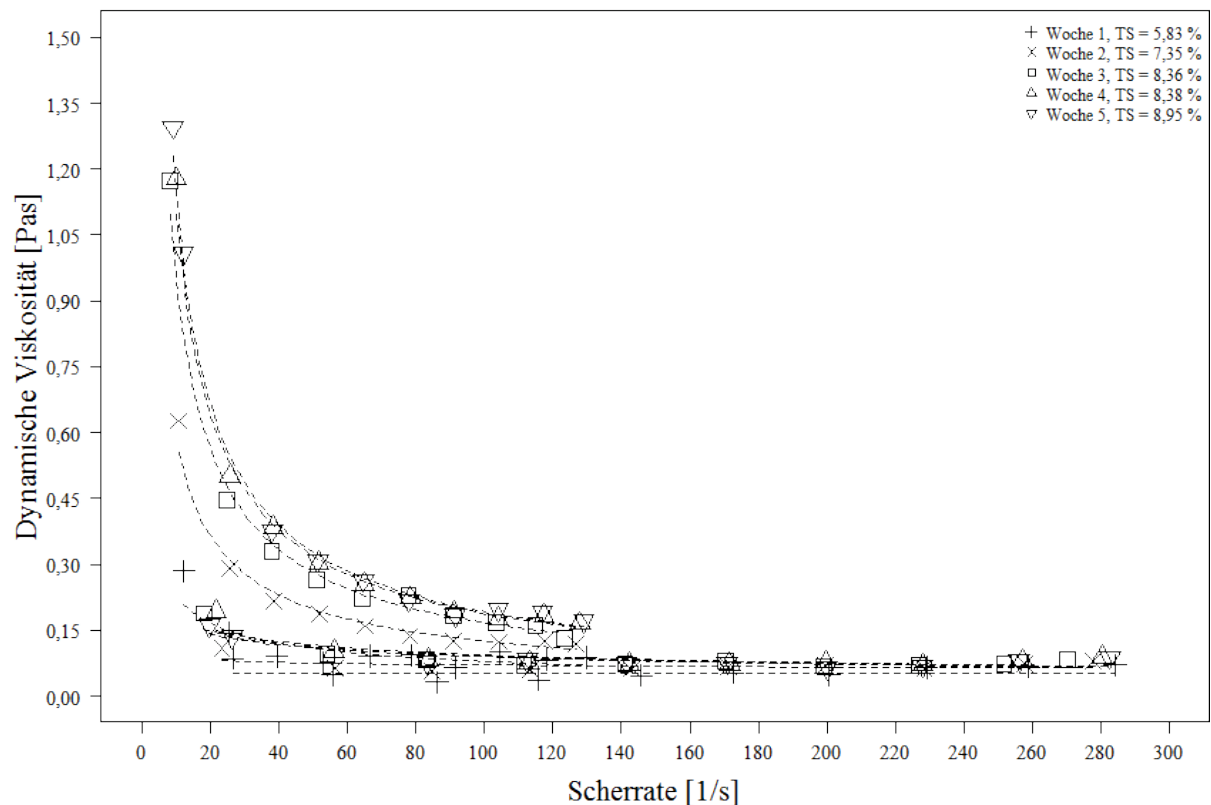


Abbildung 22: Vergleich der dynamischen Viskosität der ersten bis zur fünften Woche

Aufgrund der hohen Durchflussmengen von bis zu $60 \text{ m}^3/\text{h}$ liefert das Rohrviskosimeter während des kompletten Versuchszeitraumes Ergebnisse, die repräsentativ für den kompletten Fermenterinhalt sind. Es konnte beobachtet werden, dass der TS-Gehalt die Viskosität stark beeinflusst. Nach einer Erhöhung des TS-Gehaltes von $5,83 \%$ auf $8,95 \%$ stieg die Viskosität um 360% an. Werden die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen von Biogassubstrat in den Studien von Kolb (2016) und Debera (2016) verglichen, ist deutlich zu erkennen, dass der TS-Gehalt nicht der einzige relevante Parameter für die Viskosität darstellt. Durch eine Vorzerkleinerung des Substrates bei Kolb (2016) konnte eine deutlich niedrigere Viskosität gemessen werden. Bei einem TS-Gehalt von $10,74 \%$ und einer Scherrate von 125 1/s wurde eine Viskosität von bis zu $2,3 \text{ Pas}$ und eine Schubspannung von bis zu 44 Pa gemessen (Kolb 2016). Ein Fermenter ohne Vorbehandlung des Substrates zeigte bei einem ähnlichen TS-Gehalt von ca. 10% und einer maximalen Scherrate von bis zu 125 1/s eine dynamische Viskosität von bis zu 43 Pas und eine Schubspannung von bis zu 80 Pa (Debera 2016). Dadurch ergibt sich eine um ca. 95% geringere Viskosität und eine 45% geringere Schubspannung in einem Fermenter mit Vorzerkleinerung bei einem ähnlichen TS-Gehalt.

Die Ergebnisse von Kolb (2016) lagen auf einem ähnlichen Niveau wie die Ergebnisse dieser Ausarbeitung (**Tabelle 6**). Bei einem vergleichbaren TS-Gehalt von 9,13 % (Kolb 2016) und 8,95 % wurde eine nahezu gleiche Viskosität von 1,25 Pas (Kolb 2016) und 1,29 Pas gemessen. Vermutlich ist der Einfluss der Fasergehalte auf die Viskosität im Biogassubstrat erst bei höheren TS-Gehalten deutlich zu erkennen. In Untersuchungen von Mönch-Tegeder (2015) konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Partikelgröße auf die Viskosität bei steigendem TS-Gehalt zunimmt. Bei einem TS-Gehalt von 10,1 % wurde in einem Fermenter ohne Vorbehandlung eine 10,9 % höhere Viskosität gemessen als in einem Fermenter mit Vorzerkleinerung. Nach einer Erhöhung des TS-Gehaltes auf 11,7 % vergrößerte sich dieser Unterschied auf 52,5 % (Mönch-Tegeder et al. 2015). In den Untersuchungen von Kolb (2016) konnten bei einem TS-Gehalt von 7,75 % keine Ergebnisse erhalten werden, da das Substrat zu dünnflüssig für das Rohrviskosimeter war. Bei einem ähnlichen TS-Gehalt von 7,35 % konnte in dieser Ausarbeitung jedoch eine Viskosität von 0,63 Pas und bei einem niedrigeren TS-Gehalt von 5,83 % eine Viskosität von 0,28 Pas gemessen werden. Dies verdeutlicht, dass die Viskosität nicht nur von dem TS-Gehalt beeinflusst wird.

Tabelle 6: Vergleich der maximalen Viskosität mit den Ergebnissen von Kolb (2016) in Abhängigkeit der TS-Gehalte

Wusoa		Kolb (2016)	
TS-Gehalt [%]	Viskosität [Pas]	TS-Gehalt [%]	Viskosität [Pas]
5,83	0,28	NA	NA
7,35	0,63	7,74	NA
8,36	1,17	8,19	1,37
8,38	1,18		
8,95	1,29	9,13	1,25
NA	NA	9,61	1,60
NA	NA	NA	2,00
NA	NA	10,75	2,33

4.1.3 Strömungsgeschwindigkeiten

An allen Schleusen wurde auf jeder Höhe nur der Durchschnittswert der 75 aufgezeichneten Messwerten angegeben. Große Schwankungen und besonders hohe positive und negative Einzelwerte haben dabei einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse. Die größten Schwankungen im Versuchszeitraum traten in der ersten Woche an der Schleuse 2.4 auf einer Höhe von 4,5 m bei 1.200 1/min auf. Die Geschwindigkeiten schwankten zwischen -10,6 cm/s und 31,9 cm/s, einer Spanne von 42,5 cm/s (**Abbildung 23**). Daraus wurde eine Durchschnittsgeschwindigkeit von nur 3,9 cm/s berechnet. Da sich positive und negative Geschwindigkeiten bei der Bildung des Mittelwertes nahezu auflösten, wurde durch die sich laufend ändernde Strömungsrichtung ein niedriger Durchschnittswert berechnet, der in keinem Verhältnis zu den dort auftretenden Strömungen steht. Verantwortlich für diese Geschwindigkeitsschwankungen sind die Turbulenzen und Verwirbelungen, aber auch die schubartigen und pulsierenden Bewegungen, die von dem bionischen Rührwerk erzeugt wurden. Dadurch konnten an der Oberfläche, besonders in der ersten Woche bei einem niedrigen TS-Gehalt des Substrates, Wellenbewegungen beobachtet werden. Die Ungenauigkeiten der Ergebnisse minimierten sich in der zweiten Messwoche, da durch die Erhöhung des TS-Gehaltes auf 7,35 % die schubartigen Bewegungen sowie der Wellengang verringert wurden. In der dritten Woche schwankten die Einzelwerte an Schleuse 2.4 nur noch zwischen -0,6 cm/s und 4,1 cm/s, woraus ein Mittelwert von 1,7 cm/s berechnet wurde. Vergleicht man die erste und dritte Woche nur anhand den berechneten Durchschnittsgeschwindigkeiten, werden die Unterschiede der Strömungen unterschätzt. Die höchsten gemessenen Einzelwerte verringerten sich von der ersten zur dritten Woche um 87 %, die durchschnittliche Geschwindigkeit allerdings nur um 56 %. Auch an anderen Schleusen wurden, besonders bei 1.200 1/min, in der ersten Woche Ungenauigkeiten sowie niedrige Durchschnittsgeschwindigkeiten nahe der Oberfläche auf einer Höhe von 4,5 m festgestellt. Die Einzelwerte an Schleuse 1.1 schwankten bei 1.200 1/min auf der Höhe von 4,5 m zwischen -6,4 cm/s und 20,3 cm/s. Daraus errechnete sich eine Durchschnittsgeschwindigkeit von nur 3,6 cm/s. Deshalb wurden bei der Drehzahl von 900 1/min nahe der Oberfläche höhere durchschnittliche Geschwindigkeiten ermittelt als bei 1.200 1/min. Diese waren bei 1.200 1/min selbst in der zweiten und dritten Woche im Vergleich zur ersten Woche höher. Dies spricht gegen den Trend einer abnehmenden Geschwindigkeit im Laufe der Messwochen. Auch an Schleuse 2.2 schwankten die Geschwindigkeiten bei 900 1/min zwischen 3,8 cm/s und 8,1 cm/s, woraus sich ein Durchschnitt von 6,0 cm/s errechnete. Bei 1.200 1/min wurde ein Mittelwert von nur 0,9 cm/s berechnet, da die Geschwindigkeiten zwischen -4,8 cm/s und 7,4 cm/s schwankten. Ein Vergleich der beiden Durchschnittsgeschwindigkeiten lässt also

fälschlicherweise darauf schließen, dass bei der Drehzahl von 900 1/min höhere Geschwindigkeiten als bei 1.200 1/min auftreten. Diese Ungenauigkeiten sind sowohl dem Auswertungsverfahren durch die Bildung von Mittelwerten als auch dem Messgerät, das nur Geschwindigkeiten aus einer Richtung genau ermitteln kann, geschuldet. Bei der niedrigeren Drehzahl von 900 1/min waren die Wellenbewegungen an der Oberfläche weniger ausgeprägt und somit die Schwankungen der Geschwindigkeiten deutlich geringer.

Die höchste Standardabweichung von 8,4 cm/s wurde an der Stelle 1.3 auf der Höhe von 4,5 m bei 1.200 1/min berechnet (**Abbildung 24**). Die Einzelwerte schwankten zwischen -5,1 und 22,0 cm/s, in einer Spanne von 27,1 cm/s. Dies zeigte nochmals die Ungenauigkeit der Messergebnisse nahe der Oberfläche. Die Standardabweichung nahm in Richtung Fermenterboden deutlich ab. Die niedrigste Standardabweichung von 1,3 cm/s wurde in der ersten Woche auf einer Höhe von 1,0 m berechnet. In der fünften Woche war an dieser Schleuse auf einer Höhe von 4,5 m im Vergleich zur ersten Woche die höchste Standardabweichung bei 0,7 cm/s. Die Geschwindigkeiten schwankten dabei zwischen -2,5 cm/s und 0,6 cm/s. Die Spanne der Schwankungen reduzierte sich also von der ersten zur fünften Woche um 89 % von 27,1 cm/s auf 3,1 cm/s. Bei der Erhöhung des TS-Gehaltes reduzierten sich die Schwankungen der Geschwindigkeiten sowie die Standardabweichungen.

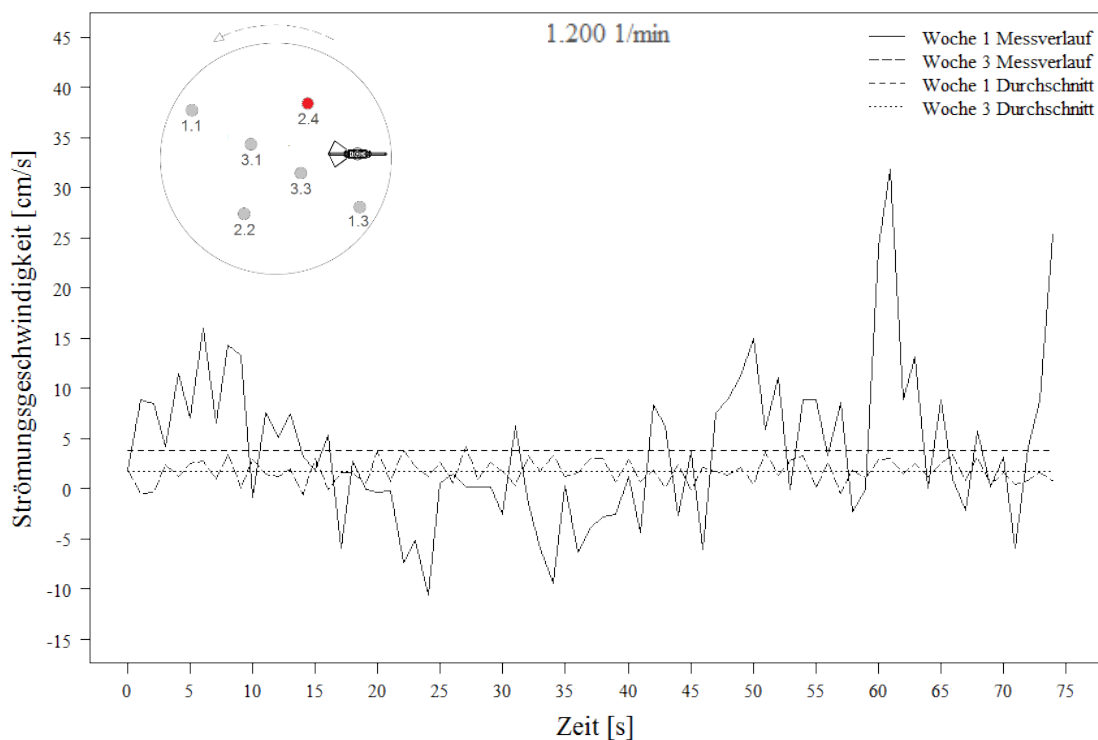


Abbildung 23: Vergleich der Messverläufe an der Schleuse 2.4 auf der Höhe von 4,5 m bei 1.200 1/min

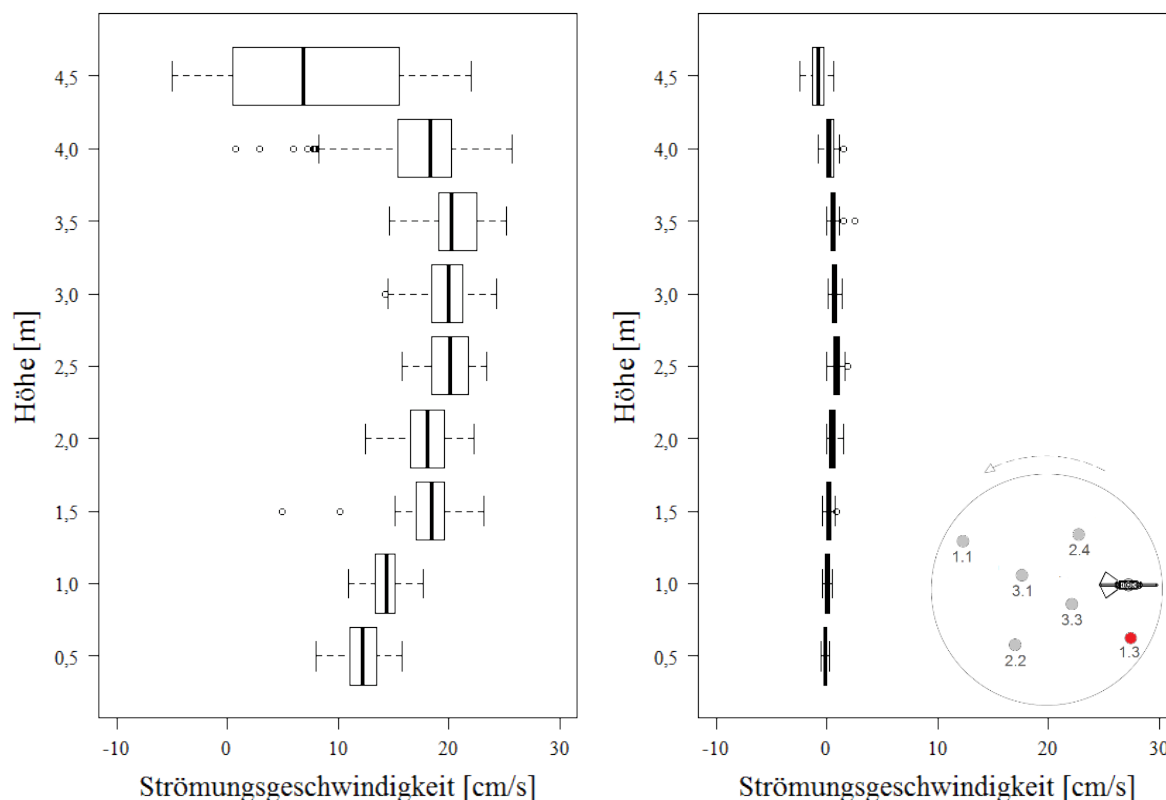


Abbildung 24: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten an der Schleuse 1.3 in der ersten Woche (links) und fünften Woche (rechts) bei 1.200 1/min

In den **Abbildung 25** und **Abbildung 26** sind die Strömungsgeschwindigkeiten von der ersten bis zur fünften Woche an allen Schleusen dargestellt. Dabei werden die Strömungsgeschwindigkeiten der Drehzahlen 900 1/min und 1.200 1/min gegenübergestellt.

Schleuse 1.1 war am weitesten von dem bionischen Rührwerk entfernt. Die erste Messung zeigte bei einem TS-Gehalt von 5,83 % Geschwindigkeiten zwischen 5,8 cm/s und 17,1 cm/s (900 1/min) und 3,6 cm/s und 27,5 cm/s (1.200 1/min). In den Höhen zwischen 1,0 m und 2,5 m bildete sich bei beiden Drehzahlen ein „Bauch“ mit hohen Geschwindigkeiten bis zu 17 cm/s. Im oberen Bereich über 3,0 m wurden dagegen durchschnittliche Geschwindigkeiten unter 10,5 cm/s (900 1/min) und 9,3 cm/s (1.200 1/min) gemessen. An der untersten Position (0,5 m) ist besonders bei 1.200 1/min die hohe Geschwindigkeit von 27,5 cm/s auffällig. Diese ist an gleicher Stelle bei 900 1/min mit 6,1 cm/s um 78 % geringer. Mit dem Einsetzen der Fütterung und der Erhöhung des TS-Gehaltes auf 7,35 % reduzierten sich die höchsten Durchschnittsgeschwindigkeiten im Vergleich zur ersten Woche um bis zu 77 % auf Geschwindigkeiten unter 4,0 cm/s (900 1/min) und um 74 % auf unter 7,2 cm/s (1.200 1/min). In der zweiten und dritten Woche wurden unterhalb von 2,0 m nahezu keine Strömungen mehr gemessen. Der „Bauch“

verschob sich nach oben auf eine Höhe von 3,5 m. In der dritten Woche wurden im Vergleich zur zweiten Woche in den Höhen oberhalb von 2,5 m höhere Geschwindigkeiten von bis zu 6,5 cm/s (900 1/min) und 7,7 cm/s (1.200 cm/s) gemessen, obwohl der TS-Gehalt in der dritten Woche auf 8,36 % deutlich gestiegen ist. Der TS-Gehalt erhöhte sich in der vierten Woche nur minimal auf 8,38 %. Die Geschwindigkeiten verringerten sich im Vergleich zur dritten Woche jedoch deutlich. In der vierten und fünften Woche konnten nahezu keine Strömungen mehr gemessen werden.

Schleuse 1.3 befand sich in Strömungsrichtung direkt vor dem Rührwerk, d.h. im „Ansaugbereich“. Dadurch wurde die Strömung an dieser Stelle, besonders in der ersten Woche, stark beeinflusst. Die erste Messung zeigte durchschnittliche Geschwindigkeiten von 8,4 cm/s bis 15,2 cm/s (900 1/min) und 7,7 cm/s bis 20,6 cm/s (1.200 1/min). Nach einem Anstieg des TS-Gehaltes auf 7,35 % reduzierten sich die höchsten Geschwindigkeiten in der zweiten Woche um 81 % auf unter 2,9 cm/s (900 1/min) und um 65 % auf unter 7,2 cm/s (1.200 1/min). Wie auch bei Kolb (2016) wurden in den mittleren Höhen im Fermenter die höchsten Geschwindigkeiten ermittelt. In der vierten und fünften Woche konnten nur noch in den Höhen von 2,5 m und 3,0 m geringe Geschwindigkeiten von 1,7 cm/s bis 2,0 cm/s gemessen werden.

An **Schleuse 2.2**, welche sich im mittleren Radius des Fermenters befand, wurde ein niedrigeres Geschwindigkeitsniveau als in den äußeren Radien im Fermenter (Schleuse 1.1 und 1.3), besonders bei einem sehr niedrigen TS-Gehalt von 5,83 %, festgestellt. Die maximalen Geschwindigkeiten sind in der ersten Woche im Vergleich zu Schleuse 1.1 mit 7,0 cm/s um 59 % (900 1/min) und mit 7,8 cm/s um 72 % (1.200 1/min) geringer. Nach der Erhöhung des TS-Gehaltes auf 7,35 % in der zweiten Woche und auf 8,36 % in der dritten Woche konnten nahezu keine Geschwindigkeiten mehr gemessen werden. Die maximalen Geschwindigkeiten lagen im Schnitt weder bei 900 1/min noch bei 1.200 1/min über 3,0 cm/s. In der vierten und fünften Messwoche konnten keine Strömungen gemessen werden.

Schleuse 2.4 befand sich in Strömungsrichtung hinter dem Rührwerk, weshalb hohe Strömungsgeschwindigkeiten erwartet wurden. Es konnten allerdings keine Geschwindigkeiten über 5,0 cm/s gemessen werden. Eine Ausnahme stellte die Höhe 3,5 m mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 9,8 cm/s (900 1/min) in der zweiten Woche dar. Dies war zudem die höchste Geschwindigkeit, die in der zweiten Messwoche gemessen wurde. Auffällig war, dass bei einem TS-Gehalt von 7,35 % teilweise höhere Geschwindigkeiten gemessen wurden als bei 5,83 %. Bei 900 1/min waren dies die Höhen 3,5 m, 2,0 m und 1,5 m. Bei 1.200 1/min

waren es die Höhen unterhalb von 2,0 m. Ab der dritten Woche konnten keine Geschwindigkeiten mehr gemessen werden.

Schleuse 3.1 befand sich im „Schatten“ der Mittelsäule, weshalb vermutlich die niedrigsten Strömungsgeschwindigkeiten gemessen wurden. Auffällig war, dass die maximalen Geschwindigkeiten bei 1.200 1/min um 59 % geringer waren als bei 900 1/min. In der ersten Woche konnten bei 900 1/min oberhalb von 2,0 m deutlich höhere Geschwindigkeiten gemessen werden als bei 1.200 1/min, auf der Höhe von 3,5 m sogar durchschnittlich 7,5 cm/s. Bei 1.200 1/min konnten nur Geschwindigkeiten unter 3,1 cm/s gemessen werden. Ab einem TS-Gehalt von 7,35 % konnten bei beiden Drehzahlen keine Durchschnittsgeschwindigkeiten über 2,0 cm/s ermittelt werden.

Schleuse 3.3 befand sich wie Schleuse 3.1 auf dem innersten Radius im Fermenter. Es konnten während des ganzen Versuchszeitraumes an dieser Stelle keine Geschwindigkeiten über 3,0 cm/s (900 1/min) und 5,9 cm/s (1.200 1/min) gemessen werden. Dies bestätigt, dass die Geschwindigkeiten von den äußeren (Schleuse 1.1 und 1.3) zu den inneren Radien (Schleuse 3.1 und 3.3) abnehmen. Auffällig sind die nahezu identischen Geschwindigkeiten der zweiten und dritten Woche. Bei 900 1/min befanden sich sogar die ersten drei Messwochen auf demselben Geschwindigkeitsniveau. Dies konnte an keiner anderen Schleuse festgestellt werden. In der vierten und fünften Woche konnten nahezu keine Strömungen mehr aufgezeichnet werden.

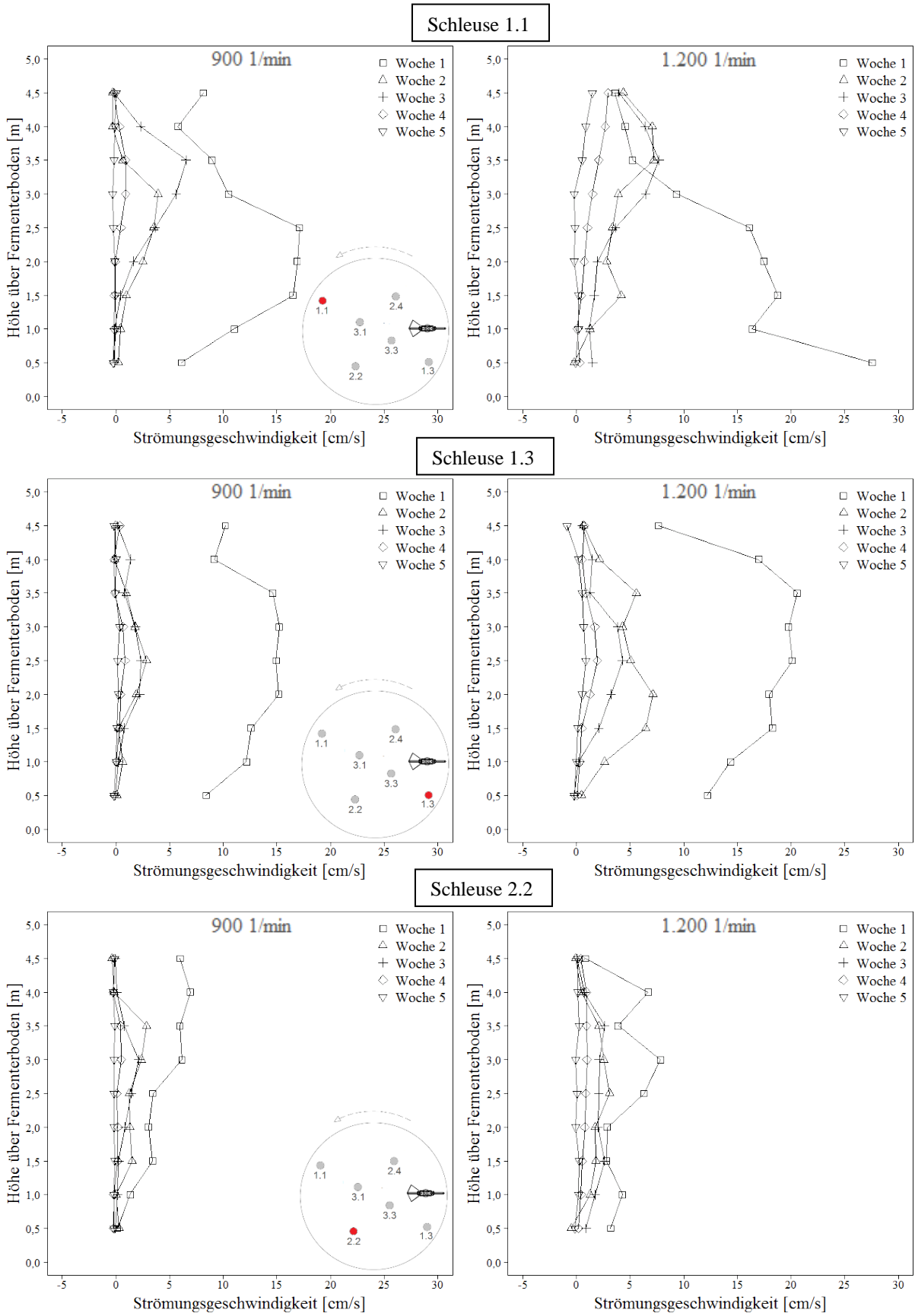


Abbildung 25: Strömungsgeschwindigkeiten an den Schleusen 1.1, 1.3 und 2.2 bei 900 1/min (links) und 1.200 1/min (rechts)

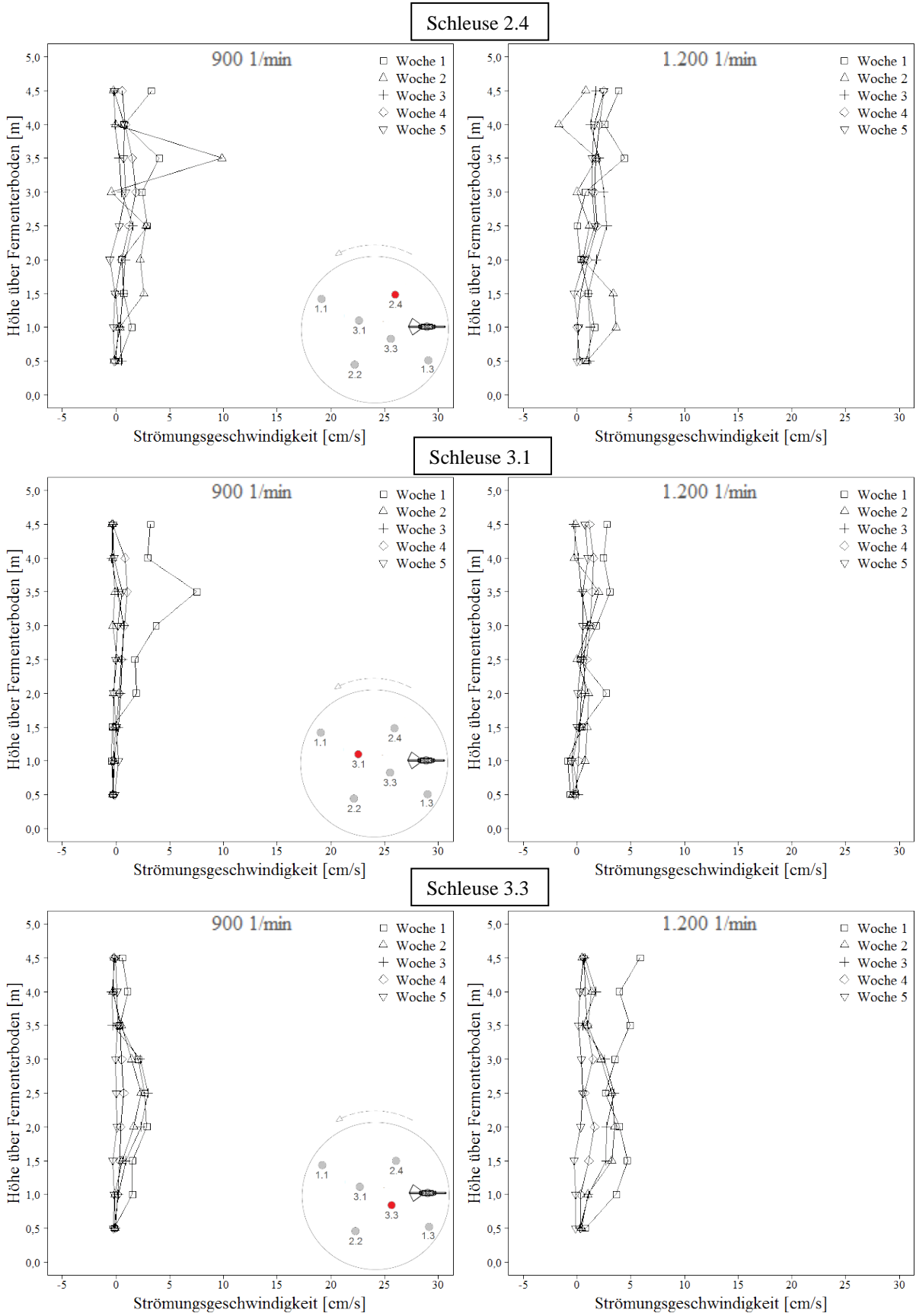


Abbildung 26: Strömungsgeschwindigkeiten an den Schleusen 2.4, 3.1 und 3.3 bei 900 1/min (links) und 1.200 1/min (rechts)

In der ersten Messwoche waren die Geschwindigkeiten in den äußeren Rädern (Schleuse 1.1 und 1.3) deutlich höher als an den anderen Schleusen (**Abbildung 26**). Die höchsten Geschwindigkeiten der äußeren Rädern von bis zu 17,1 cm/s (900 1/min) und 27,5 cm/s (1.200 1/min) reduzierten sich in den mittleren und inneren Rädern um 56 % auf 7,5 cm/s (900 1/min) und um 72 % auf 7,7 cm/s (1.200 1/min). Mit Ausnahme der Schleuse 1.1 bei 1.200 1/min können in der ersten Woche abnehmende Geschwindigkeiten in Richtung des Fermenterbodens festgestellt werden. Nach der ersten Fütterung wurden am Fermenterboden nahezu keine Geschwindigkeiten mehr gemessen. Mit zunehmendem TS-Gehalt glichen sich die Geschwindigkeiten aneinander an. In der dritten Messwoche konnte an allen Schleusen ein ähnlicher Geschwindigkeitsverlauf mit den höchsten Geschwindigkeiten in den mittleren Höhen von bis zu 3,0 cm/s (900 1/min) und 4,3 cm/s (1.200 1/min) festgestellt werden. Eine Ausnahme bildete Schleuse 1.1 mit Geschwindigkeiten bis zu 6,5 cm/s (900 1/min) und 7,7 cm/s (1.200 1/min) in den Höhen oberhalb von 2,5 m. Von der ersten zur dritten Woche konnte eine Verringerung der höchsten Geschwindigkeiten um 62 % von 17,1 cm/s auf 6,5 cm/s (900 1/min) und um 72 % von 27,5 cm/s auf 7,7 cm/s (1.200 1/min) festgestellt werden. Nach einem Anstieg des TS-Gehaltes von 5,83 % auf 8,95 % in der fünften Woche konnten nahezu keine Geschwindigkeiten mehr gemessen werden. Die einzige Geschwindigkeit über 1,5 cm/s wurde nahe der Oberfläche auf der Höhe von 4,5 m bei der Drehzahl von 1.200 1/min gemessen. Bei hohen TS-Gehalten konnten weder bei 900 1/min noch bei 1.200 1/min horizontale Strömungen ermittelt werden.

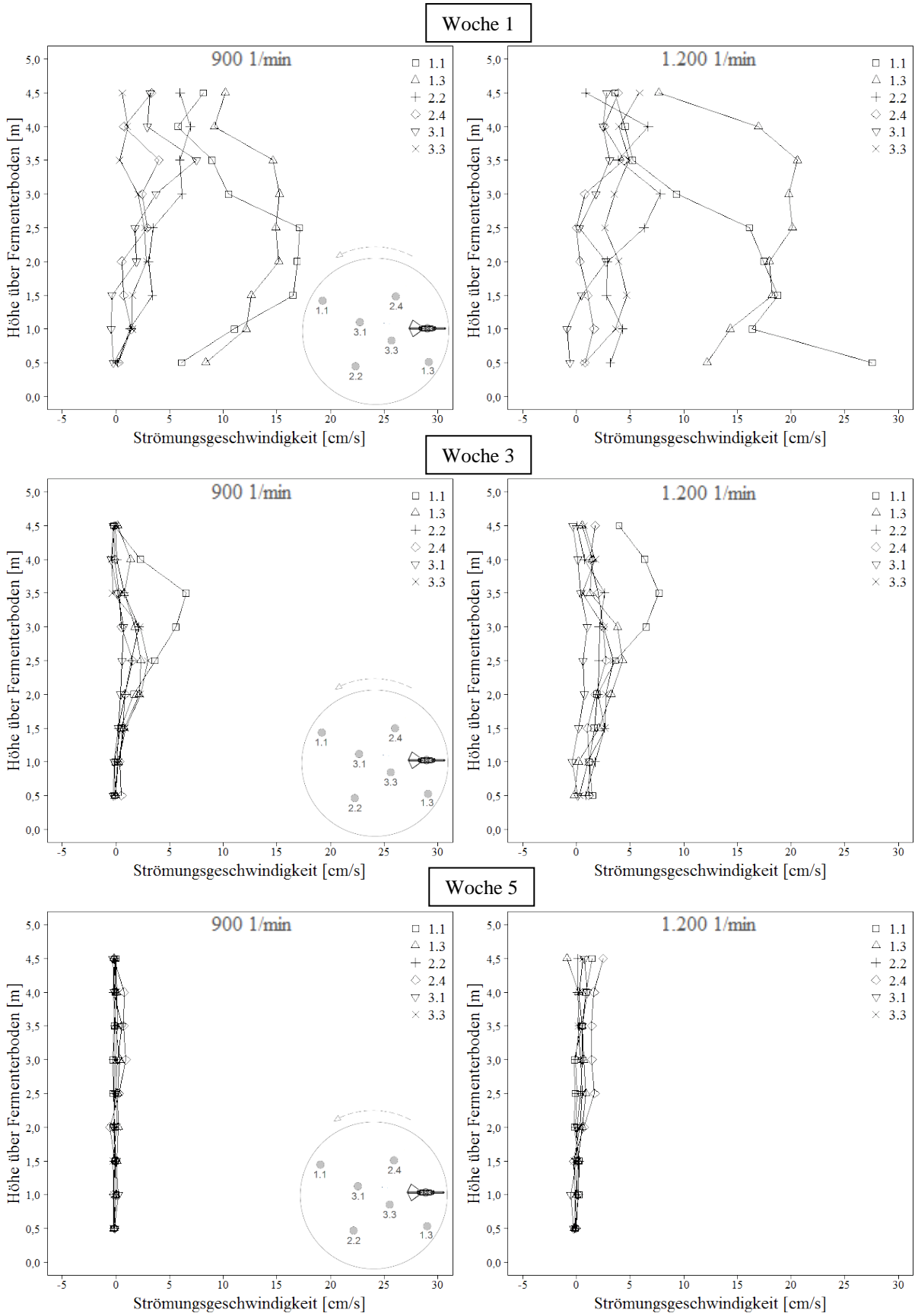


Abbildung 27: Strömungsgeschwindigkeiten in der ersten, dritten und fünften Woche bei 900 1/min (links) und 1.200 1/min (rechts)

In der zweiten Messwoche kam es gehäuft zur Bildung einer Schwimmschicht während den Messungen (**Abbildung 28**). Deshalb musste mehrmals mit dem TMR die Schwimmschicht aufgerührt werden, da das bionische Rührwerk alleine nicht in der Lage war, eine Neubildung der Schwimmschichten zu verhindern. Dadurch wurden die Messergebnisse besonders im oberen Bereich des Fermenters in der zweiten Woche verfälscht. Bei 900 1/min konnten in der zweiten Woche oberhalb von 4,0 m nahezu keine Geschwindigkeiten gemessen werden. Vermutlich wurden die Strömungen im oberen Bereich durch die Schwimmschicht abgebremst. Dies erklärt die im Vergleich zur zweiten Woche höheren Geschwindigkeiten in der dritten Woche an Schleuse 1.1 bei 900 1/min oberhalb von 3,0 m.



Abbildung 28: Aufnahme der gebildeten Schwimmschichten durch das Bullauge während den Messungen in der zweiten Woche

Zum Vergleich wurden in der fünften Messwoche die Strömungsgeschwindigkeiten für das TMR und bei einem kombinierten Betrieb aus TMR und dem bionischen Rührwerk gemessen (**Abbildung 29**). Das TMR war auf eine Höhe zwischen 4,0 m und 4,5 m eingestellt. Weil das Rührwerk direkt auf die Schleuse 1.1 gerichtet war, wurden an dieser nahe der Oberfläche hohe Durchschnittsgeschwindigkeiten von 15,8 cm/s (nur TMR) und 15,9 cm/s (TMR und bionisches Rührwerk) gemessen. Bei dem alleinigen Betrieb des TMR konnten an allen anderen Schleusen keine Geschwindigkeiten über 1,5 cm/s aufgezeichnet werden. Kombiniert mit dem bionischen Rührwerk konnte auf der Höhe von 4,0 m eine durchschnittliche Geschwindigkeit

von 6,2 cm/s gemessen werden. Unterhalb von 4,0 m wurden nur noch Geschwindigkeiten unter 2,6 cm/s ermittelt. Dies zeigt, dass auch das TMR bei hohen TS-Gehalten keine Strömungen erzeugt, die über 1,5 cm/s liegen. Allerdings erzeugen schnell drehende TMR bei hohen TS-Gehalten aufgrund der Bildung von Kavernen keine globale Strömung, sondern nur eine lokale Mischwirkung, wie es an Schleuse 1.1 direkt hinter dem TMR der Fall war.

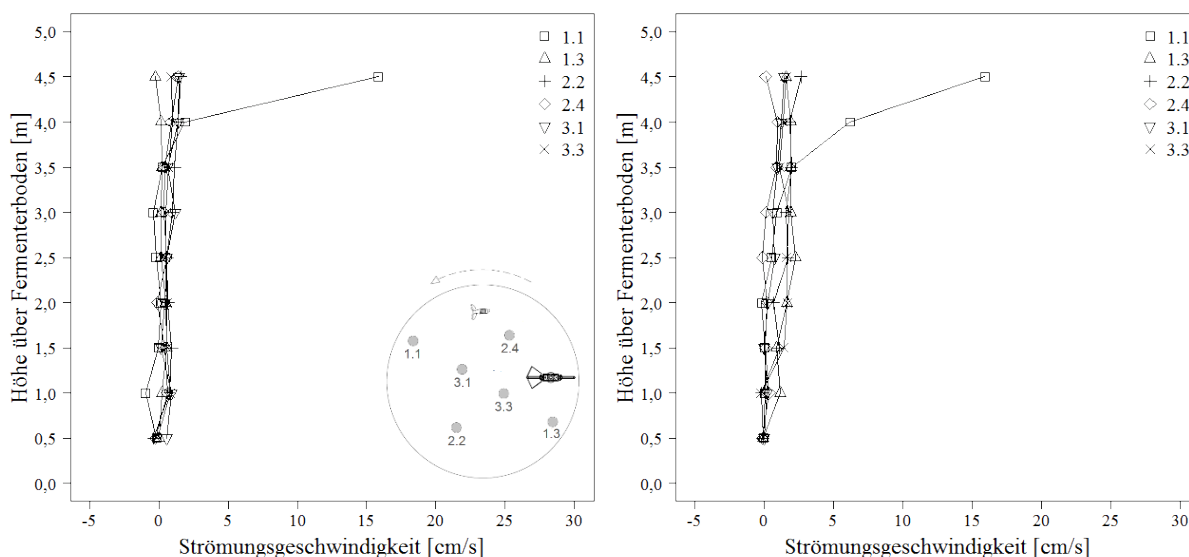


Abbildung 29: Strömungsgeschwindigkeiten in der fünften Woche für das TMR (links) und die Kombination TMR und bionisches Rührwerk bei 1.200 1/min (rechts)

Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in diesem Versuch waren im Vergleich mit den Ergebnissen von Kolb (2016) deutlich geringer (**Tabelle 7**). Bei einem ähnlichen TS-Gehalt von 7,35 % und 7,74 % (Kolb 2016) sind die Geschwindigkeiten um 85 % (900 1/min) und 89 % (1.200 1/min) niedriger als bei Kolb (2016). Bei einem TS-Gehalt von 10,75 % konnten bei Kolb (2016) noch Geschwindigkeiten von bis zu 38 cm/s gemessen werden. In den Versuchen mit dem bionischen Rührwerk waren die Geschwindigkeiten selbst bei einem TS-Gehalt von 5,83 % in der ersten Woche 55 % (900 1/min) bzw. 28 % (1.200 1/min) unter denen von Kolb (2016) bei einem TS-Gehalt von 10,75 %. Bereits bei einem TS-Gehalt von 8,95 % konnten sowohl bei 900 1/min als auch bei 1.200 1/min nahezu keine Strömungen mehr gemessen werden. Dies zeigt, dass eine Vorzerkleinerung des Substrates die Strömungsgeschwindigkeiten vermutlich stark beeinflusst. Werden die Ergebnisse der Strömungsgeschwindigkeiten eines Fermenters mit und eines Fermenters ohne Vorzerkleinerung gegenübergestellt, erkennt man große Unterschiede der Geschwindigkeiten (Tabelle 7). Vermutlich konnten aufgrund der Vor-

zerkleinerung des Substrates und somit eines homogenen Fermenterinhalt mit geringerem Faseranteil bei Kolb (2016) höhere Geschwindigkeiten gemessen werden. Ein Vergleich der Ergebnisse führt aufgrund dieser unterschiedlichen Ausgangssituation zu Problemen. Eine vergleichende Beurteilung beider Rührsysteme ist somit nur unzureichend möglich. Untersuchungen in einem Fermenter ohne Vorzerkleinerung wurden in diesem Umfang wie für das bionische Rührwerk noch nie zuvor durchgeführt. Lediglich Debera (2016) führte erste Untersuchungen im selben Fermenter ohne Vorzerkleinerung durch, um die Eignung des verwendeten Messgerätes zu prüfen. Diese Messungen wurden bei einem durchschnittlichen TS-Gehalt von 10,44 % durchgeführt, welcher mit dem TS-Gehalt von 10,75 % bei Kolb (2016) in der sechsten Woche vergleichbar ist. Auch hier zeigten sich im Vergleich zu Kolb (2016) um 84 % geringere Durchschnittsgeschwindigkeiten von maximal 6,0 cm/s. Dies verdeutlicht erneut den großen Einfluss einer Vorzerkleinerung des Substrates.

Tabelle 7: Vergleich der maximalen Geschwindigkeiten bei 900 1/min, 1.200 1/min und Kolb (2016) in Abhängigkeit des TS - Gehaltes

TS-Gehalt [%]	WUSOA		Kolb (2016)	
	900 1/min [cm/s]	1.200 1/min [cm/s]	TS-Gehalt [%]	[cm/s]
5,83	17,1	27,5	NA	NA
7,35	9,8	7,2	7,74	63,8
8,38	6,5	7,7	8,19	78,6
8,95	0,9	2,5	9,13	81,8
NA	NA	NA	10,75	37,4

Mit der Methode der Prozess-Tomographie wurden am Fraunhofer IKTS das neu entwickelte bionische Rührwerk der Firma Wusoa GmbH im Technikumsmaßstab bei gleicher Positionierung im Behälter die vertikalen Strömungen sowie das Einmischverhalten untersucht. Dieses Messverfahren wird verwendet, um Rührwerke auf ihre Mischgüte hin zu untersuchen. Ziel war es, die mittels der Prozess-Tomographie gewonnenen, hoch aufgelösten Daten mit den eigenen Ergebnissen zu vergleichen. Für die Versuche wurde das partikelfreie Modellfluid Carboxymethylcellulose verwendet. Dieses zeigt strukturviskose Fließeigenschaften und ist, abgesehen vom Partikelanteil, mit Biogassubstrat vergleichbar. Mit diesem Versuchsaufbau wurden im Gegensatz zu den Praxisversuchen mit dem magnetisch-induktiven Messsensor der Firma OTT

Hydromets GmbH nicht die horizontalen, sondern die axialen Geschwindigkeitsprofile, d.h. Geschwindigkeiten in vertikaler Richtung, untersucht. Die Durchmischung in horizontaler Richtung wurde beobachtet und dokumentiert. Die Leitfähigkeitsunterschiede, welche an sechs horizontalen Sensorebenen gemessen wurden, erlauben eine Bewertung des Einmischverhaltens. Dazu wurden dem Reaktorinhalt von ca. 600 Litern jeweils drei Liter einer dispersen Phase mit einer um 30 mS/cm höheren Leitfähigkeit zugegeben. Der hohe Lufteintrag des bionischen Rührwerkes in das Reaktorfluid erschwerte die Messungen. In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die zugegebene disperse Phase nicht sofort in den Fermenter eingehört wird, da diese die Leitfähigkeit in den Ebenen nahe des Bodens stärker erhöhte als die Leitfähigkeit der darüber liegenden Ebenen (**Abbildung 30**). Die Phase mit einer höheren Leitfähigkeit sammelte sich zunächst auf dem Reaktorboden. Es konnten zwar Bewegungen des Fluides an der Oberfläche und in den Bereichen nahe des Rührwerkes optisch beobachtet werden, Bewegungen an der gegenüberliegenden Reaktorseite und am Reaktorboden waren nahezu nicht zu erkennen. Die Durchmischung des bionischen Rührwerkes wurde von der Fraunhofer IKTS als „ungenügend“ beschrieben. In den Praxisversuchen konnte ebenfalls eine Abnahme der Geschwindigkeiten in Richtung des Fermenterbodens gemessen werden. Auch die optischen Beobachtungen der Bewegungen an der Oberfläche des Behälters und um die Paddel des Rührwerkes während der prozesstomographischen Untersuchungen decken sich mit den Ergebnissen im Praxisversuch. Das bionische Rührwerk konnte nur sehr geringe vertikale Geschwindigkeiten erzeugen, die fast im kompletten Reaktorbehälter unter 0,5 m/s lagen (Abbildung 27). Eine positive bzw. negative Strömungsgeschwindigkeit bedeutet dabei eine nach oben bzw. unten gerichtete Strömung. Bei einer Scherrate unter 60 1/s wurde eine Viskosität von ca. 4,0 Pas gemessen. Im Vergleich zu den Praxisversuchen, in denen eine maximale Viskosität von 1,29 Pas gemessen wurde, war die Viskosität deutlich höher (Fraunhofer IKTS Dresden 2016). Wird in den Praxisversuchen die Viskosität um das Dreifache erhöht, um die gleichen Bedingungen wie bei den prozesstomographischen Untersuchungen vorauszusetzen, wird eine deutliche Reduzierung der ohnehin schon niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten erwartet. Zudem könnte diese Erhöhung der Viskosität zur Bildung von Kavernen und Totzonen im Fermenter führen. Erstmals wurden Messergebnisse aus Laborversuchen auf den Praxismaßstab übertragen. Es zeigt sich, dass die Tendenzen bestätigt werden, die Messmethoden jedoch überprüft und einander angepasst werden müssen. Weitere Forschungsarbeiten sind hierbei zwingend notwendig.

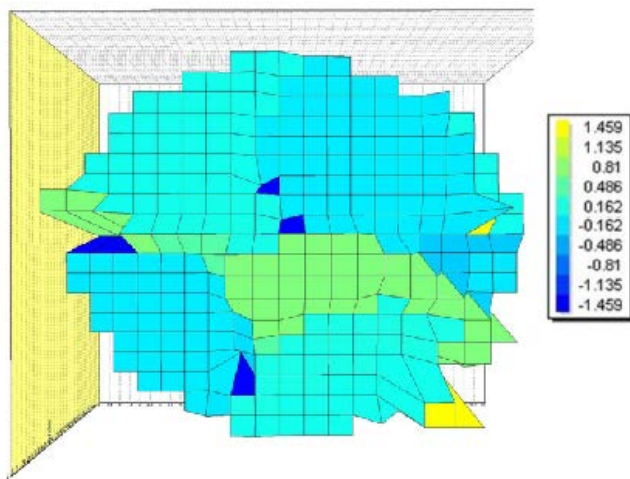


Abbildung 30: Axiales Geschwindigkeitsprofil in m/s für das bionische Rührwerk (Fraunhofer IKTS Dresden 2016)

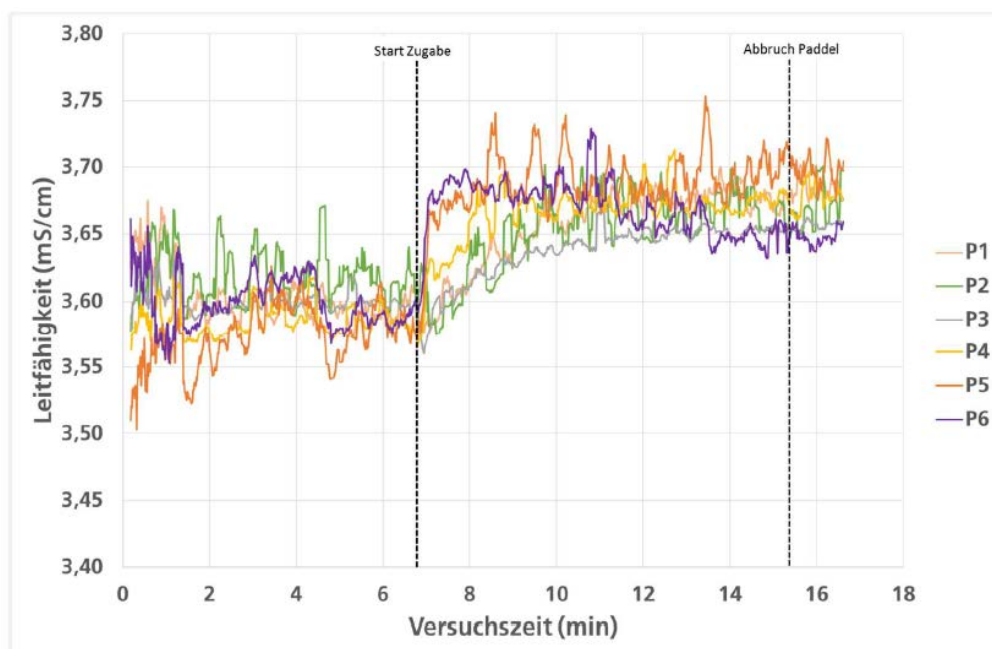


Abbildung 31: Leitfähigkeitsänderungen nach der Zugabe der dispersen Phase bei dem Versuch mit dem bionischen Rührwerk (Fraunhofer IKTS Dresden 2016)

4.1.4 Abkling- und Anfahrzeiten

Die Abkling- und Anfahrzeiten können für die Beurteilung von intervallbetriebenen Rührwerken herangezogen werden. Kurze Anfahr- und lange Abklingzeiten bieten ideale Voraussetzungen für eine optimale Durchmischung im Intervallbetrieb. Das Biogassubstrat soll zum einen

nach einer Rührpause möglichst schnell auf die maximale Geschwindigkeit beschleunigt werden, zum anderen nach einem Rührvorgang möglichst lange in Bewegung bleiben.

Während des Versuchszeitraumes wurden die Abkling- und Anfahrzeiten nur in den ersten vier Wochen gemessen, da in der fünften Woche keine Strömungen und somit keine Anfahr- und Abklingzeiten ermittelt werden konnten. Die Abklingzeiten bei der Umdrehungszahl von 1.200 1/min sind mit wenigen Ausnahmen länger als bei 900 1/min (**Tabelle 8 und 9**). Die längsten Zeiten von bis zu 1.120 s wurden an Schleuse 1.1 bei 1.200 1/min auf der mittleren Höhe von 2,5 m ermittelt. Diese Schleuse befand sich am Eintrag und war somit am weitesten von dem Rührwerk entfernt. Wie auch bei den Untersuchungen von Kolb (2016) wurden während des gesamten Versuchszeitraumes in den mittleren Höhen die längsten Abklingzeiten gemessen. Mit Ausnahme der Schleuse 2.2 bei 900 1/min wurden auf jeder Höhe in dem äußersten Radius im Fermenter (Schleuse 1.1) die längsten Abklingzeiten gemessen. In der ersten Woche wurden beispielsweise bei einer Umdrehungszahl von 1.200 1/min an der äußeren Messstelle 1.1 Zeiten zwischen 330 s und 1.120 s ermittelt, in dem innersten Radius (Schleuse 3.3) hingegen nur Zeiten zwischen 155 s und 285 s. Auf der Höhe von 2,5 m war dies eine Verkürzung der Zeit um 74 %. Besonders interessant waren die Abklingzeiten an Schleuse 2.2 auf der Höhe von 2,5 m bei 1.200 1/min, da in der ersten Woche über eine Dauer von 470 s eine nahezu konstante Geschwindigkeit zwischen 1,4 cm/s und 2,0 cm/s gemessen wurde. Dies konnte auch bei 900 1/min an derselben Messposition bestätigt werden. Die Ausbildung konstanter Geschwindigkeiten über diese Dauer konnte während des Abklingens an keiner weiteren Messstelle beobachtet werden. Da sich diese Messposition auf der mittleren Höhe und im mittleren Radius des Fermenters befand, wurde die Strömung vermutlich nicht von der Fermenterwand, dem Fermenterboden sowie der Mittelsäule beeinflusst und abgebremst. Zwischen der ersten und der zweiten Woche verkürzten sich die Zeiten deutlich. Die längsten Zeiten in der ersten Woche von bis zu 1.120 s an Schleuse 1.1 (1.200 1/min) reduzierten sich in der zweiten Woche auf 100 s, eine Verringerung um 91 %. An Schleuse 3.3, die sich im innersten Radius des Fermenters befand, konnten ab der zweiten Woche bei beiden Drehzahlen nur noch in den mittleren Höhen Abklingzeiten gemessen werden. Im Vergleich zu Woche zwei änderten sich die Zeiten in der dritten Woche nur minimal. Bei 900 1/min erhöhten sich die Zeiten von der zweiten zur dritten Woche an Schleuse 2.2 in der mittleren Höhe von 0 s auf 370 s. Dieser Wert kommt der Zeit von 545 s in der ersten Woche sehr nahe. Dies konnte an keiner weiteren Messstelle bestätigt werden. In der vierten Woche konnte nur noch bei 1.200 1/min an Schleuse 1.1 an der obersten Höhe von 4,5 m eine kurze Abklingzeit von 30 s gemessen werden. An den Stellen

mit einer Abklingzeit von 0 s wurden zu Beginn der Abschaltung des Rührwerkes Geschwindigkeiten unter 1,5 cm/s gemessen, weshalb nach 0 s ein Stillstand im Fermenter festgestellt wurde. Im Vergleich mit den Ergebnissen von Kolb (2016) sind diese Zeiten besonders ab der zweiten Woche deutlich kürzer. Bei einem TS-Gehalt von 10,75 % konnten bei Kolb (2016) Abklingzeiten zwischen 60 s und 80 s gemessen werden, wohingegen in dieser Ausarbeitung schon bei einem TS-Gehalt von 8,38 % keine Abklingzeiten mehr ermittelt werden konnten. Dieser große Unterschied ist nicht alleine auf die unterschiedliche Rührtechnik zurückzuführen, sondern vermutlich auf die Vorzerkleinerung des Substrates, wodurch der Inhalt des Fermenters homogener und fließfähiger wird.

Tabelle 8: Abklingzeiten über den Versuchszeitraum bei 900 1/min

Position	Woche 1 [s]	Woche 2 [s]	Woche 3 [s]	Woche 4 [s]
1.1 - 4,5 m	725	0	0	0
1.1 - 2,5 m	1.060	385	50	0
1.1 - 0,5 m	105	0	0	0
2.2 - 4,5 m	525	0	0	0
2.2 - 2,5 m	545	0	370	0
2.2 - 0,5 m	125	110	0	0
3.3 - 4,5 m	295	0	0	0
3.3 - 2,5 m	300	280	55	0
3.3 - 0,5 m	0	0	0	0
StABW	339,3	146,6	121,1	0,0

Tabelle 9: Abklingzeiten über den Versuchszeitraum bei 1.200 1/min

Position	Woche 1 [s]	Woche 2 [s]	Woche 3 [s]	Woche 4 [s]
1.1 - 4,5 m	920	50	45	30
1.1 - 2,5 m	1.120	100	55	0
1.1 - 0,5 m	330	0	55	0
2.2 - 4,5 m	530	0	0	0
2.2 - 2,5 m	890	30	45	0
2.2 - 0,5 m	150	0	0	0
3.3 - 4,5 m	285	0	0	0
3.3 - 2,5 m	235	90	55	0
3.3 - 0,5 m	155	0	0	0
StABW	370,7	40,9	27,2	10,0

Im Vergleich zwischen den Schleusen bei 1.200 1/min waren an Schleuse 1.1 in der ersten Woche die Geschwindigkeiten bis zu 22,7 cm/s und Abklingzeiten bis zu 1120 s deutlich höher als bei den anderen (**Abbildung 32**). Die niedrigsten Geschwindigkeiten und kürzesten Abklingzeiten wurden an Schleuse 3.3 ermittelt. Es kann also eine Abnahme der Geschwindigkeiten sowie der Abklingzeiten von den äußeren Radien hin zu den inneren Radien beobachtet werden. In Anlehnung an Kolb (2016) haben die Kurven der Abklingzeiten in der ersten Woche die Form einer Hyperbel. Diese Hyperbelform ging wie in den Untersuchungen von Kolb (2016) bei einem steigenden TS-Gehalt in eine lineare Form über, bis in der vierten Woche nahezu keine Abklingzeiten mehr festgestellt werden konnten (**Abbildung 32**).

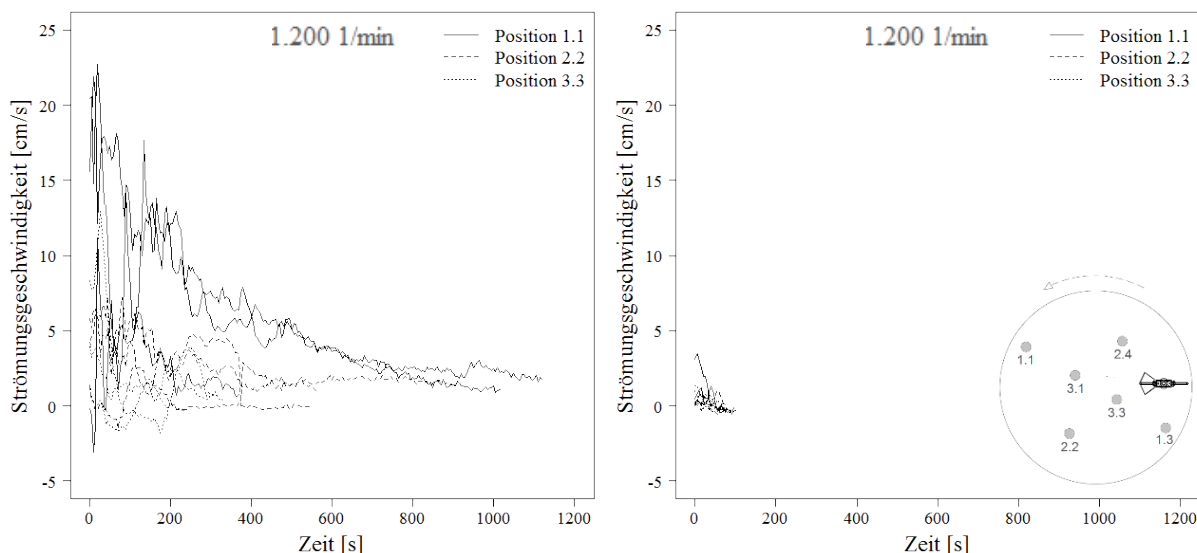


Abbildung 32: Abklingzeiten in der ersten Woche (links) und vierten Woche (rechts) bei 1.200 1/min

Bei den Abklingzeiten konnte eine genaue Geschwindigkeit von 1,5 cm/s als Endgeschwindigkeit definiert werden. Die Bestimmung der Anfahrzeiten gestaltete sich schwieriger als die der Abklingzeiten, da hier keine Geschwindigkeit als Endpunkt definiert werden konnte. Die Anfahrzeiten mussten jeweils abgeschätzt werden. Besonders in der ersten Woche auf den Höhen von 4,5 m war es aufgrund der großen Geschwindigkeitsschwankungen schwierig, eine Anfahrzeit zu bestimmen. Ab der zweiten Woche konnte oft keine Anfahrzeit mehr bestimmt werden, da entweder nur Geschwindigkeiten unter 1,5 cm/s gemessen werden konnten oder diese nur kurzzeitig über 1,5 cm/s waren.

Die ersten Messungen bei einem TS-Gehalt von 5,83 % zeigten die kürzesten Anfahrzeiten (**Tabelle 10** und **Tabelle 11**) von 82 s (900 1/min) und 56 s (1.200 1/min). Die längste Anfahrzeit von 500 s wurde in der ersten Woche bei 1.200 1/min an Schleuse 3.3 an der untersten Höhe von 0,5 m gemessen. Die ermittelten Anfahrzeiten waren bei der niedrigeren Drehzahl von 900 1/min jeweils höher als bei 1.200 1/min. An Schleuse 1.1 auf der Höhe von 4,5 m war die Anfahrzeit bei der höheren Drehzahl um 56 % geringer als bei 900 1/min. Besonders auffällig waren die Anfahrzeiten an Schleuse 3.3 auf der Höhe von 0,5 m bei 1.200 1/min. 76 s bis 180 s nach dem Anschalten des Rührwerkes wurden Geschwindigkeiten bis zu 8,3 cm/s gemessen. Bei der Messung der Strömungsgeschwindigkeiten wurde an dieser Messposition zuvor eine Durchschnittsgeschwindigkeit von nur 0,8 cm/s ermittelt. Die Einzelwerte schwankten dabei nur zwischen -1,0 cm/s und 2,6 cm/s. Die höchsten gemessenen Geschwindigkeiten waren somit um 69 % geringer als die während des Anfahrens. Dies lässt vermuten, dass an dieser

Position nur während des Anfahrens hohe Strömungsgeschwindigkeiten gemessen werden können. Denn ca. 500 s nach dem Anschalten des Rührwerkes stellten sich Geschwindigkeiten zwischen -0,5 cm/s und 2,0 cm/s ein. Da sich diese Zeiten mit denen der Geschwindigkeitsmessung deckten, wurde hier eine hohe Anfahrzeit von 500 s ermittelt. In der zweiten Woche bei einem TS-Gehalt von 7,35 % konnten bei 900 1/min keine Anfahrzeiten ermittelt werden, da nur Geschwindigkeiten unter 1,5 cm/s gemessen werden konnten. Bei 1.200 1/min konnten in der zweiten Woche nur in den Höhen von 2,5 m und 0,5 m Anfahrzeiten zwischen 72 s und 100 s ermittelt werden. In der dritten Messwoche wurden bei 900 1/min nur in den mittleren Höhen von 2,5 m Anfahrzeiten zwischen 104 s und 148 s gemessen. Bei 1.200 1/min wurden dagegen Zeiten zwischen 82 s und 132 s ermittelt. In der vierten Woche konnten keine Geschwindigkeiten über 1,5 cm/s gemessen und somit keine Anfahrzeiten ermittelt werden. Eine Ausnahme war, wie auch schon bei den Abklingzeiten, die Schleuse 1.1 auf der Höhe von 4,5 m bei 1.200 1/min mit einer Anfahrzeit von 122 s.

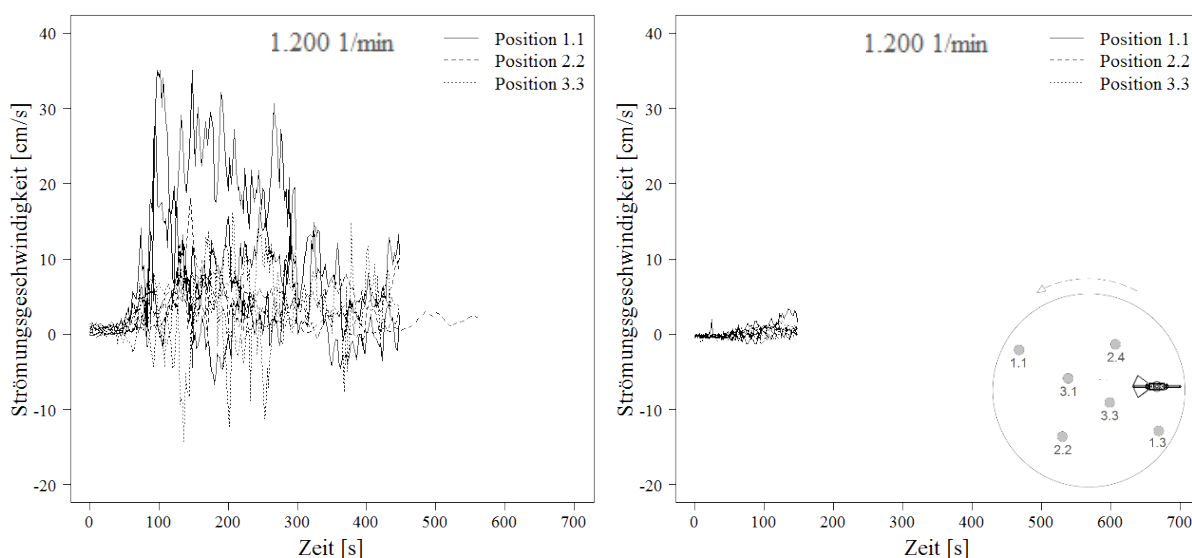
Tabelle 10: Anfahrzeiten über den Versuchszeitraum bei 900 1/min

Position	Woche 1 [s]	Woche 2 [s]	Woche 3 [s]	Woche 4 [s]
1.1 - 4,5 m	126	-	-	-
1.1 - 2,5 m	90	-	122	-
1.1 - 0,5 m	110	-	-	-
2.2 - 4,5 m	160	-	-	-
2.2 - 2,5 m	110	-	148	-
2.2 - 0,5 m	-	-	-	-
3.3 - 4,5 m	82	-	-	-
3.3 - 2,5 m	88	-	104	-
3.3 - 0,5 m	-	-	-	-
StABW	27,1	-	22,1	-

Tabelle 11: Anfahrzeiten über den Versuchszeitraum bei 1.200 1/min

Position	Woche 1 [s]	Woche 2 [s]	Woche 3 [s]	Woche 4 [s]
1.1 - 4,5 m	56	-	112	122
1.1 - 2,5 m	86	90	112	-
1.1 - 0,5 m	100	94	82	-
2.2 - 4,5 m	94	-	-	-
2.2 - 2,5 m	108	92	98	-
2.2 - 0,5 m	100	100	132	-
3.3 - 4,5 m	72	-	-	-
3.3 - 2,5 m	62	72	98	-
3.3 - 0,5 m	500	-	-	-
StABW	139,6	10,5	17,0	-

Im Vergleich der Anfahrzeiten der ersten Woche stiegen die Geschwindigkeiten an allen Schleusen erst nach 50 s bis 100 s deutlich über 2,0 cm/s (**Abbildung 33**). Dabei ist anzumerken, dass das Rührwerk zwischen 10 s und 15 s benötigte, die eingestellte Drehzahl zu erreichen. In der ersten Woche sind bei 1.200 1/min, wie schon bei den Abklingzeiten, die äußeren Radien mit Geschwindigkeiten bis zu 35,1 cm/s auffallend. In der vierten Woche wurde nur noch an Schleuse 1.1 auf der Höhe von 4,5 m bei 1.200 1/min eine Anfahrzeit von ca. 122 s ermittelt (**Abbildung 31**). An den anderen Höhen und Schleusen wurden in der vierten Woche während des Anfahrens keine Geschwindigkeiten über 1,5 cm/s gemessen.

**Abbildung 33:** Anfahrzeiten der ersten Woche (links) und vierten Woche (rechts) bei 1.200 1/min

4.1.5 Anströmwinkel an den Messschleusen

In der ersten Woche konnten aufgrund der hohen Geschwindigkeiten die Anströmwinkel am besten bestimmt werden. Beispielhaft sind in der **Abbildung 34** die Anströmwinkel an jeder Schleuse auf den Höhen 0,5 m, 2,5 m und 4,5 m bei der Drehzahl von 1.200 1/min dargestellt. Die Linien zeigen jeweils in die Richtung, aus der bei der Einstellung des Messkopfes die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten beobachtet werden konnten. In den äußeren Radien konnten die Anströmwinkel relativ genau bestimmt werden. Die Winkel schwankten in der ersten Woche sowohl bei 900 1/min als auch bei 1.200 1/min auf allen Höhen zwischen 210° und 240° (Schleuse 1.1) und zwischen 30° und 90° (Schleuse 1.3). In den mittleren und inneren Radien nahmen die Spannen der ermittelten Winkel zu.

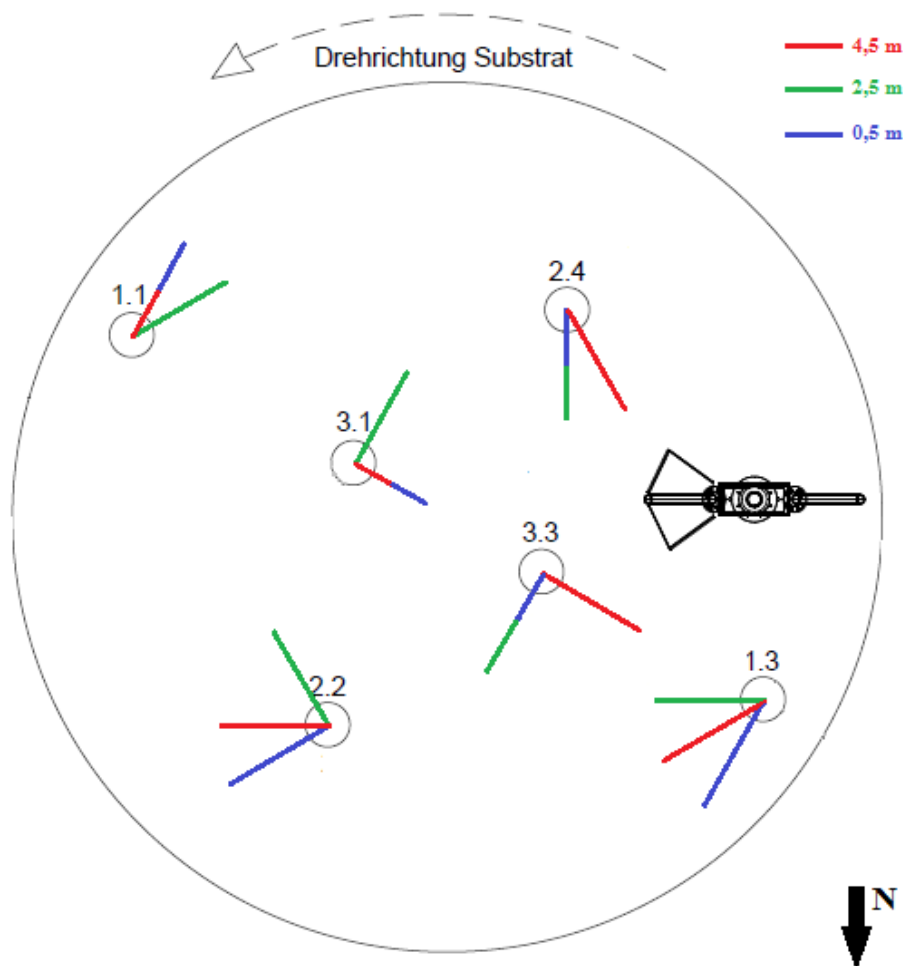


Abbildung 34: Anströmwinkel an den Messschleusen in der ersten Woche in den Höhen 0,5 m, 2,5 m und 4,5 m (1.200 1/min)

In der zweiten Woche konnte der Anströmwinkel an allen Schleusen nicht mehr genau bestimmt werden, da entweder zu niedrige Geschwindigkeiten oder keine Strömungen mehr gemessen werden konnten. Da es bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten nur minimale Unterschiede der Geschwindigkeiten in allen Richtungen gab, konnte häufig keine exakte Strömungsrichtung bestimmt werden. Eine Bewertung der Anströmwinkel in diesem Versuch, besonders ab der zweiten Woche, ist deshalb sehr ungenau. Denn an einigen Positionen konnten in der zweiten Woche keine Strömungen mehr gemessen und somit keine Strömungsrichtungen bestimmt werden. Anzumerken ist, dass die Bestimmung der Anströmwinkel mit diesem Messverfahren nur sehr unpräzise möglich ist. Das Messgerät ist ursprünglich für den Einsatz in Gewässern oder Kanälen gedacht, wo die Strömungsrichtung bekannt ist und manuell ausgerichtet werden kann (OTT Hydromet GmbH 2016). In einem Biogasfermenter ist eine optische Erkennung der Strömungsrichtung und eine genaue Ausrichtung des Messensors nicht möglich. Der Messkopf kann zwar durch Ausprobieren in die Richtung der größten Strömung gedreht werden, eine genaue Ausrichtung ist allerdings nur schwer möglich. Trotz des großzügigen Winkelrasters in 30° Schritten ist es oftmals nicht möglich, die Strömungsgeschwindigkeiten über 60° oder mehr zu unterscheiden. Dies konnte auch schon Kolb (2016) während den Strömungsmessungen feststellen.

4.2 Versuch zur Nährstoffverteilung

4.2.1 Fütterung

Nach Beendigung des ersten Versuches wurde der TS-Gehalt im Fermenter bis kurz vor Versuchsbeginn am 18.10.2016 auf 8,95 % gesteigert. Innerhalb des Versuchszeitraums wurden täglich durchschnittlich 5.198 kg (± 2.106) FM gefüttert. Davon waren durchschnittlich 38,6 % Grassilage, 34,6 % Mist und 18,7 % Maissilage. Insgesamt wurden 322 t Substrat gefüttert, darunter waren 1,6 t Getreide. Die Schwankungen der Massenanteile sowie der täglichen Fütterungsmenge stiegen im späteren Versuchszeitraum durch technische Probleme mit der Fütterung an.

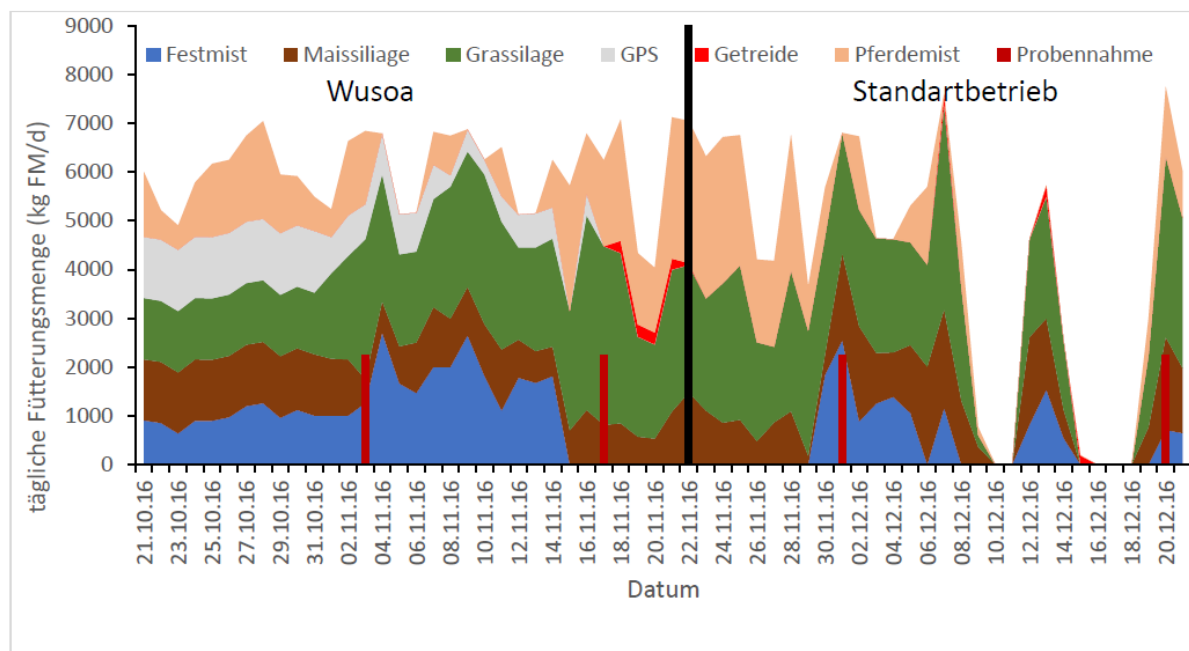


Abbildung 35: Fütterungsübersicht gesamter Versuchszeitraum

Die horizontale Eintragungsschnecke war verbogen. Das führte zu Störmeldungen, deren Ursachen vor allem in der Nacht nicht sofort behoben werden konnten. Am 10.12 und 11.12.2016 fiel die Fütterung aus diesem Grund komplett aus. Ab dem 15.12.2017 fiel die Eintragungstechnik wegen des Ausbaus der alten und der Lieferzeit der neuen Schnecke nochmals für vier Tage aus. Dadurch lag die tägliche Fütterungsmenge im Versuchszeitraum Wusoa vom 21.10.2016 - 21.11.2016 bei $5.971 (\pm 829)$ und während des Standardbetriebs vom 22.11.2016- 21.12.2016 bei $4.330 \text{ kg } (\pm 2.638)$. Ab dem 15.11.2016 sank der Festmistanteil für fast zwei Wochen auf null. Er wurde mit Pferdemist und Grassilage substituiert. Innerhalb der Versuchsvarianten war der Anteil der gefütterten Substrate bis auf GPS, das im zweiten Block nicht mehr verfügbar war, ähnlich verteilt (**Abbildung 35**). Im Versuchszeitraum Wusoa lag der Anteil GPS an der Ration bei durchschnittlich 12,2 %. Bis das Silo am 16.11.2016 geleert wurde, nahm der Anteil an der täglichen Fütterungsmenge ab. Während der Versuche mit dem Wusoa Rührwerk wurden täglich durchschnittlich $1.039 \text{ kg } (\pm 269 \text{ kg})$ Mais gefüttert. Das variiert im Vergleich zum Standardbetrieb mit $967 \text{ kg } (\pm 689 \text{ kg})$ nur geringfügig. Der Input an Pferdemist liegt mit Massen von $1.096 \text{ kg } (\pm 797 \text{ kg})$ im ersten und $953 \text{ kg } (\pm 1.063 \text{ kg})$ im zweiten Versuchszeitraum bei ähnlichen Durchschnittswerten. Die hohen Standardabweichungen, die vor allem im Standardbetrieb auftreten, veranschaulichen nochmals die Schwankungen der Fütterung aufgrund der Eintragungstechnik. Um die Fütterung an den Proben Tagen genauer beurteilen zu können, sind

in **Abbildung 35** und **Abbildung 37** die stündlichen Fütterungsmengen am Probenstag und Probenvortag dargestellt. Während der ersten Wiederholung im Versuchsaufbau Wusoa konnte eine relativ konstante Fütterung erreicht werden.

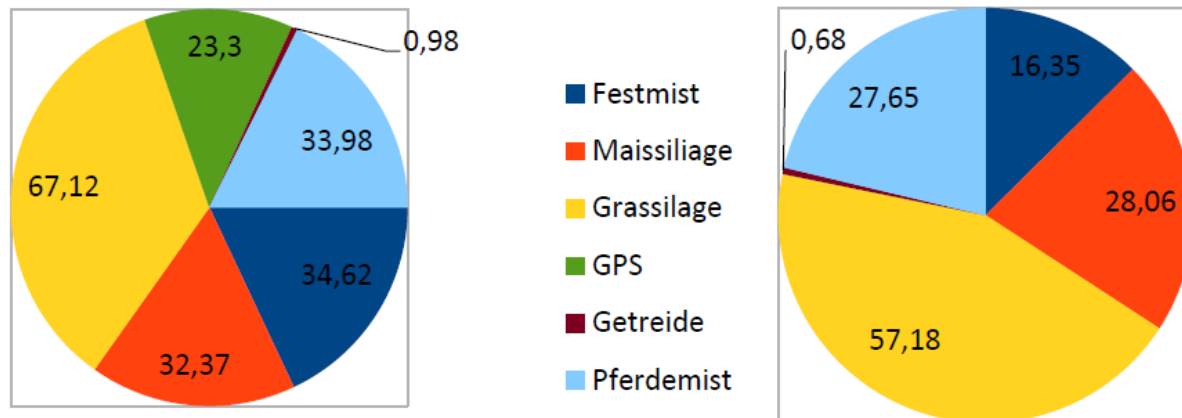


Abbildung 36: Fütterung Versuchszeitraum; links: Wusoa (t FM), rechts: Standardbetrieb (t FM)

Nur in einem Fütterungsintervall am Tag vor der Probenahme wurde nicht die komplette Menge eingebracht (**Abbildung 37**). Während der zweiten Wiederholung funktionierte die Fütterung am Probenvortag problemlos. Doch am Probenstag kam es am frühen Morgen und am Vormittag zu Störungen. Dadurch wurde in fünf Fütterungsintervallen gar kein Substrat eingebracht. Gegen Mittag wurden dafür innerhalb einer Stunde mehr als 600 kg gefüttert, was der doppelten stündlichen Ration entspricht.

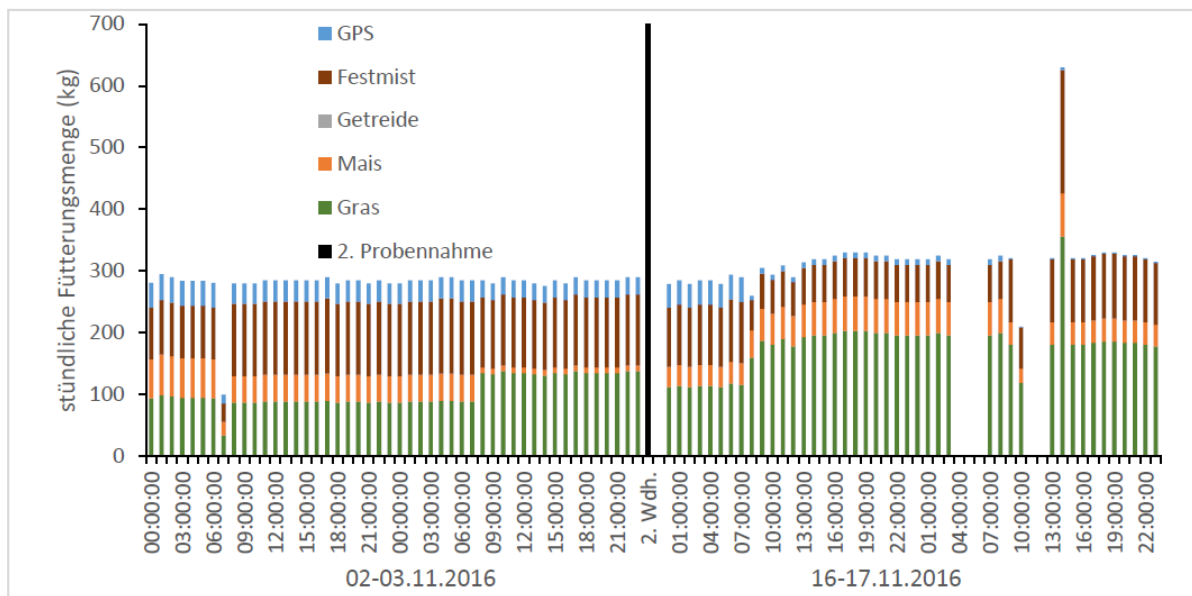


Abbildung 37: Fütterung an den Probetagen Wusoa. Links: stündliche Fütterungsmenge 02. - 03.11.2016; rechts: stündliche Fütterungsmenge 16. - 17.11.2016

Während der Probennahmen für den Standardbetrieb war die Substratzufuhr wesentlich unregelmäßiger. In der ersten Wiederholung setzte die Fütterung am Probenvortag drei Mal aus. In der darauffolgenden Nacht fiel sie ebenfalls mehrmals aus. Meist konnte nicht mal ein Drittel der vorgesehenen Menge eingebracht werden. Gegen 8 Uhr am Probetag konnte die Störung von einem Techniker behoben werden. Bis auf einen Peak um 15 Uhr wurden anschließend die angestrebten Mengen gefüttert. Vor der zweiten Wiederholung musste die verbogene Eintragschnecke erneuert werden. Deshalb konnte vier Tage lang kein Substrat eingebracht werden. Erst gegen 16 Uhr am Probenvortag konnte der Eintrag wieder in Betrieb genommen werden. Nachdem in einem Intervall anfänglich über 600 kg eingebracht wurden, konnte anschließend eine konstante Fütterungsmenge von ungefähr 300 kg realisiert werden.

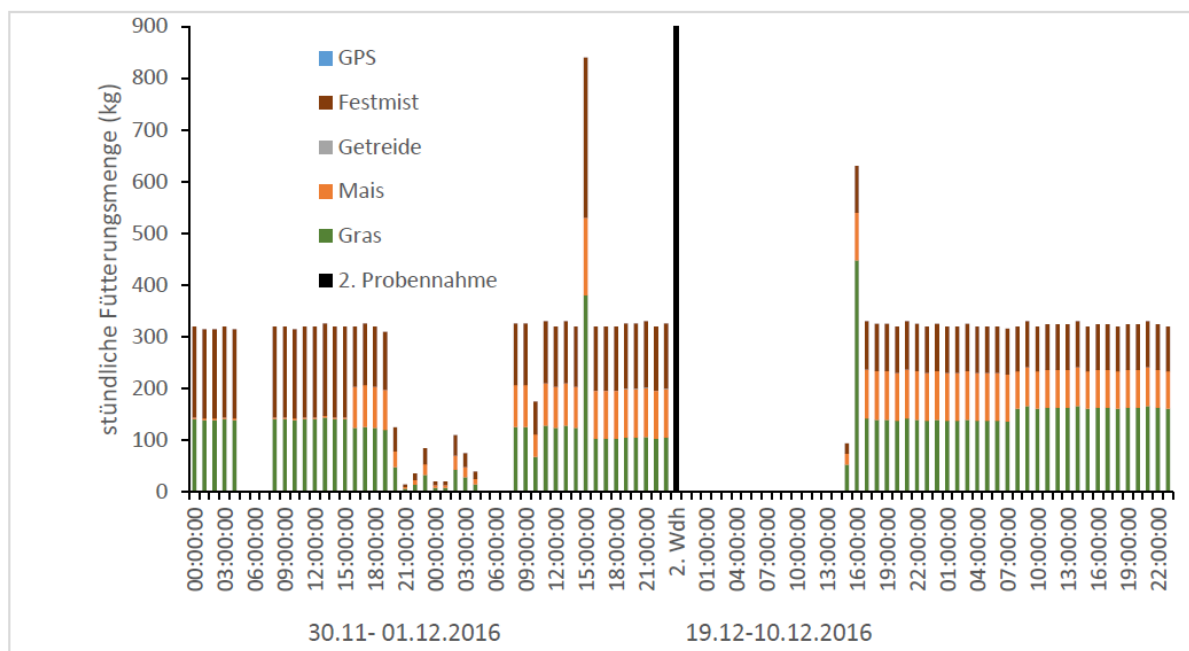


Abbildung 38: Fütterung an den Probetagen im Standardbetrieb. Links: stündliche Fütterungsmenge 30.11.– 01.12.2016; rechts: stündliche Fütterungsmenge 19. – 20.12.2016.

4.2.2 Gasertrag und Gasqualität

Der Methan- und Kohlenstoffdioxidgehalt ist mit Werten von 52,35 % ($\pm 1,34$) beziehungsweise 46,88 % ($\pm 1,05$) im gesamten Versuchszeitraum relativ konstant (**Abbildung 39**). Der Schwefelgehalt lag bei durchschnittlich 78,81 ppm und zeigte mit einer Standardabweichung von $\pm 34,58$ größere Schwankungen. Insgesamt liegt er auf einem niedrigen Niveau. Sauerstoff konnte mit 0,04 % nur in sehr geringen Mengen gemessen werden. Im Zeitraum vom 10.11.2016 bis zur Umstellung auf den Standardbetrieb am 22.11.2016 war das Messgerät zur Bestimmung der Gasqualität defekt. Deswegen konnten in diesem Zeitraum keine Daten generiert werden. Für den Gasertrag wurden durchschnittlich Werte von 40,06 m³/h ($\pm 10,62$) gemessen. Im späteren Versuchsverlauf nehmen diese Schwankungen zu, bedingt durch die unregelmäßige Fütterung. Besonders deutlich wird dies an den Tagen, an denen gar keine Frischmasse eingebracht wurde. Aus diesem Grund sind die gemessenen Methanerträge der Versuchsvarianten nicht zu vergleichen, weshalb zusätzlich der theoretische Methanertrag errechnet wurde (**Abbildung 40**).

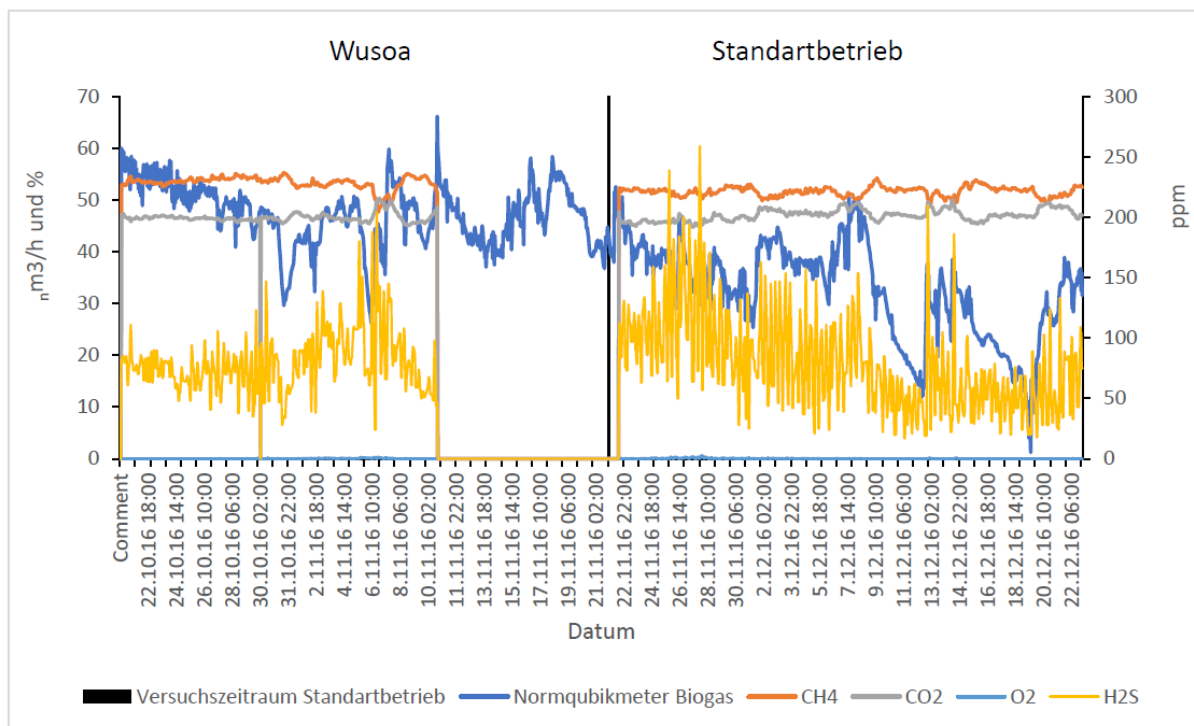


Abbildung 39: Gasertrag und Gasqualität gesamter Versuchszeitraum

Durch die direkte Abhängigkeit vom Frischmasseinput sind die Schwankungen noch größer als die des gemessenen Methanertrags. An Tagen, an denen nicht gefüttert werden konnte beträgt er Null. Im Versuchszeitraum des Standardbetriebs liegt der gemessene Methanertrag 6,8% unter dem theoretischen, im Betrieb mit dem Wusoa Rührwerk 10 % darüber (**Tabelle 12**). Das deutet auf einen höheren Methanertrag des bionischen Rührwerks hin. Die Berechnungen zum theoretischen Methanertrag sind allerdings durch Annahmen über Substratqualität und daraus resultierenden theoretischen Ertrag mit Fehlern behaftet. Hinzu kommt, dass der gemessene Methanertrag durch die massive Dichteänderung von Biogas und wegen des defekten Gasanalysegeräts nicht der tatsächlichen Methanproduktion entspricht. Deshalb dürfen die geringen Unterschiede nicht überinterpretiert werden. Gleichzeitig widerspricht dieses Ergebnis der vorherigen Untersuchung zur Strömungsgeschwindigkeit. In den vorherigen Versuchen konnte beim Umstellen vom Rühren mit dem bionischen Rührwerk auf den Standardbetrieb eine erhöhte Gasproduktion gemessen werden, welche auf einen schlechteren Gasertrag des Wusoa Rührwerks schließen lässt. Daher können auf der bisherigen Datengrundlage keine fundierten Schlüsse über einen höheren oder niedrigeren Gasertrag des bionischen Rührwerkes gezogen werden. Durch die unregelmäßige Fütterung und das defekte Gasmessgerät lassen sich auch die Unterschiede in der Gasqualität nur schwer bewerten. Im Versuchszeitraum Wusoa war der Methananteil im Rohbiogas zwar um durchschnittlich 3,7 % höher, doch kann dieser geringe

Unterschied bei gegebenen Versuchsbedingungen nicht auf den Einfluss des Rührwerks zurückgeführt werden. Eine eindeutige Bewertung ist erst in weiteren Versuchen möglich, in denen auf einen sehr konstanten Trockenmasseinput im gesamten Versuchszeitraum geachtet werden muss. Wird das Wusoa Rührwerk allerdings durchgehend betrieben, kann zumindest ein konstanter Gasaustrieb mit eventuell positiven Effekten auf den Gasertrag realisiert werden.

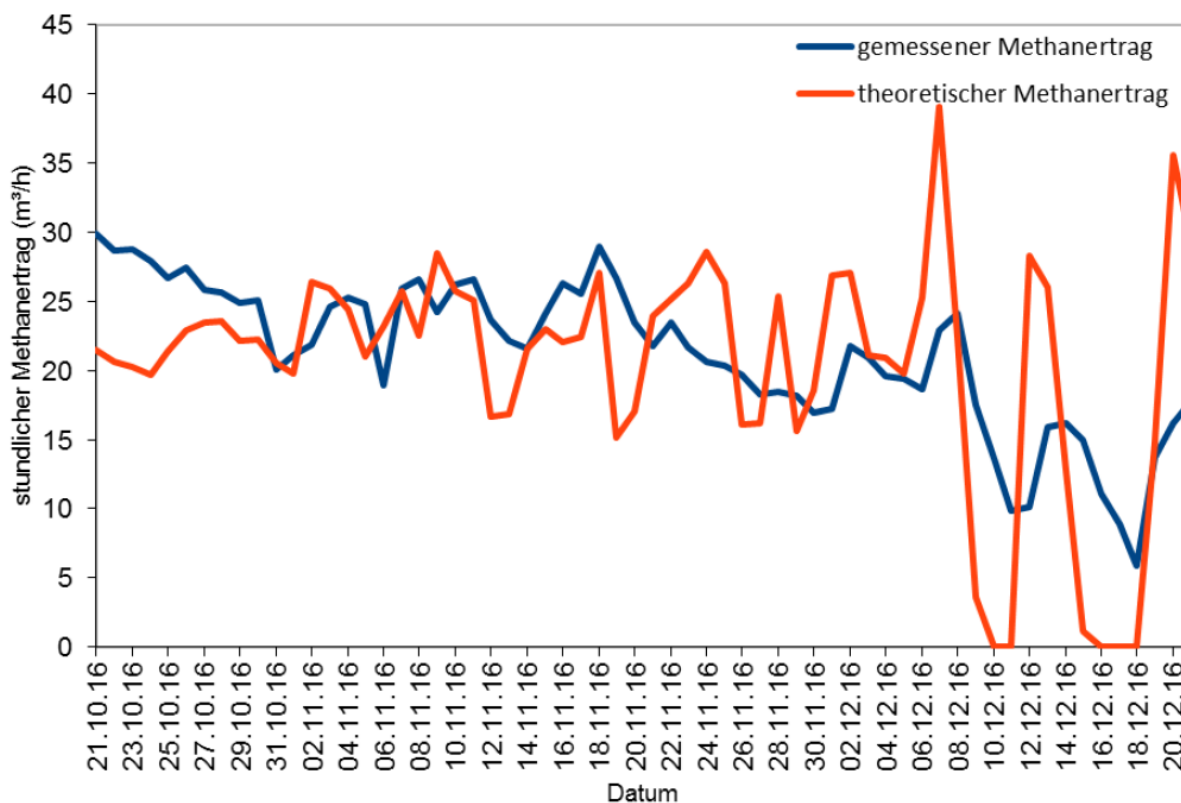


Abbildung 40: theoretischer und gemessener Methanertrag gesamter Versuchszeitraum

Tabelle 12: Gasertrag und Gasqualität während des Standard- und Wusoabetriebs

	Wusoa	Standard
Gasertrag		
Theoretischer Methanertrag (m³)	17.094	13.250
Gemessener Methanertrag (m³)	18.870	12.344
Gasqualität		
CH4 (%)	53,62	51,68
CO2 (%)	46,71	47,4
H2S (ppm)	79	68

4.2.3 Viskosität des Fermentersubstrates

Die Viskositätsmessungen im Betrieb des bionischen Rührwerks wurden am 09.11.2016 und 21.11.2016 durchgeführt. Bei der ersten Wiederholung im Standardbetrieb am 06.12.2016 traten Probleme mit der Substratpumpe auf. Rotor und Stator waren verschlissenen und konnten erst zu einem späteren Zeitpunkt erneuert werden. Deshalb konnten die Daten dieser Messung nicht ausgewertet und keine weiteren generiert werden. Aus diesem Grund stehen für die Bewertung der Viskosität nur die Daten der Versuchsvariante „Wusoa“ zur Verfügung.

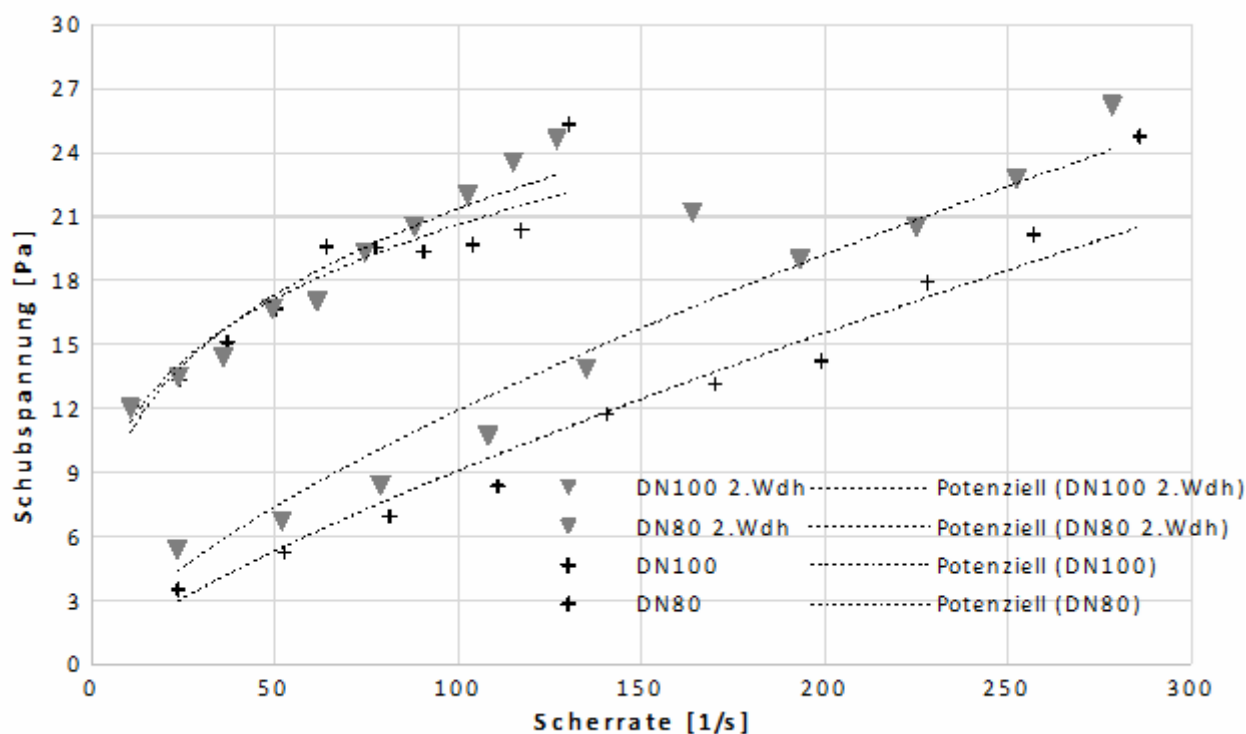


Abbildung 41: Vergleich Fließkurven Wusoa erste und zweite Wiederholung

Die maximale Schubspannung wurde in der zweiten Wiederholung mit dem Rohrdurchmesser 80 mm gemessen und betrug 26,2 Pa bei einer Scherrate von 273,3 1/s (**Abbildung 41**). Während der ersten Messung lag dieser Wert bei 24,7 Pa. Die Fließkurven der 100 mm Variante zeigen mit ihrem deutlichen Trend gegen Null und der mit zunehmender Scherrate unterproportional ansteigenden Schubspannung ein strukturviskoses Verhalten des Substrats. Auch die Fließkurven, die durch den Druckabfall im 80 mm Rohr errechnet wurden, zeigen einen Trend gegen Null und bestätigen damit dieses Ergebnis. Hier lag die maximale Schubspannung bei 25,3 Pa und wurde in der ersten Wiederholung bei einer Scherrate von 130,3 1/s gemessen.

Dieser Wert fiel in der zweiten Wiederholung etwas niedriger aus und betrug 24,6 Pa. Die Kurven liegen vor allem beim DN 100 relativ nah beieinander. Das lässt auf eine konstante Viskosität in diesem Versuchszeitraum schließen.

Der Zusammenhang zwischen dynamischer Viskosität und Schubspannung ist in der ersten und zweiten Wiederholung fast identisch (**Abbildung 42**). Wieder wird das vor allem beim 100 mm Rohr deutlich. In beiden Wiederholungen konnte hier der Maximalwert mit 1,12 Pas bzw. 1,13 Pas bei einer Scherrate von 10,68 1/s bzw. 10,73 1/s gemessen werden.

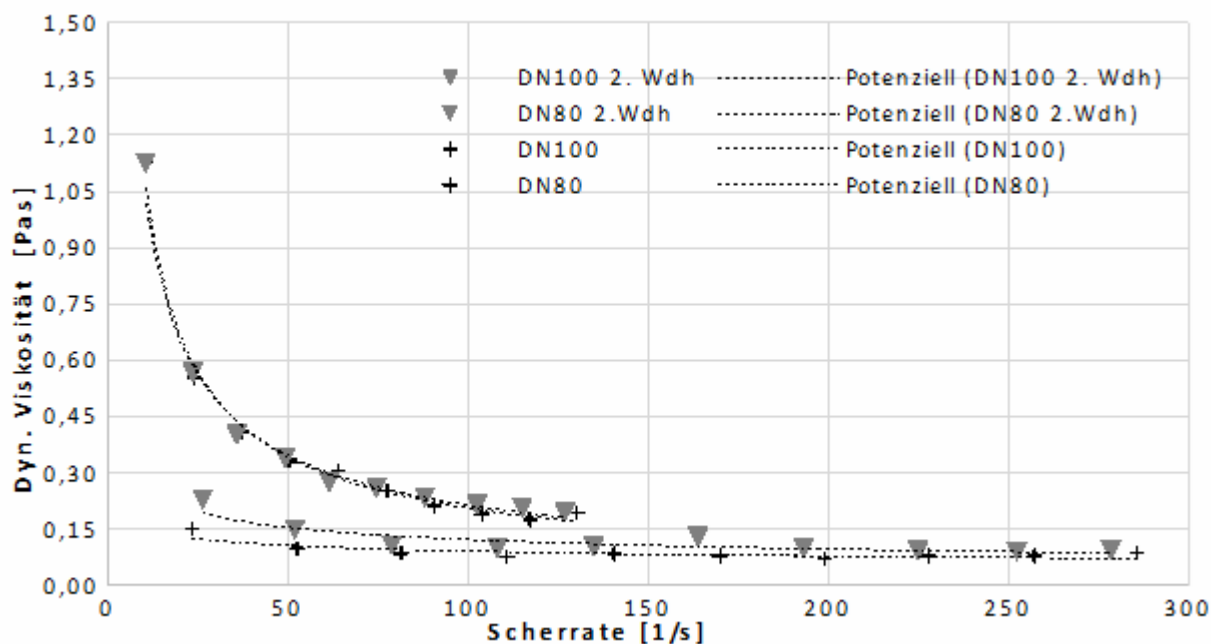


Abbildung 42: Vergleich dynamische Viskosität Wusoa erste und zweite Wiederholung

Die Ergebnisse der Viskositätsmessung dieser Arbeit wurde mit denen verglichen, die ebenfalls zur Bewertung des bionischen Rührwerks dienen sollen (Tabelle 13). Außerdem ist die einzige Arbeit zur Nährstoffverteilung in einem Praxisfermenter aufgeführt, bei der zusätzlich eine Viskositätsmessung durchgeführt wurde. Die maximale Viskosität, die in den Versuchen zuvor gemessen wurde, ist mit 1,29 vergleichbar mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit. Es fällt auf, dass im vorliegenden Versuch eine etwas niedrigere Viskosität festgestellt wurde, obwohl der TS-Gehalt um 1,55 % höher war. Das steht im Widerspruch zu anderen Studien, in denen die Viskosität mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt ebenfalls angestiegen ist (Mönch-Tegender et al., 2015). Zwar konnte Mönch-Tegender et al., 2015 den Einfluss des eingesetzten Substrats und dessen Beschaffenheit (Vorzerkleinerung) nachweisen, jedoch

müsste der Einfluss des TS-Gehalts überwiegen. Zumal in der Fütterung keine großen Unterschiede zu erkennen sind. Da der Zusammenhang aller Parameter, die die Viskosität beeinflussen, nicht eindeutig ist, in diesem Versuch starke Fütterungsschwankungen aufgetreten sind und durch Probleme mit der Substratpumpe nicht alle Daten erhoben werden konnten, kann dieser Unterschied nicht begründet werden.

Tabelle 13: Vergleich Viskosität: Grüner, 2017; IKTS, 2016; Ruile, 2015

Studie	Grüner (2017)	Wusoa Strömung	IKTS (2016)	Ruile (2015) Fermenter 1 (QZ)
	Wusoa	letzte Versuchswoche	Wusoa	
dyn. Viskosität (Pas)				
max. Viskosität	1,13	1,29	3,1	9,8
Scherrate: 10 1/s	1,13	1,29	1,6	5,2
Scherrate: 50 1/s	0,33	0,27	0,7	2,5
TS- Gehalt (%)	10,5	8,95	0	14

Bei den Untersuchungen am Fraunhofer IKTS Dresden lag die maximale gemessene Viskosität mit 3,1 Pas etwa doppelt so hoch wie die maximale Viskosität des Fermentersubstrats. Dieser Wert wurde jedoch bei einer geringeren Schergeschwindigkeit von etwa 1 1/s gemessen. Vergleicht man die Werte bei einer Schergeschwindigkeit von 10 1/s, das entspricht der geringsten in beiden Versuchen gemessenen Schergeschwindigkeit, so liegen diese mit 1,6 Pas und 1,13 Pas relativ nah beieinander. Bei größeren Schergeschwindigkeiten nimmt dieser Unterschied zwar wieder zu, dennoch lag die Viskosität in einem vergleichbaren Bereich. Trotzdem wurde die Mischgüte des bionischen Rührwerks als ungenügend beschrieben. Das deckt sich nicht mit den Ergebnissen der Nährstoffverteilung im Praxisfermenter. Der Grund dafür liegt vermutlich in der falschen Übertragung der realen Gegebenheiten auf den Labormaßstab. Zum Beispiel wurde ein Modellfluid verwendet, das keine Trockensubstanz oder Gasbläschen enthält, die die Rühreigenschaften des Substrats beeinflussen. Auch die Skalierung der Fermenter- und Rührwerksgröße sowie deren Umfangsgeschwindigkeit in Praxis und Labormaßstab stellt ein Problem dar. In der Arbeit von Ruile, 2015 wurde die Nährstoffverteilung im Fermenter 1 der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof in Abhängigkeit der Rührzeiten untersucht. Der TS-Gehalt im Fermenter und die gemessene Viskosität waren wesentlich höher (**Tabelle 13**). Außerdem fanden diese Untersuchungen am Fermenter 1

statt, bei dem das Substrat durch einen QZ vorzerkleinert wird. Daher lassen sich diese Ergebnisse nur bedingt mit der Nährstoffverteilung im Betrieb des Wusoa Rührwerks vergleichen.

4.2.4 Nährstoffverteilung

Durch die hohe Varianz in der Substratzufuhr und den im Versuchszeitraum steigenden TS-Gehalten unterliegen die Ergebnisse einer hohen Standardabweichung und sind daher nur bedingt aussagekräftig. Gleichzeitig ist die Verteilung der Parameter, die zur Beurteilung der Nährstoffverteilung herangezogen werden, relativ konstant. Dadurch fallen die Unterschiede innerhalb der Behandlungen geringer aus als die Standardabweichung. Auf eine detaillierte statistische Auswertung wurde daher verzichtet.

4.2.4.1 Vertikale Nährstoffverteilung

Die Messwerte des pH-Werts zeigen mit einer Abweichung von 0,01 eine konstante Verteilung über die unterschiedlichen Fermenterhöhen (**Tabelle 14**). Für den FOS/TAC-Wert wurde über alle Ebenen ein konstanter Wert von 0,20 gemessen. Bei der Trockensubstanzverteilung wurden im unteren Bereich etwas niedrigere Werte festgestellt. Der TS-Gehalt lag im unteren Bereich bei 10,33 %, während in der Mitte und Oben 10,63 % beziehungsweise 10,53 % gemessen wurden. Dieser Unterschied wird beim oTS-Gehalt mit 7,33 % im unteren Bereich und 7,84 % im mittleren Bereich noch etwas deutlicher. Auch der niedrigste Messwert der Essigsäureverteilung liegt mit 0,28 g/kg ebenfalls im unteren Bereich. Allerdings ist die Standardabweichung immer größer als die gemessenen Unterschiede. Deshalb kann unter den in diesem Versuch herrschenden Bedingungen eine konstante Nährstoffverteilung innerhalb der unterschiedlichen Fermenterhöhen nachgewiesen werden. Dabei liegen alle Messwerte in einem für den Biogasprozess günstigen Bereich.

Tabelle 14: Nährstoffverteilung Ebeneneffekte Wusoa

Ebene		pH- Wert	TS (%)	oTS (%)	HAC (g/kg)	Essigsäure (g/kg)	FOS/TAC- Wert
Gesamt	Mittelwerte	8,22	10,50	7,59	0,32	0,30	0,20
	Standardabweichung	0,07	0,72	0,68	0,09	0,08	0,01
Oben	Mittelwerte	8,22	10,53	7,60	0,33	0,32	0,20
	Standardabweichung	0,07	0,43	0,44	0,08	0,07	0,01
Mitte	Mittelwerte	8,21	10,63	7,84	0,33	0,31	0,20
	Standardabweichung	0,06	1,04	0,95	0,09	0,08	0,01
Unten	Mittelwerte	8,23	10,33	7,33	0,29	0,28	0,20
	Standardabweichung	0,09	0,58	0,47	0,09	0,08	0,01

Der TS-Gehalt ist im Versuchszeitraum des Standardbetriebs um über 1 %-Punkt gestiegen und liegt bei durchschnittlich 11,77 % (**Tabelle 15**). Während des Betriebs mit dem Wusoa Rührwerk lag dieser noch bei durchschnittlich 10,50 %. Alle anderen Parameter sind ebenfalls leicht angestiegen. Nur der pH- Wert hat mit 8,22 den gleichen Mittelwert wie im vorherigen Versuchszeitraum.

Tabelle 15: Nährstoffverteilung Ebeneneffekt Standardbetrieb

Ebene		pH- Wert	TS (%)	oTS (%)	HAC (g/kg)	Essigsäure (g/kg)	FOS/TAC- Wert
Gesamt	Mittelwerte	8,22	11,77	8,50	0,35	0,34	0,23
	Standardabweichung	0,07	0,33	0,38	0,17	0,16	0,02
Oben	Mittelwerte	8,22	11,72	8,41	0,34	0,33	0,23
	Standardabweichung	0,08	0,26	0,39	0,17	0,16	0,02
Mitte	Mittelwerte	8,22	11,68	8,42	0,35	0,34	0,24
	Standardabweichung	0,08	0,31	0,24	0,17	0,17	0,03
Unten	Mittelwerte	8,21	11,91	8,67	0,36	0,36	0,23
	Standardabweichung	0,06	0,39	0,45	0,17	0,16	0,03

Der pH-Wert ist wie der FOS/TAC Wert fast komplett homogen verteilt. In beiden Fällen liegen die Abweichungen bei 0,01. Der TS-Gehalt ist beim Rühren mit dem TMR und LAR im unteren Bereich mit 11,91 % etwas höher. Auch hier wird dieser Unterschied beim Betrachten des oTS-Gehalts deutlicher. Im unteren Bereich liegt dieser bei 8,67 % während im oberen 8,41 % gemessen wurden. Ähnlich sieht es bei den Essigsäureäquivalenten und dem Essigsäuregehalt aus. Beide haben den höchsten Wert mit 0,36 g/kg im unteren Bereich. Insgesamt lassen auch diese Daten auf eine homogene vertikale Nährstoffverteilung und einen gut funktionierenden Biogasprozess schließen.

4.2.4.2 Horizontale Nährstoffverteilung

In der Versuchsvariante Wusoa ist der pH-Wert mit einer absoluten Abweichung von 0,03 bei einer Standardabweichung von 0,07 auch in horizontaler Richtung sehr konstant verteilt (**Tabelle 16**). Eine ähnlich homogene Verteilung ist beim FOS/TAC Wert zu erkennen. Hier schwanken die absoluten Werte lediglich von 0,20 bis 0,21. Der Essigsäuregehalt sowie der damit korrelierende Gehalt an Essigsäureäquivalenten unterliegt in der Horizontalen etwas größeren Schwankungen als in der Vertikalen. Die höchsten Essigsäuregehalte wurden an den Stellen 2.4 und 3.3 mit 0,34 g/kg gemessen. Die niedrigsten Werte an den Stellen 1.1, 3.1 und 2.2 mit 0,28 g/kg. Die Verteilung der Trockensubstanz sieht etwas anders aus. Der höchste Wert wurde an der Stelle 3.1 mit 10,91 % TS- und 7,86 % oTS-Gehalt gemessen. Die Messungen an der Stelle 1.1 nahe des Eintrags ergaben mit 10,70 % den zweit höchsten TS-Gehalt. Am niedrigsten war der TS-Gehalt an der Stelle 2.2 mit 10,20 %. Ebenso der oTS-Gehalt mit 7,29 %. Diese Stelle liegt vom Wusoa Rührwerk aus betrachtet hinter der Mittelstütze des Fermenters und somit auf der gegenüberliegenden Seite. Die vom Rührwerk erzeugte Strömung erreicht diese Stelle vermutlich am schlechtesten, was die etwas niedrigeren TS- Gehalte erklärt. Da auch diese Abweichung vom Mittelwert relativ gering ist, liegt bei diesem Versuchsaufbau eine konstante horizontale Nährstoffverteilung vor.

Tabelle 16: horizontale Nährstoffverteilung Wusoa

Position		pH- Wert	TS (%)	oTS (%)	HAC- Wert	Essigsäure (g/kg)	FOS/TAC- Wert
Gesamt	Mittelwerte	8,22	10,50	7,59	0,32	0,30	0,20
	Standardabweichung	0,07	0,72	0,68	0,09	0,08	0,01
1_1	Mittelwerte	8,22	10,70	7,83	0,29	0,28	0,20
	Standardabweichung	0,05	0,39	0,30	0,10	0,09	0,01
3_1	Mittelwerte	8,23	10,91	7,86	0,28	0,28	0,20
	Standardabweichung	0,07	1,00	0,98	0,09	0,08	0,01
3_3	Mittelwerte	8,24	10,43	7,43	0,36	0,34	0,21
	Standardabweichung	0,09	0,43	0,28	0,08	0,07	0,01
1_3	Mittelwerte	8,19	10,35	7,63	0,31	0,31	0,20
	Standardabweichung	0,07	0,65	0,57	0,09	0,08	0,01
2_2	Mittelwerte	8,20	10,20	7,29	0,29	0,28	0,20
	Standardabweichung	0,05	0,53	0,44	0,08	0,07	0,01
2_4	Mittelwerte	8,24	10,39	7,50	0,36	0,34	0,21
	Standardabweichung	0,10	0,53	0,53	0,08	0,07	0,01

Im Standardbetrieb lag der pH- Wert zwischen 8,19 an der Stelle 2.4 und 8,24 an den Stellen 3.3 und 3.1 (**Tabelle 17**). Wieder zeigt der FOS/TAC Wert, da er den Quotienten zweier Werte darstellt, die geringsten Abweichungen. Der Gehalt an Essigsäure sowie an Essigsäureäquivalenten liegt wie in der Behandlung „Wusoa“ an der Stelle 2.4 am höchsten. Dort wurden Werte von 0,36 g/kg beziehungsweise 0,37 g/kg gemessen. Das entspricht einer Abweichung von etwa 6 % zu den Mittelwerten 0,34 g/kg und 0,35 g/kg. Der höchste TS- und oTS-Gehalt konnte mit 11,92 % bzw. 8,63 % am Eintrag an der Stelle 1.1 nachgewiesen werden. An der Probenstelle 3.1 erreicht der TS-Gehalt mit 11,61 % seinen niedrigsten Wert, wohingegen der oTS-Gehalt dort mit 8,61 % seinen zweit höchsten Wert erreicht. Umgekehrt liegt der niedrigste oTS-Gehalt bei 8,35% an der Stelle 2.2, an der beim TS-Gehalt mit 11,80 % einen leicht überdurchschnittlichen Wert gemessen wurde. Auch diese Daten lassen auf eine konstante Nährstoffverteilung schließen.

Tabelle 17: horizontale Nährstoffverteilung Standardbetrieb

Position		pH- Wert	TS (%)	oTS (%)	HAC- Wert	Essigsäure (g/kg)	FOS/TAC- Wert
Gesamt	Mittelwerte	8,22	11,77	8,50	0,35	0,34	0,23
	Standardabweichung	0,07	0,33	0,38	0,17	0,16	0,02
1_1	Mittelwerte	8,20	11,92	8,63	0,35	0,34	0,23
	Standardabweichung	0,03	0,60	0,44	0,19	0,18	0,03
3_1	Mittelwerte	8,24	11,61	8,61	0,35	0,34	0,23
	Standardabweichung	0,08	0,21	0,36	0,17	0,16	0,02
3_3	Mittelwerte	8,24	11,63	8,45	0,33	0,32	0,23
	Standardabweichung	0,09	0,25	0,27	0,18	0,17	0,03
1_3	Mittelwerte	8,23	11,79	8,46	0,36	0,35	0,22
	Standardabweichung	0,10	0,27	0,29	0,18	0,17	0,03
2_2	Mittelwerte	8,21	11,80	8,35	0,35	0,34	0,24
	Standardabweichung	0,08	0,26	0,43	0,18	0,17	0,02
2_4	Mittelwerte	8,19	11,87	8,51	0,37	0,36	0,23
	Standardabweichung	0,04	0,26	0,47	0,18	0,17	0,03

4.2.4.3 Diskussion Nährstoffverteilung

In der Versuchsvariante „Wusoa“ ist die Stelle 3.1 (10,91 %) hinter der Mittelstütze, im Standardbetrieb die Stelle 1.1 (11,92 %) nahe des Eintrags durch einen erhöhten TS- Gehalt auffällig (**Abbildung 43**). Da die Homogenisierung von frisch eingebrachtem Substrat besonders wichtig ist, könnte die Rührqualität des Wusoa Rührwerks als etwas besser beschrieben werden.

Allerdings sind die Versuchsvarianten durch den gestiegenen TS- Gehalt kaum zu vergleichen. Denn ob diese Rührqualität des bionischen Rührwerks auch bei höheren TS- Gehalten zu erreichen ist, kann nicht gesagt werden.

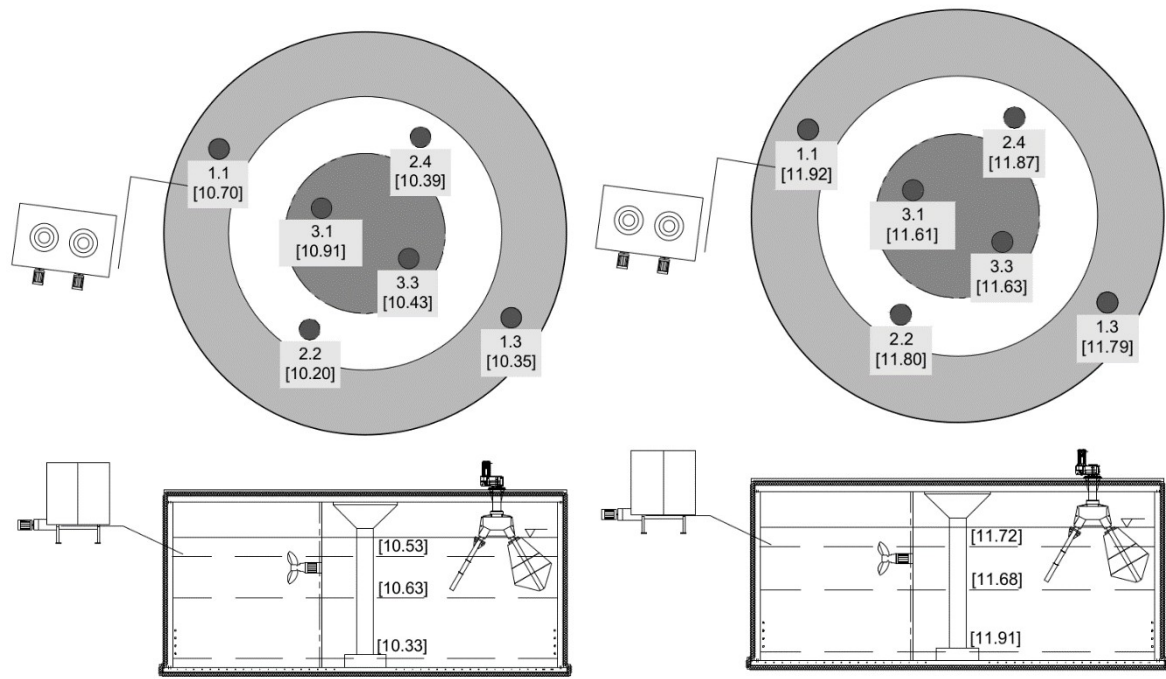


Abbildung 43: TS- Verteilung: links: Wusoa; rechts: Standardbetrieb

Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen zur Nährstoffverteilung korreliert die Essigsäurekonzentration nicht direkt mit der Trockensubstanzverteilung (**Abbildung 44**). Im Betrieb mit dem Wusoa Rührwerk wurde an der Stelle 3.1 mit 0,275 g/kg sogar der niedrigste Wert gemessen. Allerdings kam die vorliegende Arbeit erstmalig zu dem Ergebnis einer homogenen Nährstoffverteilung, und die Standardabweichung ist durch die unregelmäßige Fütterung relativ hoch. Deshalb können aus den geringen Abweichungen keine fundierten Schlüsse gezogen werden.

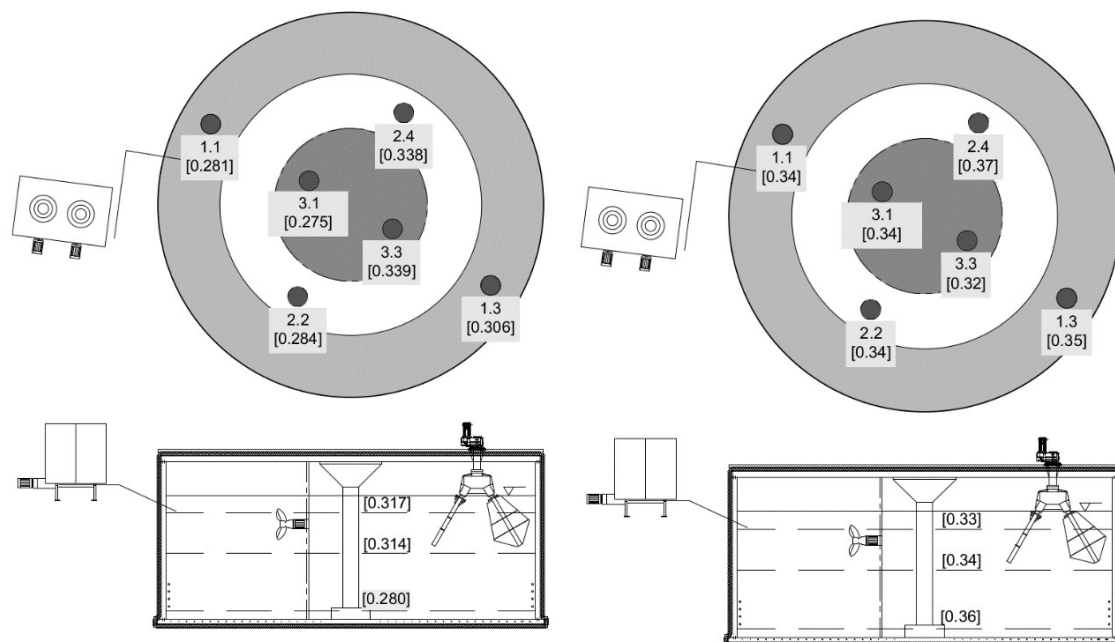


Abbildung 44: Essigsäureverteilung: links: Wusoa; rechts: Standardbetrieb

Abschließend kann mit den Ergebnissen dieser Arbeit für das Wusoa Rührwerk eine konstante Nährstoffverteilung bei einem relativ geringen TS-Gehalt von 10,5 % nachgewiesen werden. Das lässt auf Unstimmigkeiten bei den Studien von der vorherigen Untersuchung zur Strömungsgeschwindigkeit und des Fraunhofer IKTS,2016 schließen. Diese hatten anhand der Strömung im Praxisfermenter sowie von Laborversuchen eine schlechte Mischgüte des Rührwerks zum Ergebnis.

Die vorherigen Versuche haben gezeigt, dass bereits bei einem TS-Gehalt von 8,95 % keine horizontale Strömung gemessen werden konnte. Dagegen konnte in der vorliegenden Arbeit sogar bei einem höheren TS- Gehalt (10,5 %) eine konstante Nährstoffverteilung nachgewiesen werden. Die Ursache dafür könnte in der Messmethode für die Strömungsmessung liegen. Zum einen wurden durch den impulsartig Rührvorgang negative und positive Werte gemessen, die sich im Ergebnis aufheben. Zum anderen hat das magnetisch-induktive Strömungsmessgerät eine Toleranz von 1,5 cm/s. Ist die durch das bionische Rührwerk erzeugte Strömung geringer, kann sie nicht erfasst werden. Außerdem muss das Messgerät von Hand in Richtung der Strömung ausgerichtet werden, was speziell bei geringen Strömungen nur schwer möglich ist. Hinzu kommt, sofern das Messgerät richtig ausgerichtet ist, dass nur horizontale Strömungen gemessen werden können. Da die vom Wusoa Rührwerk erzeugten Strömungen relativ turbulent sind, stellt auch das eine Fehlerquelle dar. Das Messgerät zur Strömungsmessung wird üblicherweise in der Abwasserwirtschaft eingesetzt. Deshalb könnten auch Probleme mit dem

faserhaltigen Substrat einer Biogasanlage, zumal hier im Fermenter ohne Vorzerkleinerung gearbeitet wurde, die Strömungsmessung beeinflusst haben. Bei weiteren Untersuchungen des bionischen Rührwerks oder anderen langsam laufenden Rührwerken sollten daher andere Methoden der Strömungsmessung entwickelt werden oder die Mischgüte anhand von anderen Parametern wie der Nährstoffverteilung beurteilt werden.

Probleme mit massiven Schwimmschichten wie bei 4.1 sind in diesem Umfang bei den Versuchen zur vorliegenden Arbeit nicht aufgetreten. Schwimmschichten haben sich gebildet, nachdem wegen des falsch eingestellten Softstarters das Rührwerk bei einigen Rührintervallen nicht anlief. Diese konnte jedoch wieder eingerührt werden und war nicht so massiv wie in den Versuchen zur Strömungsgeschwindigkeit.

4.2.5 Stromverbrauch

Der Stromverbrauch des Wusoa Rührwerks liegt zwischen 2,04 kWh und 2,11 kWh pro Rührintervall (**Tabelle 18**). Das entspricht etwa 19,5 % der Energie, die im Standardbetrieb bei gleich langem Rührintervall benötigt wird. Da das Wusoa Rührwerk nicht von der ZAS gesteuert wurde, musste der Stromverbrauch am Stromzähler abgelesen werden. Allerdings lief das Rührwerk aufgrund des falsch eingestellten Softstarters einige Male nicht an. Daher ist die tatsächliche Zahl der Rührintervalle nicht immer klar. Das erklärt die großen Schwankungen von 0,38 kWh bis 2,11 kWh pro Rührintervall. Wie die zweite Spalte in Tabelle 18 zeigt, sind vermutlich gerade in diesem Zeitraum Störungen aufgetreten. So könnte der sehr niedrigen Wert von 1,39 kWh/100 m³ d zustande gekommen sein. Daraus ergibt sich ein relativ geringer Stromverbrauch von 1,15 kWh pro Rührintervall im gesamten gemessenen Zeitraum. Am plausibelsten erscheinen die beiden Werte, die gegen Ende des Messzeitraums dokumentiert wurden. Sie liegen bei durchschnittlich 2,08 kWh pro Rührintervall, das entspricht einer Leistungsaufnahme von 4,15 kW. Angesichts der 5,5 kW Nennleistung erscheint das realistisch. Die Leistungsaufnahme des LAR und TMR liegt zusammen bei 21,2 kW, das erklärt bei gleich langen Rührintervallen den 5-mal so hohen Stromverbrauch.

Tabelle 18: Stromverbrauch im Wusoa- und Standardbetrieb

Versuchsaufbau	Zeitraum	Intervalle	Summe Stromverbrauch (kW h)	Stromverbrauch pro Intervall (kW h)	Stromverbrauch (kW h / 100 m ³ xd)
Wusoa	16.11 8:39 – 22.11 7:31	143	163,9	1,146	4,11
(670 m-3)	16.11 8:39 – 18.11 8:45	48	18,7	0,38	1,39
	19.11 11:05 – 20.11 10:44	24	49	2,04	7,3
	21.11 8:32 – 22.11 7:31	23	48,6	2,11	7,56
Standard					
(695 m -3)	23.11 00:00 – 22.12 24:00	696	7375	10,6	36,59

Der Stromverbrauch des bionischen Rührwerks wurde mit Stromverbräuchen anderer Rührwerkskonstellationen, bei denen ebenfalls die Nährstoffverteilung zur Bewertung der Mischgüte herangezogen wurde, verglichen (**Tabelle 19**). Da in diesen Studien mit gleich großen Fermentern gearbeitet wurde, schwankt die Menge an Substrat nur leicht, das durch die Rührwerke homogenisiert werden musste. Daher wurden die Daten nicht in kWh/100 m³ angegeben. Um den Einfluss der Substratbeschaffenheit zu berücksichtigen, wurden zusätzlich die TS-Gehalte angegeben. Bei der ersten Versuchsvariante konnte mit 44,9 kWh/d einen 11 % geringeren Stromverbrauch des bionischen Rührwerks feststellen, als er in dieser Versuchsreihe ermittelt wurde. Allerdings war hier auch der TS-Gehalt mit 10,5 % um 11 % höher wodurch sich der höhere Stromverbrauch erklären lässt. In den ersten Versuchen zur Strömungsgeschwindigkeit konnte beim Anfahren des Fermenters, als der TS-Gehalt von 5,83 % auf 8,95 % gestiegen ist, kein Zusammenhang mit dem Stromverbrauch festgestellt werden. Dieser Unterschied könnte daher ebenfalls auf Ungenauigkeiten zurückzuführen sein, die durch die nicht vorhandene Steuerung über die ZAS zustande gekommen sind. Um verlässlichere Daten zu erhalten und die Taktung aller Rührwerke in beliebigen Intervallen zu ermöglichen, sollten bei zukünftigen Versuchen alle Rührwerke über die ZAS gesteuert werden.

Der tägliche Stromverbrauch von TMR und LAR der Firma Streisal ist mit Abstand am höchsten. Allerdings wurden hier 30 min./h gerührt, was mehr als sieben Mal so lang ist wie in den Versuchen von Ruile, 2015. Dieser konnte zwar keine optimale homogene Nährstoffverteilung feststellen, dennoch lagen die Werte nirgends in einem für den Biogasprozess kritischen Bereich. Außerhalb des Versuchsbetriebs sind TMR und LAR in kürzeren Rührintervallen abhängig von Substratinput und Schwimmschichtbildung getaktet. Mit der Zeitschaltuhr des Wusoa

Rührwerks konnte nur ein halbstündiges Rührintervall pro Stunde realisiert werden. Diese Einstellung wurde für den Standardbetrieb des LAR und TMR übernommen.

Aufgrund der geringeren Strömungsgeschwindigkeiten und einer geringeren Leistungsaufnahme des bionischen Rührwerks braucht dieses mehr Zeit zum Rühren. Daher hätte nicht ein gleich langes Rührintervall gewählt werden müssen, sondern ein im jeweiligen Rührintervall möglichst identischer Stromverbrauch. Bei weiteren Versuchen muss darauf geachtet werden.

Tabelle 19: Vergleich Stromverbrauch

Studie	Rührwerk	Laufzeit pro 1h (min)	Stromverbrauch (kWh)	Leistungsaufnahme (kWh/h)	TS-Gehalt
Wusoa					
Nährstoffverteilung	TMR + Streisal	30	254,4	21,2	11,72
	Wusoa	30	49,8	4,15	10,5
Strömungsgeschwindigkeit	Wusoa	30	44,52	3,71	7,8
		4	30	18,75	14,09
Ruile (2015)	TMR+ Rema	10	69,72	17,43	13,88
		20	127,6	17,2	14,07
	Rema (SR)	k. A.	15,5	k. A.	13,25
Lemmer et. al. (2013)	TMR	k. A.	54	k. A.	13,25
	TMR + Rema (SR)	k. A.	70,5	k. A.	13,25

Ein Vergleich des täglichen Stromverbrauchs des Wusoa Rührwerks, mit dem der in den Arbeiten von Ruile, 2015 und Lemmer et. al., 2013 ermittelt wurde, ist daher sinnvoller. Lemmer et. al., 2013 hat gezeigt, dass ein kombinierter Betrieb von TMR und dem LAR der Firma Rema zu einer besseren Essigsäureverteilung führt. Für den alleinigen Betrieb mit dem TMR bzw. SR lag der Essigsäuregehalt bei 0,66 g/kg bzw. 0,67 g/kg, wohingegen im kombinierten Betrieb ein Essigsäuregehalt von 0,50 g/kg gemessen wurde. Daher wurde eine Kombination beider Rührwerke empfohlen, obwohl der Stromverbrauch beim alleinigen Betrieb des Rema Rühr-

werks um 78 % niedriger war. In der Trockensubstanzverteilung konnte in allen Versuchsvarianten keine statistisch belegbaren Unterschiede gefunden werden. Der Stromverbrauch lag im kombinierten Betrieb mit 70,5 kWh/d um 29 % über dem des Wusoa Rührwerks.

Durch den um 2,75 % höhere TS-Gehalt und die Vorzerkleinerung des Inputsubstrats bei den Versuchen von Lemmer et. al., 2013 können die Studien allerdings nur bedingt verglichen werden. Im Versuchsaufbau von Lemmer et. al., 2013 wurde jede halbe Stunde gefüttert.

Während des Fütterungsvorgangs sowie eine Minute vor und zwei Minuten danach wurde gerührt. Da der Fütterungsvorgang nicht genau terminiert ist, fehlen die genauen Laufzeiten der Rührwerke, weshalb die Leistungsaufnahmen der Rührwerke nicht verglichen werden können. Die Ergebnisse der Arbeit von Ruile, 2015 zeigen, dass es mit verkürzten Rührintervallen von Standardrührwerken möglich ist, den Energiebedarf unterhalb den des bionischen Rührwerks zu senken. Bei einem zwei mal zwei minütigen Rührintervall je Stunde lag der Stromverbrauch mit 30 kWh/d um 40 % unter dem des Wusoa Rührwerks. Doch bereits bei 10 Minuten Rühren pro Stunde lag dieser Wert mit 69,72 kWh/d wieder darüber. Außerdem hat die statistische Auswertung dieser Versuche leichte Unterschiede in der Nährstoffverteilung gezeigt. Die Vergleichbarkeit der Studien ist durch den um mehr als 3 % höheren TS-Gehalt eingeschränkt. Denn wie die Arbeit von Mönch-Tegender et. al., 2014 zeigt, musste dort bereits bei einem TS-Gehalt von 13 % zu einem kontinuierlichen Betrieb der Rührwerke übergegangen werden, um die Prozessstabilität sicher zu stellen. Auf der Grundlage der von Ruile, 2015 gemessenen Daten, würde ein durchgängiger Betrieb der Rührwerke zu einem Stromverbrauch von 383 kWh/d führen. Dagegen liegt der Stromverbrauch des bionischen Rührwerks bei einem durchgängigen Betrieb, ausgehend von den Daten der vorliegenden Arbeit, bei 100 kWh/d. Diese Vergleiche zeigen das Potenzial des Rührwerksprototypen zu Effizienzsteigerung. Sie können aber nicht statistisch belegt werden und sind daher als Vermutungen zu betrachten.

Um die Energieeffizienz und Mischgüte des bionischen Rührwerks im Praxisfermenter besser bewerten zu können, müssen daher weiterführende Studien durchgeführt werden. Diese sollten bei einem höheren TS-Gehalt durchgeführt werden, da das Rührwerk in der Praxis auch unter diesen Bedingungen eine gute Rührqualität erzielen muss. Um trotzdem einen stabilen Biogasprozess sicher zu stellen, könnte ein konstanter Betrieb des Wusoa Rührwerks erforderlich sein. Für einen vergleichbaren Stromverbrauch im Standardbetrieb mit TMR und dem Streisal LAR bedeutet das ein Rührintervall von ungefähr 12 min/h.

4.2.6 Bewertung des Versuches Nährstoffverteilung

Der Versuchszeitraum war mit insgesamt etwa 3 Monaten für eine exakte Bewertung zu kurz. Denn Phänomene wie Sinkschichten, die durch die offenbar relativ langsame Strömung entstehen können, treten erst über längere Zeiträume auf. Durch den späten Einbautermin des Rührwerks blieb nur wenig Zeit, den TS-Gehalt im Fermenter zu steigern. Dadurch ist dieser im gesamten Versuchszeitraum angestiegen. Hinzu kamen massive Probleme mit der Eintragstechnik, die eine detaillierte statistische Auswertung unmöglich machten, und den Vergleich der Versuchsvarianten erschwerten. Da es bei Versuchen an Praxisanlagen häufig zu Problemen kommt, könnten mehr als zwei Wiederholungen für eine bessere statistische Auswertung sinnvoll sein. Durch die Steuerung des Rührwerks über einen separaten Schaltkasten war die Taktung des bionischen Rührwerks nur in einem halbstündigen Intervall pro Stunde möglich, und der Stromverbrauch konnte nur durch Ablesen des Zählerstandes gemessen werden. Da der Rührwerksprototyp gelegentlich nicht angelaufen ist, führte das zu Ungenauigkeiten bei der späteren Berechnung des Stromverbrauchs. Um das Rührwerk in der Praxis einzusetzen, sollten daher weitere Studien über einen längeren Zeitraum unter möglichst praxisnahen Bedingungen durchgeführt werden. Für eine exakte Messung des Stromverbrauchs und eine beliebige Rührwerkstaktung sollte das Rührwerk in die ZAS eingebunden werden. Außerdem sollten die Anteile der unterschiedlichen Inputsubstrate an der täglichen Futtermittelration sowie deren Qualität im gesamten Versuchszeitraum möglichst konstant bleiben. Um abschließend die Effizienz der Biogasanlage bewerten zu können, müssen nicht gleich lange Rührintervalle, sondern gleiche Stromverbräuche der Rührwerkskonstellationen innerhalb der Rührintervalle gewählt werden

5 HIGHLIGHTS

- Die Effizienz eines bionischen Rührwerkes wurde mit Hilfe von prozesstomographischen Untersuchungen, sowie Messungen der Strömungsgeschwindigkeit, Nährstoffverteilung und des Stromverbrauches untersucht
- Die Untersuchungen im Labor sowie der Strömungsgeschwindigkeit geben Hinweise auf eine unzureichende Durchmischung
- Die Messung der Nährstoffverteilung konnte diese Vermutungen nicht bestätigen
- Das bionische Rührwerk war nicht in der Lage die Schwimmschichtbildung in der Anfahrphase zu verhindern und im Anschluss aufzulösen. Eine Kombination verschiedener Rührwerkstypen ist sinnvoll.
- Der Primärenergieverbrauch war aufgrund der gewählten Intervalle im Standardbetrieb sehr viel höher und kann deshalb nicht abschließend bewertet werden.
- Menge und Qualität des erzeugten Biogases schwankten in beiden Versuchszeiträumen und können aufgrund des sehr kurzen Beobachtungszeitraumes und der stark schwankenden Fütterungsmengen und Futterqualitäten nicht abschließend bewertet werden.
- Der Einsatz von Großflügelrührwerken, vor allem bei strukturreichen Fermentersubstraten mit sehr hohem TS-Gehalt, wird weiter zunehmen. Das bionische Rührwerk hat ein großes Potential. Es sind aber weitere Optimierungen notwendig.
- Eine Fortsetzung der Untersuchungen mit längeren Zeiträumen wird empfohlen.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden und abgeschlossenen Projekt wurde eine Studie zur Effizienzmessung eines neuartigen und innovativen Rührwerks für Substrate in Biogasanlagen und dessen Strömungsverhaltens durchgeführt. Der Bau des neuartigen Rührwerkes war eine große Herausforderung und benötigte mehr Zeit als ursprünglich geplant war. Die Firma WUSOA stellte ein funktionsfähiges und sehr gut abgestimmtes Rührwerk zur Verfügung, welches in Fermenter 2 der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof eingebaut wurde. Alle im Antrag beschriebenen Ziele konnten erreicht werden. Zur Erstellung einer computertomographischen Simulation wurden in sehr aufwändiger Arbeit ein maßstabgetreues 3-D Modell des bionischen Rührwerkes gebaut, getestet, adaptiert und im Anschluss durch das Fraunhofer IKTS untersucht. In Vorbereitung auf den Rührwerkseinbau wurde der Fermenter 2 entleert, gereinigt und im Anschluss das Rührwerk eingebaut. Der Fermenter wurde mit Dünngülle befüllt und auf mesophile Betriebstemperatur aufgeheizt. Mit Erreichen der Solltemperatur wurde mit der Fütterung gestartet. Zur Bestimmung der Effizienz des bionischen Rührwerkes wurden Untersuchungen zur Strömungsgeschwindigkeit, der Nährstoffverteilung sowie zur Stromaufnahme und Prozessbiologie durchgeführt. Im Anschluss erfolgte erstmalig ein Vergleich der im Labor erzeugten Daten der Prozesstomographie mit den Praxisdaten. Die computertomographischen Untersuchungen im Labor sowie der Strömungsgeschwindigkeit geben Hinweise auf eine unzureichende Durchmischung. Bei sehr geringen TS-Gehalten im Gärsubstrat konnten nur sehr geringe Strömungsgeschwindigkeit vor allem in inneren Radien, sowie am Fermenterboden und an der Fermenteroberfläche gemessen werden. Eine höhere Drehzahl ermöglicht eine etwas höhere Strömungsgeschwindigkeit. Die Messung der Nährstoffverteilung konnte diese Vermutungen nicht bestätigen und zeigten im Versuchszeitraum eine ausreichende Durchmischung. Der Primärenergieverbrauch war aufgrund der gewählten Intervalle im Standardbetrieb sehr viel höher und kann deshalb nicht abschließend bewertet werden. Menge und Qualität des erzeugten Biogases schwankten in beiden Versuchszeiträumen und können aufgrund des sehr kurzen Beobachtungszeitraumes und der stark schwankenden Fütterungsmengen und Futterqualitäten ebenfalls nicht abschließend bewertet werden. Das Rührwerk war nicht geeignet, um in der Anfahrphase die Bildung von Schwimmschichten zu vermeiden und vorhandene Schwimmschichten einzurühren. Eine Fortsetzung der Untersuchungen mit längeren Zeiträumen wird empfohlen. Das bionische Rührwerk der Firma WUSOA ist mit seinem alternativen Rührkonzept einzigartig auf dem Markt. Die großen Rührflügel, die langsame Drehbewegung und die dadurch resultierende geringe Antriebsenergie lassen eine Einordnung des Rührwerkes in die Kategorie der

langsam laufenden Rührwerke zu, welchen zukünftig ein sehr großes Potential bei der effizienten Durchmischung von Biogasfermentern beigemessen wird. Für eine abschließende Bewertung des bionischen Rührwerks müssen weiterführende Studien über einen längeren Versuchszeitraum bei einem höheren TS- Gehalt mit sehr konstanter Fütterung sowie mit vergleichbaren Stromaufnahmen der Rührwerke pro Rührintervall durchgeführt werden. Auch eine Aussage über die Bauteilfestigkeit soll in Langzeitversuchen getroffen werden. Mit Einsatz von Reststoffen in Biogasanlagen werden zukünftig Verfahren zur Substrataufbereitung verstärkt eingesetzt werden, weshalb der Einfluss von Substratvorbehandlung auf die Rühreffizienz mit untersucht werden sollte. Da das Rührwerk bereits installiert und getestet ist, können diese Untersuchungen problemlos fortgesetzt werden

7 VERÖFFENTLICHUNGEN

Aus diesem Projekt heraus entstanden 2 Bachelorarbeiten. Die Abschlussarbeit von Tobias Rapp wurde aufgrund besonders hoher Qualität mit dem Max-Eyth Preis ausgezeichnet.

Tobias Rapp (2017): Messung der Strömungsgeschwindigkeit und Erstellung eines Strömungsprofils in einem Biogasfermenter für ein neu entwickeltes bionisches Rührwerk in Abhängigkeit der Viskosität: Eine Studie im Praxismaßstab

Jakob Grüner (2017): Vergleich der Rührqualität eines bionischen Rührwerkes zu Standard-Rührwerken im Praxis-Biogasfermenter

8 LITERATURVERZEICHNIS

- AL-DAHMAN, M., 2009. Bio-Energy Production from Anaerobic Digestion of Animal and Farm Wastes.
- AL-DAHMAN, M., VESVIKAR, M., 2006. Effect of Mixing and Scale on the Performance and Hydrodynamics of Anaerobic Digesters.
- BAJOHR, S., GRAF, F., 2013. Biogas Erzeugung, Aufbereitung, Einspeisung. 2 edn. München: Deutscher Industrieverlag.
- BDEW, 2016. Erneuerbaren Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2016). Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
- BREHMER, M., EPPINGER, T., KRAUME, M., 2012. Influence of rheology on the flow pattern in stirred biogas plants. *Chemie-Ingenieur-Technik*, 84(11), pp. 2048-2056.
- DACHS, G., REHM, W., 2006. Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zu dessen Reduzierung. München: Solarenergieförderverein Bayern e.V.
- DBFZ DEUTSCHES BIOMASSEFORSCHUNGSZENTRUM, 2014. Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben Ila Biomasse).
- DEBERA, I., 2016. Strömungsgeschwindigkeitsprofile im mechanisch durchmischten Praxis-Biogasermenter: Evaluation eines magnetisch-induktiven Messverfahrens. Bachelor Thesis. Stuttgart-Hohenheim: Universität Hohenheim.
- DEERBERG, G., GRÄN-HEEDFELD, J., HENNIG, T., 2009. Abschlussbericht zum Vorhaben: Strömungsmessungs- und Wärmetransportoptimierung in Biogasanlagen. Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT.
- DEUTSCHMANN, A., FRIEDRICH, E., JOBST, K., ROSTALSKI, K., 2012. Prozess - Tomographie - die Möglichkeiten der praxisnahen Bewertung und Optimierung von Mischprozessen.
- DLG, 2014. DLG-Merkblatt 396. Flexibilitätsprämie bei Biogas Chancen, technische und rechtliche Rahmenbedingungen. DLG e. V. Fachzentrum Land- und Ernährungswirtschaft
- ECOPROG GMBH, 2016. Pressemitteilung Biogas to Energy vom 01.06.2016. Available: http://www.ecoprolog.com/fileadmin/user_upload/pressemitteilungen/pressemitteilung_bio_gas_to_energy_ecoprolog.pdf [08.Januar, 2017].

- EDER, B., KRIEG, A., 2012. Biogas-Praxis Grundlagen Planung Anlagenbau Beispiele Wirtschaftlichkeit Umwelt. 5 edn. Staufen bei Freiburg: Ökobuch Verlag.
- EFFENBERGER, M., LEBUHN, M., 2011. Repowering von Biogasanlagen zur Steigerung der Prozesseffizienz, Biogas in Der Landwirtschaft-Stand und Perspektiven, FNR/KTBL-Kongress am 2011, pp. 21.
- FACHVERBAND BIOGAS E.V., 2013. Biogasfirmen setzen auf Biogas als Systemdienstleister.
- FNR, 2016. Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. 6 edn. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- FNR, 2015. Basisdaten Bioenergie Deutschland 2015. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- FNR, 2013. Broschüre Biogas. 9 edn. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- FNR, 2009. Gülzower Fachgespräche - Tagungsband "Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven". Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- FNR (Hrsg.), 2009. Biogas-Messprogramm II. 61 Biogasanlagen im Vergleich.
- FRAUNHOFER IKTS DRESDEN, 2016. Abschlussbericht zur Bewertung von Mischprozessen unter Einsatz verschiedener Rührtechnik.
- FREY, J., GRÜSSING, F., NAEGELE, H., OECHSNER, H., 2013. Eigenstromverbrauch an Biogasanlagen senken: Der Einfluss neuer Techniken. LANDTECHNIK–Agricultural Engineering, 68(1), pp. 58-63.
- GEMMEKE, B., RIEGER, C., WEILAND, P., SCHRÖDER, J., 2009. Biogas-Messprogramm II; 61 Biogasanlagen im Vergleich. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).
- GRUBER, W., 2006, Trends bei er Biogastechnik. Landtechnik, 61(6), pp. 365-357
- GÖRICH, U., HELM, M., 2014. Biogasanlagen - Planung, Errichtung und Betrieb von landwirtschaftlichen und industriellen Biogasanlagen. 3 edn. Stuttgart (Hohenheim): Eugen Ulmer KG.

- HOPFNER-SIXT, K., AMON, T., 2007, Monitoring of agricultural biogas plants in Austria-mixing technology and specific values of essential process parameters. University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Department of Sustainable Agricultural Systems, Division of Agricultural Engineering
- INDUSTRIAL TOMOGRAPHY SYSTEMS, 2016-last update, ERT Vessel Sensors. Available: <http://www.itoms.com/products/ert-vessel-sensors/> [26.Oktober 2016].
- JANTZEN, H., 2016-last update, Ein neues Entwicklungswerkzeug für die Optimierung von Rührsystemen in Biogas-Fermentern und Einsatz der Wireless Sensor Network (WSN) - Technik in Kombination mit CFD. Available: https://www.fh-muenster.de/forschung/forschungskatalog/projekt.php?pr_id=797 [28.Oktober 2016].
- JOHN DEERE, 2016-last update, Feuchtesensor HarestLab. Available: https://www.deere.de/de_DE/docs/product/equipment/agricultural_management_solutions/i_solutions/spfh_solutions/brochure/harvestlab_brochure/de_harvest_lab_0814807.pdf [28. November 2016].
- KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H., 2009. Energie aus Biomasse: Grundlagen, Technik und Verfahren. 3 edn. Berlin: Springer - Verlag.
- KARIM, K., HOFFMANN, R., KLASSON, K.T., AL-DAHMAN, M.H., 2005. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. *Water Research*, 39, pp. 3597-3606.
- KARIM, K., VARMA, R., MEHUL VESVIKAR, M., AL-DAHMAN, M.H., 2004. Flow patternvisualization of a simulated digester. *Water Research*, 38, pp. 3659-3670
- KISSEL, R., KLICHE, R., STREICHER, G., EFFENBERGER, M., 2014. Empfehlung für die Auswahl von Rührwerken für Gärbehälter und Gärrestlager. 2 edn. Biogas Forum Bayern, Nr. IV-10/2014.
- KJELLSTRAND, R., MATTSSON, A., NIKLASSON, C., TAHERZADEH, M.J., 2005. Short circuiting in a denitrifying activated sludge tank. *Water Science & Technology*, 52(10- 11), pp. 79-87
- KÖHLER, R., 1963. Allgemeine Grundlagen der Rheologie. *Starch - Stärke*, 15(2), pp. 56.
- KOLB, B., 2016. Messung der Strömungsgeschwindigkeit und Erstellung eines Strömungsprofils in Abhängigkeit der Viskosität für einen Biogasfermenter an der Forschungsbiogasanlage "Unterer Lindenhof". Master Thesis. Stuttgart-Hohenheim: Universität Hohenheim.

- KOLL, C., 2012. Aufnahme, Auswertung und Beurteilung rheologischer Parameter zur Auslegung und Simulation von Fördereinheiten sowie Rühraggregaten in Biogasanlagen. Master Thesis edn. Hannover: Leibnitz Universität Hannover
- KSB AKTIENGESELLSCHAFT, 2016-last update, KSB-Kompetenz für Energieeffizienz in Biogasanlagen. Available: https://www.ksb.com/ksb-de/Produkte_Leistungen/Abwassertechnik/Biogas/ [04. Dezember 2016].
- LAUER, M., DOTZAUER, M., 2015. Optimale Betriebsstrategien für die flexible Strombereitstellung von Biogasanlagen.
- LAVISION GMBH, 2016-last update, FlowMaster PIV/ PTV-Systeme. Available: <http://www.lavision.de/de/products/flowmaster/index.php> [26. Oktober 2016].
- LEMMER, A., BEKKER, M., OECHSNER, H., JUNGBLUTH, T., 2008. Forschungsbiogasanlage "Unterer Lindenhof". LANDTECHNIK - Agricultural Engineering, 63(2), pp. 80-81.
- LEMMER, A., NAEGELE, H., SONDERMANN, J., 2013. How efficient are agitators in biogas digesters? Determination of the efficiency of submersible motor mixers and incline agitators by measuring nutrient distribution in full-scale agricultural biogas digesters. Energies, 6(12), pp. 6255-6273.
- LIEBETRAU, J., PFEIFFER, D., TRÄHN, D., 2015. Messmethodensammlung Biogas - Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich. 2 edn. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH.
- LOMTSCHER, A., JOBST, K., FOGEL, S., ROSTALSKI, K., STEMPIEC, S., KRAUME, M., 2016. Flow Measurement and Instrumentation. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flow-measinst.2016.10.002> [21. Januar, 2017]
- LOMTSCHER, A., JOBST, K., DEUTSCHMANN, A., ROSTALSKI, K., 2013. Prozess-Tomographie als Voraussetzung zur Qualifizierung von Strömungsmodellen für Mischprozesse in Biogasreaktoren. Chemie-Ingenieur-Technik, 85(9), pp. 1429-1430.
- MAIER ENERGIE UND UMWELT GMBH, 2016-last update, Voraussetzung für optimale Reaktionsbedingungen. Available: <http://www.maier-energie-umwelt.de/voraussetzungen.html> [04. Dezember 2016].

- MAIER, C., WEICHSELBAUM, W., SCHLERKA, M., HARASEK, M., 2010. Development of Agitation Systems in Biogas Plants: Investigation of Mixing Characteristics, Improvement of Energy Efficiency and Scale-Up using CFD. *Chemical Engineering Transactions*, 21, pp. 1195-1200.
- MONTEITH, H.D., STEPHSON, J.P., 1981. Mixing efficiencies in full-scale anaerobic digesters by tracer methods. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 53(1), pp. 78-84
- MONTGOMERY, L. F. R., SCHOEPP, T., FUCHS, W., BOCHMANN, G., 2016. Design, calibration and validation of a large lab-scale system for measuring viscosity in fermenting substrate from agricultural anaerobic digesters. *Biochemical Engineering Journal*, 115, pp.72–79
- MÖNCH-TEGEDER, M., LEMMER, A., JUNGBLUTH, T., OECHSNER, H., 2014. Effects of full-scale substrate pretreatment with a cross-flow grinder on biogas production. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16(3), pp. 138-147.
- MÖNCH-TEGEDER, M., LEMMER, A., HINRICHS, J., OECHSNER, H., 2015. Development of an inline process viscometer for the full-scale biogas process. *Bioresource technology*, 178, pp. 278-284.
- NAEGELE, H., LEMMER, A., OECHSNER, H., JUNGBLUTH, T., 2012a. Electric energy consumption of the full scale research biogas plant "unterer lindenhof": Results of long-term and full detail measurements. *Energies*, 5(12), pp. 5198-5214.
- NAEGELE, H., LEMMER, A., OECHSNER, H., JUNGBLUTH, T., 2012b. Electric energy consumption of the full scale research biogas plant "unterer lindenhof": Results of long-term and full detail measurements. *Energies*, 5(12), pp. 5198-5214.
- NEXT-KRAFTWERKE, 2016-last update, Was ist die Flexibilitätsprämie?. Available: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/direktvermarktung/flexibilitatspraemie> [10. Dezember, 2016].
- OTT HYDROMET GMBH, 2016-last update, Magnetisch-induktives Strömungsmessgerät für die Abflussmessung OTT MF pro. Available: <http://www.ott.com/de/de/produkte/durchfluss-41/ott-mf-pro-74/> [05. November 2016].
- PETER, S., 1963. Fortschritte und Probleme der Rheologie. *Angewandte Chemie*, 75(4), pp. 194.

- RUILE, S., 2015. Mischgüte von Gärsubstrat im Biogasfermenter in Abhängigkeit der Rührintensität: Untersuchung im Praxismaßstab an der Forschungsbiogasanlage "Unterer Lindenhof". Master Thesis. Universität Hohenheim.
- SONDERMANN, J., 2011. Bestimmung der Effizienz von Tauchmotor und Schrägachsrührwerken anhand der Nährstoffverteilung im Biogasfermenter. Bachelor Thesis edn. Stuttgart-Hohenheim: Universität Hohenheim.
- SINDALL, R.C., 2014. Increasing the efficiency of anaerobic waste digesters by optimising flow patterns to enhance biogas production.
- THIES, M., 2003. Herstellung und rheologische Eigenschaften von porösen Kalk-Natron-Silicatschmelzen.
- TSI GMBH, 2016-last update, Thermisches Anemometriesystem. Available: <http://www.tsi.com/Thermisches-Anemometriesystem/> [26.Oktober 2016].
- VIEIRA, W.S., BRANDÃO, L.E.B., BRAZ, D., 2014. An alternative method for tracking a radioactive particle inside a fluid. Applied Radiation and Isotopes, 85, pp. 139-164.
- WALL, W.A., 1999. Fluid-struktur-interaktion mit stabilisierten finiten elementen.
- WELLINGER, A., BASERGA, U., EDELMANN, W., EGGER, K., SEILER, B., 1991. Biogas-Handbuch: Grundlagen, Planung, Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen. 2 edn. Aarau: Verlag Wirz AG.
- WU, B., 2011. CFD investigation of turbulence models for mechanical agitation of non-Newtonian fluids in anaerobic digesters. Water research, 45(5), pp. 2082-2094.
- WU, B., 2013. Advances in the use of CFD to characterize, design and optimize bioenergy systems. Computers and Electronics in Agriculture, 93, pp. 195-208.
- WUSOA GMBH, 2016a-last update, Bionisches Rührwerk – der konsequent andere Umgang mit Substraten. Available: <http://www.wusoa.com/bionisches-ruehrwerk/> [25.Oktober 2016].
- WUSOA GMBH, 2016b. Präsentation Projekt UNI Biogas Rührwerk.
- WUSOA GMBH, 2015. Patent Bionisches Rührwerk. DE102013018725 A1.
- YAZGAN, A., 2014. Viskosität des Blutes Seminar: Hydrodynamik des Blutes.