

Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsprofile in einem vollständig durchmischten Biogasfermenter

Philipp Kress, Hans-Joachim Nägele, Andreas Lemmer, Bastian Kolb

Das Durchmischen von Gärsubstrat mittels mechanischer Rührwerke ist einer der wichtigsten Prozesse in der Biogasproduktion, jedoch mit hohen Energieeinträgen und damit für den Biogasanlagenbetreiber mit hohen Kosten verbunden. Die Optimierung von Rührwerken sowie des Rührmanagements gewinnt in den vergangenen Jahren immer mehr an Bedeutung. Zahlreiche wissenschaftliche Studien versuchen mittels Simulationen und Versuchen im Labormaßstab Rheologie, Biologie und Strömungsgeschwindigkeiten im Fermenter zu untersuchen und zu beschreiben. Die Ergebnisse zeigen jedoch im Vergleich von Labor- und Praxisuntersuchungen noch erhebliche Abweichungen. Daher wurden mittels magnetisch-induktivem Messsystem die Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Stellen des Fermenters bei unterschiedlichen Trockensubstanzgehalten (TS) und Viskositäten des Gärsubstrates ermittelt. Bei einem TS-Anstieg von 7,74 auf 10,75 % über den Versuchszeitraum zeigten die Ergebnisse eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten von $8,71$ bis $63,77 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ auf $0,05$ bis $37,36 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Bedingt durch den Anstieg des TS-Gehaltes reduzierten sich die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bei gleicher Rührwerkseinstellung um durchschnittlich 70 %. Ergänzende Untersuchungen konnten belegen, dass mit einem Anstieg der dynamischen Viskosität die über die Rührwerke induzierten Strömungen am Boden, aber auch an der Oberfläche, so gering werden können, dass diese messtechnisch nicht mehr erfassbar sind. Diese Arbeit unterstützt die These, dass es durch Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten zu „Totzonen“ im Fermenter kommen kann.

Schlüsselwörter

Biogasfermenter, Strömungsgeschwindigkeit, Mischgüte, Durchmischung

Das Rühren des Gärsubstrates im Fermenter ist in der Biogasproduktion verfahrenstechnisch – aber auch ökonomisch – einer der bedeutendsten Prozesse. Eine homogene Verteilung von frischem Substrat im Fermenter bildet die Basis für dessen schnellen Abbau und ermöglicht hohe substratspezifische Gaserträge. Eine homogene Substratverteilung führt weiterhin zu einer gleichmäßigen Raumbelastung im gesamten Fermentervolumen, was die Prozessstabilität positiv beeinflusst. Der technische und ökonomische Aufwand zum Durchmischen in Biogasfermentern ist hierbei sehr hoch. Studien zufolge liegt der anteilige Eigenstrombedarf von Biogasanlagen zwischen 5 und 21 % (GEMMEKE et al. 2009) – bezogen auf die produzierte elektrische Energie des BHKW. Davon beanspruchen die Rührwerke zwischen 6 und 58 %, meist in etwa die Hälfte des Eigenstrombedarfs und sind damit die größten Stromverbraucher in Biogasanlagen (LEMMER et al. 2013). Bei einer jährlich produzierten elektrischen Energie aus Biogasanlagen von insgesamt 51,6 Mrd. kWh (BDEW 2017) berechnen sich

bei einem durchschnittlichen Eigenstrombedarf von 7,5 % (SCHEFTELOWITZ et al. 2015) und einem Strompreis von 0,28 €/kWh (BDEW 2017) für einen mittleren Anteil der Rührwerke am Eigenstromverbrauch von 51,6 % (NÄGELE et al. 2012) deutschlandweit Gesamtkosten von 559,1 Mio. € pro Jahr. Dieser Betrag muss in der Gesamtheit des deutschen Biogasanlagenbestandes ausschließlich für die Durchmischung von Gärsubstrat aufgewendet werden und bietet somit ein großes Potenzial zur Einsparung von Betriebskosten.

Die Rührtechnik in Biogasanlagen kann anhand verschiedener Wirkprinzipien unterschieden werden: mechanisch, hydraulisch oder pneumatisch. In Deutschland sind mechanische Rührwerke die am häufigsten installierte Rührtechnik (SCHULZE und EDER 2006). Mechanische Rührwerke bestehen aus einem Dreiphasen-Elektromotor, welcher mit einem Rührflügel verbunden ist. Der Einbauort des Elektromotors sowie die Befestigung des gesamten Rührwerkes kann hierbei außerhalb oder innerhalb des Fermenters liegen. Der Rührflügel selbst kann mittels Frequenzumrichter mit unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten betrieben werden. Die Geschwindigkeit, mit welcher ein Rührflügel betrieben wird, ist umgekehrt proportional zur Größe der Rührflügel (WIEDEMANN et al. 2016). Ein angepasstes Rührregime kann, wie bereits bei LEMMER et al. (2013) beschrieben, als erster Ansatzpunkt zur Energieeinsparung herangezogen werden. Eine Beurteilung der Mischgüte kann in der Praxis nur an der Substratoberfläche durch Augenschein, durch eine Probennahme aus dem Fermenterinhalt und anschließende Laboranalyse oder durch Auswertung der Biogasproduktion erfolgen (LEMMER et al. 2013). Trotz des oben dargestellten hohen Einsparpotenzials an Rührenergie sind Daten aus der Praxis zur Wirksamkeit von Rührwerken in Biogasanlagen bisher kaum erhoben worden. In der Forschung werden meist Untersuchungen im Labormaßstab mittels Computational Fluid Dynamics (CFD), Computertomographie, Electrical Resistance Tomography (ERT) (LOMTSCHER et al. 2017a, 2017b) und Computer Automated Radioactive Particle Tracking (CARPT) (LEMMER et al. 2013) durchgeführt. Den Autoren ist bislang keine Arbeit bekannt, welche im Labor erhobene Daten mit Messdaten aus der Praxis vergleicht und Schlussfolgerungen für den Einsatz von Rührtechnik oder den Betrieb von Rührwerken zieht. In der industriellen Rührwerksentwicklung werden neue Rührflügel meist mittels Simulationen entwickelt. Um die endgültige Praxistauglichkeit zu testen, werden diese Rührflügel im Anschluss im praktischen Versuch bei Kunden erprobt. Eine explizite Messung der Strömungsgeschwindigkeiten findet hierbei meist nicht statt, da keine dieser Biogasanlagen über die notwendige Messtechnik verfügt. Vielmehr werden Parameter wie Biogasproduktion und Prozessstörungen zur Beurteilung herangezogen. Untersuchungen mit Simulationen oder Tomographieversuchen im Labormaßstab, welche eine Biogasanlage nachbilden, beschreiben beim Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen lokale Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von $0,22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (LOMTSCHER et al. 2017b) bis $0,32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bei einem Trockensubstanzgehalt (TS-Gehalt) von 12,1 % (WU 2011). Die Ermittlung des TS-Gehaltes lässt bei diesen Arbeiten keine Rückschlüsse auf das Fließverhalten zu. Hingegen können unterschiedliche Faserlängen bei gleichem TS-Gehalt einen Einfluss auf das Fließverhalten und somit auch auf die Strömungsgeschwindigkeiten haben. Bei Faserlängen von 38,5 mm (TS = 10,1 %; $K = 91,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^m$; $m = 0,11$) beziehungsweise 26,1 mm (11,1 %; $K = 24,6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^m$; $m = 0,31$) wurden Strömungsgeschwindigkeiten von 1 bis $3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ beziehungsweise 3 bis $13 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ von JOBST et al. (2015) gemessen. „Totzonen“, welche aufgrund von nicht ausreichender Mischgüte entstehen können, werden in der Untersuchung von PRECHTL (2005) aufgezeigt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, an der Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“ der Universität Hohenheim Strömungsprofile des Gärsubstrates im Fermenter im Praxismaßstab mithilfe

eines elektromagnetischen Sensorkopfes aufzunehmen. Hierdurch sollte der Einfluss des TS-Gehalts und der dynamischen Viskosität bezogen auf die Scherrate des Gärsubstrates auf die Strömungsgeschwindigkeiten aufgezeigt werden. Weiterhin sollte das Auftreten von „Totzonen“ untersucht werden. Eine kontinuierliche Fütterung und die damit einhergehenden steigenden Trockensubstanzgehalte und Viskositäten sollten eine umfassende Datengrundlage für die Strömungsgeschwindigkeiten ermöglichen. Die gemessenen Randparameter der Prozessbiologie waren der TS-Gehalt, der oTS-Gehalt, der pH-Wert sowie die Konzentration flüchtiger organischer Säuren. Mittels dynamischer Viskosität und der Scherrate kann im Zusammenhang mit dem TS-Gehalt das Gärsubstrat näher beschrieben werden.

Damit wurden erstmals an einem Fermenter im Praxismaßstab Untersuchungen zu den auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten durchgeführt und es konnten Strömungsprofile erstellt werden. Im Labormaßstab ermittelte Werte können mit diesen Ergebnissen verglichen werden, um deren Aussagekraft zu festigen. Die Messwerte wurden zum ersten Mal in dieser räumlichen Auflösung gewonnen und tragen daher zum besseren Verständnis der technischen Randbedingungen bei der Durchmischung von Biogasfermentern sowie des Gärprozesses bei.

Material und Methoden

Anlagentechnik und Einsatzstoffe

An der Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“ stehen zwei parallel betriebene Fermenter für Untersuchungen im Praxismaßstab zur Verfügung. Die beiden baugleichen Fermenter sind aus Stahlbeton mit Betondecke, welche über eine Mittelstütze gehalten wird, gefertigt und unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Ausstattung mit verschiedenen Langachsrührwerken sowie der Fütterungs- und Heiztechnik (LEMMER et al. 2008). Die Fermenter verfügen über ein Bruttovolumen von je 923 m³ bei einem Innendurchmesser von 14 m und einer Höhe von 6 m. Die Untersuchungen dieser Studie wurden am Fermenter 1 durchgeführt, welcher mit einem Langachsrührwerk (LAR) (Typ Biogator HPR I, 15kW, REMA, Germany) sowie einem Tauchmotorrührwerk (TMR) (Typ 4670, 13kW ITT Flygt AB, Sweden) ausgerüstet ist (Abbildung 1). Der Durchmesser des Rührflügels des LAR beträgt 1.600 mm. Zur stufenlosen Regelung der Drehzahl wird das LAR über einen Frequenzumrichter angesteuert. Im Standardbetrieb ist eine Drehzahl von 75 Umdrehungen pro Minute vorgesehen, welche einer Umfangsgeschwindigkeit von 6,9 m·s⁻¹ entspricht. Das TMR ist mit einem Propeller mit einem Durchmesser von 766 mm ausgestattet und wird aufgrund der Bauart direkt über einen Elektromotor bei einer Drehzahl von 365 min⁻¹ angetrieben. Dies entspricht einer Umfangsgeschwindigkeit von 14,6 m·s⁻¹. Im Regelbetrieb werden diese Rührwerke getaktet betrieben: Die Rührdauer beträgt je Stunde im Mittel 20 Minuten.

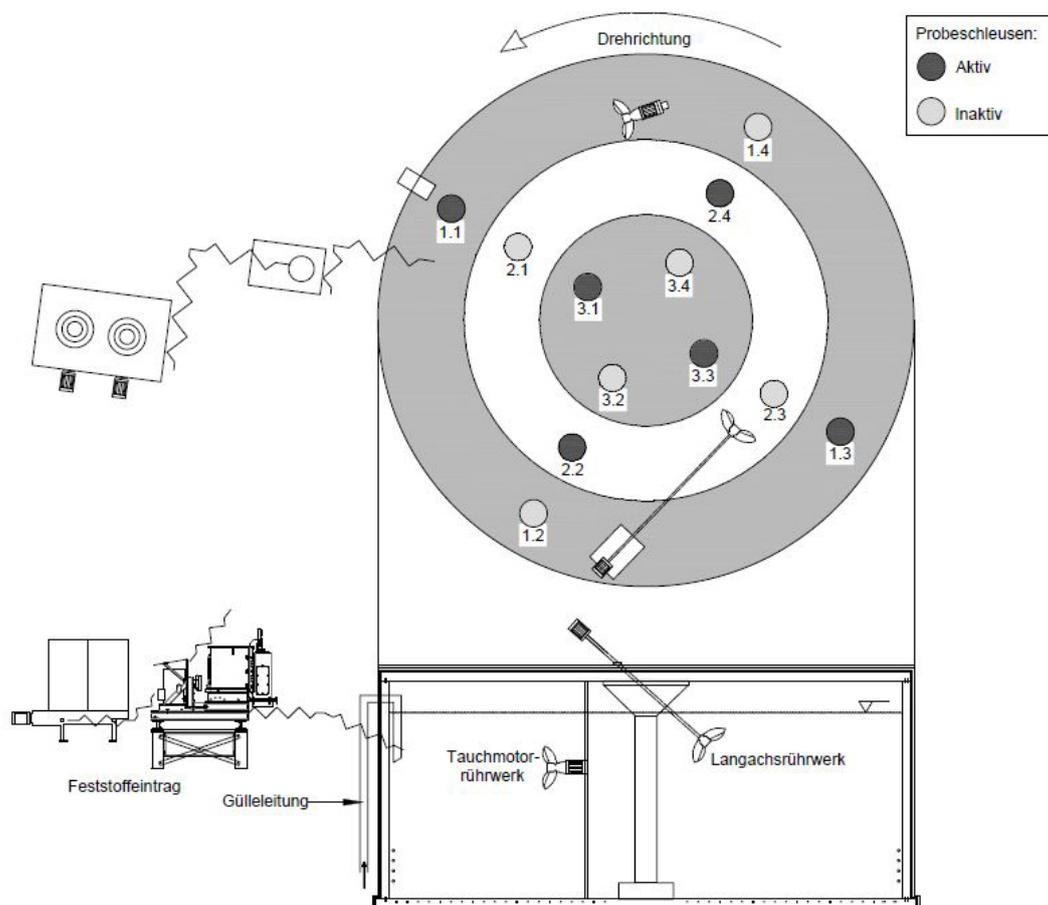


Abbildung 1: Schnittzeichnung und Draufsicht des Fermenters 1 mit den vorhandenen Messschleusen sowie der installierten Rührtechnik und dem Eintragungssystem mit Strautmann Biomix und MeWa Bio-QZ

Zur Probennahme sowie für den Einsatz von externer Messtechnik sind auf dem Betondach des Fermenters zwölf Probennahmeöffnungen installiert, welche mit gasdichten Schleusen versehen sind. Für die Messreihe wurden, wie bereits in vorherigen Untersuchungen von LEMMER et al. (2008) und KRESS et al. (2018) beschrieben, sechs der zwölf Schleusen genutzt. Für die Dosierung der Einsatzstoffe ist am Fermenter ein Vertikalmischer (Typ Biomix 2000, Fa. Strautmann GmbH & Co KG, Deutschland) installiert. Die Substrate werden aus dem Dosierer über Förderschnecken zunächst einem Prallreaktor (Typ Bio-QZ, MeWa GmbH, Deutschland) zur mechanischen Aufbereitung zugeführt. Nach einer Aufbereitungszeit von 20 s je Charge wird das zerkleinerte Material über Dosierschnecken automatisch in den Fermenter gefördert. Vor dem Start der Versuchsreihe wurde der Fermenter entleert, gereinigt und im Anschluss ausschließlich mit der flüssigen Phase des separierten Biogassubstrates aus der Biogasanlage mit einem TS-Gehalt von 7,74 % befüllt. Die nach der Einfahrphase angestrebte Raumbelastung mit organischer Trockensubstanz (oTS) lag zwischen 2 und 3 kg (m³ d¹)⁻¹.

Messtechnik

Zur Charakterisierung des Fermentersubstrates wurde die Viskosität bestimmt. Um die Veränderungen der Viskosität unter Realbedingungen zu messen und zu beschreiben, stand an der Forschungsbiogasanlage eine Rohrviskositätsmessstrecke im Pumpenraum zur Verfügung (MÖNCH-TEGEDER et

al. 2015). Das Substrat wurde zur Messung aus dem Fermenter über eine zentrale Pumpe durch die Messstrecke gefördert. Mittels zwei unterschiedlicher Rohrdurchmesser in der Messstrecke, DN80 sowie DN100, können Scherraten von 5 bis 220 s⁻¹ durch Variation der Durchflussmenge abgebildet werden. Ebenso zeigten die Messungen der letzten Jahre, dass die minimale Viskosität innerhalb des Messbereiches bei ca. 0,2 Pa·s liegt. Somit ist gewährleistet, dass unterschiedlichste Substratzusammensetzungen mit abweichendem Durchflussverhalten und somit unterschiedlichen Scherraten gemessen werden können. Die im Rohr auftretenden Differenzdrücke können über Drucksensoren jeweils am Anfang und am Ende der einzelnen Messstrecken in Kombination mit einem Differenzdrucktransmitter ermittelt werden. Die Berechnungen der scheinbaren Viskosität, η_{app} in Pa·s (Gleichung 3), der scheinbaren Scherrate $\dot{\gamma}_{app}$ in s⁻¹ (Gleichung 1) und der scheinbaren Schubspannung τ_{app} in Pa (Gleichung 2) wurde nach ADHIKARI und JINDAL (2001) sowie SLATTER (1997) durchgeführt und für die Entwicklung des Rohrviskosimeters nach MÖNCH-TEGEDER et al. (2015) angewendet. Diese basieren auf folgenden Gleichungen:

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{\dot{V}}{r} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\tau_{app} = \frac{\pi * \Delta p * r}{8 * L} \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\eta_{app} = \frac{\tau_{app}}{\dot{\gamma}_{app}} = \frac{\pi * \Delta p * r^4}{8 * L * \dot{V}} \quad (\text{Gl. 3})$$

Mit dem Potenzgesetzmodell nach Ostwald und de Waele wurde die Modellierung der Strömungskurven durchgeführt (Gleichung 4), wobei k den Konsistenzfaktor und n den Fließverhaltensindex beschreibt.

$$\eta_{app} = k * \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (\text{Gl. 4})$$

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten im Fermenter wurde ein tragbares magnetisch-induktives Messgerät vom Typ Ott MF pro (Firma Ott Hydromet GmbH, Kempten, Deutschland) verwendet. Invasive Messungen an einem Fermenter im Praxismaßstab stellen vor allem aus Sicherheitsgründen eine besondere Herausforderung dar. Um den Sensor während des laufenden Biogasprozesses sicher in den Reaktorinnenraum einbringen zu können, wurde eine Messschleuse entwickelt, über die eine Führungsstange mit dem Sensorkopf eingebracht und beliebig in Höhe und Position ausgerichtet werden kann (Abbildung 2).

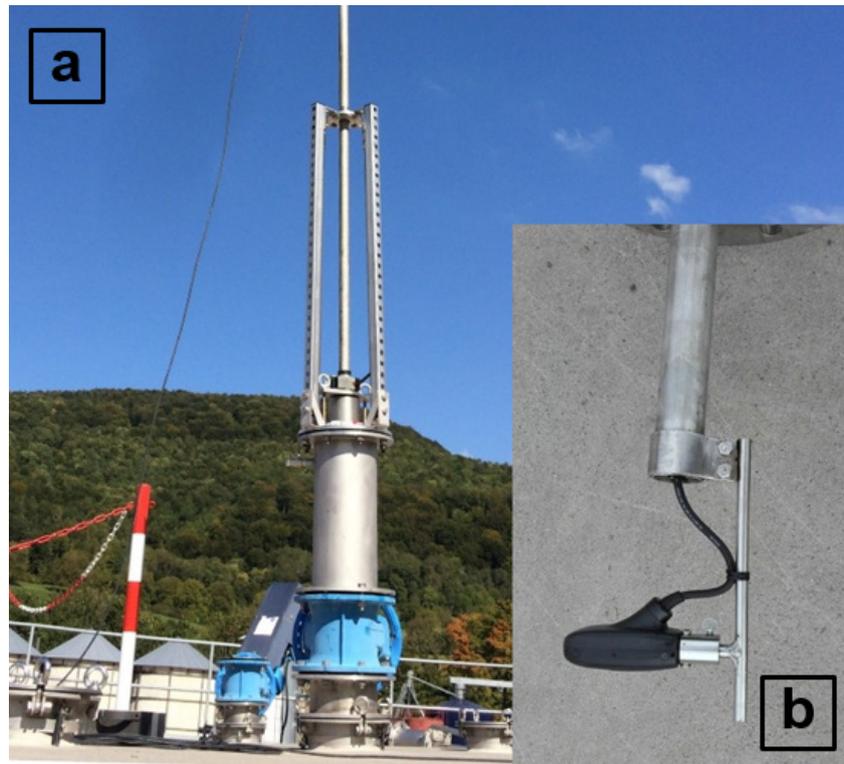


Abbildung 2: Ansicht der auf einer Probennahmestelle installierten Messschleuse (a) sowie des Sensorkopfes am Führungsrohr (b) (© Universität Hohenheim/Philipp Kress)

Das magnetisch-induktive Messsystem, dessen Grundlagen BAKER (2016) genauer beschreibt, hat den Vorteil, dass keine beweglichen Teile in den Biogasfermenter eingebracht werden, sodass Störungen der Messung aufgrund von technischen Blockaden ausgeschlossen sind. Die Genauigkeit des Geschwindigkeitssensors liegt bei Strömungsgeschwindigkeiten unter $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bei $\pm 2 \%$ vom Messwert oder $0,015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Weiterhin kann bei ungenauer Ausrichtung des Sensors zur Strömung ein zusätzlicher Messfehler von 1% Abweichung je $\pm 10^\circ$ Abweichung von der Orthogonalen entstehen.

Versuchsdurchführung

Um einen Anstieg des TS-Gehaltes zu generieren, wurden $2,5 \text{ t}$ Rindermist, $2,0 \text{ t}$ Pferdemist, $0,2 \text{ t}$ Getreide sowie $1,8 \text{ t}$ Ganzpflanzensilage (GPS) auf 12 Rationen aufgeteilt und verteilt auf 24 Stunden alle 2 Stunden gefüttert. Ab der dritten Woche wurde GPS durch Grassilage ersetzt. Alle Materialien wurden nach Verfügbarkeit eingesetzt. Gülle wurde über den gesamten Versuchszeitraum nicht zugeführt. Um möglichst einheitliche Bedingungen während der Messungen zu gewährleisten, wurde der Fermenter an jedem Messtag zunächst zwei Stunden lang aufgerührt. Die Drehzahl des TMR betrug hierbei 365 min^{-1} , diejenige des LAR 75 min^{-1} . Die Strömungsgeschwindigkeit wurde jeweils zwischen den Beschickungsvorgängen gemessen, welche alle zwei Stunden automatisch ausgeführt wurden. Während der hier beschriebenen Messungen wurden beide Rührwerke jeweils auf einer gleichbleibenden Position betrieben: das TMR parallel zur Strömungs- und Drehrichtung des Gärsubstrates mit einer Achshöhe von circa $3,5 \text{ m}$ über dem Fermenterboden, das LAR in einem Winkel von 45° zur Substratoberfläche sowie 45° zur Vertikalen durch die Fermentermitte. Die Messpunkte der Geschwindigkeitsmessung wurden auf $0,5 \text{ m}$ bis $4,5 \text{ m}$ über dem Fermenterboden festgelegt, wobei der obere Messpunkt knapp unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche lag. Der im Messgerät vorhandene

Fixed-Period-Averaging-Filter (FPA) wurde für die Messdatenaufnahme herangezogen. Hierbei wurden in einem festen Intervall von 250 ms Messpunkte gesammelt. Diese konnten als Mittelwert über ein frei wählbares Intervall ausgegeben werden, welches auf 1 s festgelegt wurde. Ein kompletter Datensatz je Messposition und -höhe bestand aus 75 Messwerten, aus denen wiederum der Mittelwert gebildet wurde. Die Messungen erfolgten über einen Zeitraum von sechs Wochen an je zwei Messtagen pro Woche. Die Messstellen wurden vor Versuchsbeginn randomisiert und nach diesem Schema beprobt. Eine Randomisation der einzelnen Messhöhen je Messstelle fand nicht statt. Es wurde auf neun Höhen von 0,5 bis 4,5 m in Schritten von 0,5 m gemessen. Um den Strömungswinkel zu erfassen, wurde dieser in 30°-Schritten aufgezeichnet, wobei 0° der Ausrichtung des magnetischen Nordpols entsprachen. Um die rheologischen Eigenschaften des Fermenterinhalt während des Versuches beschreiben zu können, fand in jeder Versuchswoche eine Viskositätsmessung statt. Diese Messung wurde jeweils im Anschluss an die Strömungsmessung durchgeführt. Um die Fermenterbiologie während des Versuchszeitraumes genauer beschreiben zu können und eine stabile Anfahrphase zu gewährleisten, wurden zwei Substratproben je Woche entnommen. Die TS- und oTS-Bestimmung sowie die Analyse der leichtflüchtigen organischen Säuren und der Pufferkapazität wurden nach VDLUFA-Standardmethoden (Band III) durchgeführt (VDLUFA 2007).

Ergebnisse

Substratzusammensetzung

Die durchschnittliche Frischmasse (FM), die über den Feststoffdosierer dem Fermenter zugeführt wurde, betrug im Versuchszeitraum 6.387 kg d^{-1} (Tabelle 1).

Tabelle 1: Fütterungsmengen, oTS-Gehalt FM-Anteil der einzelnen Substrate

	Festmist	Grassilage	GPS	Getreide	Pferdemist	Gesamt
FM in $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$	2.316 ± 850	2.294 ± 640	1.642 ± 577	202 ± 2	2.164 ± 648	6.387 ± 1.715
oTS-Gehalt in %	$16,2 \pm 0,8$	$32,4 \pm 5,4$	$30,1 \pm 3,5$		$23,2 \pm 2,7$	
Anteil FM in %	27	27	19	2	25	

Vor Versuchsbeginn wurde der Biogasfermenter ausschließlich mit separierter, faserfreier Dünngülle gefüllt. Im Versuchszeitraum wurde dann ausschließlich feste Biomasse hinzudosiert. Daraus resultierte ein kontinuierlicher Anstieg sowohl des TS- als auch des oTS-Gehaltes in Proben aus dem Fermenter (Tabelle 2). An flüchtigen organischen Säuren konnten im Versuchszeitraum Essigsäure mit einer Konzentration von $0,098 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $0,587 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ und zeitweise geringe Konzentrationen von Propionsäure bis maximal $0,057 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ nachgewiesen werden. Die Konzentration an Essigsäureäquivalenten (HAC) variierte im gesamten Versuchszeitraum von $0,098$ bis $0,587 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Daraus lässt sich schließen, dass der Gärprozess durchgehend stabil war (FNR 2013).

Tabelle 2: Ergebnisse der Analysen von Proben des Fermenterinhalt während des Versuchszeitraums zur Beurteilung der Prozessstabilität

Mess- woche	Versuchs- tag	TS-Gehalt in %	oTS-Gehalt in %	pH	HAC in g · kg ⁻¹	Essigsäure in g · kg ⁻¹	Propionsäure in g · kg ⁻¹	FOS/TAC
1	1	7,74	4,99	8,34	0,098	0,098	0,000	0,188
	4	7,85	5,15	8,44	0,309	0,309	0,029	0,206
2	8	8,19	5,46	8,49	0,207	0,207	0,012	0,188
	11	8,56	5,90	8,18	0,587	0,587	0,057	0,211
3	15	9,13	6,20	8,21	0,250	0,250	0,009	0,196
	18	9,45	6,47	8,57	0,242	0,242	0,000	0,201
4	22	8,61	6,72	8,36	0,262	0,262	0,000	0,203
	25	9,83	6,86	8,39	0,264	0,264	0,000	0,210
5	32	9,95	6,90	8,28	0,207	0,207	0,000	0,215
6	36	10,75	7,56	8,11	0,173	0,173	0,000	0,215

Viskositätsmessung

Bei TS-Gehalten von 7,74 % konnten keine Messdaten zur Ermittlung der Viskosität gewonnen werden, da die minimale Viskosität, die für die Messstrecke benötigt, nicht erreicht wurde. Ab der zweiten Versuchswoche bei einem TS-Gehalt von 7,85 % zeigten die Messungen verlässliche Werte, welche mit einer konstanten Förderleistung der Pumpe und dem damit einhergehenden konstanten Druck in der Messstrecke begründet werden konnte. Im folgenden Versuchszeitraum konnte ein kontinuierlicher Anstieg der scheinbaren Viskosität festgestellt werden. Dieser betrug im Vergleich von Woche zwei zu Woche sechs 60 % bei einer Scherrate von 10 s⁻¹ (Tabelle 3).

Tabelle 3: Aufstellung der Scheinviskositäten über die Versuchswochen hinweg bei entsprechenden Scherraten sowie des Konsistenzfaktors k und des Fließverhaltensindex n

Scherrate in s ⁻¹	Scheinviskosität in Pa · s				
	Woche 2	Woche 3	Woche 4	Woche 5	Woche 6
10	1,49	1,36	1,78	2,06	2,39
20	0,84	0,79	1,05	1,23	1,42
30	0,60	0,57	0,77	0,91	1,05
40	0,47	0,46	0,62	0,73	0,85
50	0,39	0,38	0,52	0,62	0,72
100	0,22	0,22	0,31	0,37	0,43
120	0,19	0,19	0,27	0,32	0,37
k	10,3	8,96	10,5	11,7	13,1
n	0,16	0,19	0,23	0,25	0,26
R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

Untersuchungen von KRESS et al. (2018) sowie MÖNCH-TEGEDER et al. (2015) im Fermenter 1 zeigten bei einer Scherrate von 10 s^{-1} und einem TS-Gehalt von 13,61 % eine Scheinviskosität von $6,59 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ bzw. bei einem TS-Gehalt von 10,1 % eine Scheinviskosität von $13,61 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Tabelle 4). Somit erschien die in diesem Versuch ermittelte Scheinviskosität von maximal $2,30 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ bei einem TS-Gehalt von 10,74 % bei dieser Anlagenfahrweise als schlüssig.

Tabelle 4: Viskosität sowie TS-Gehalt bei einer Scherrate von 10 s^{-1} aus verschiedenen Veröffentlichungen

	Kress et al. (2018)	Mönch-Tegeder et al. (2015)	Vorliegende Arbeit
Scheinviskosität in $\text{Pa}\cdot\text{s}$	6,59	1,56	2,39
TS-Gehalt in %	13,61	10,1	10,74

Strömungsgeschwindigkeit

Im Gärsubstrat mit einem geringen Trockensubstanzgehalt von 8,02 % variierten die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten signifikant im Bereich von $6,74$ bis $87,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Mit der Zunahme des TS-Gehaltes (10,75 %) verlangsamten sich die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten bis auf $2,86 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ($\pm 0,46 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) (Abbildung 3).

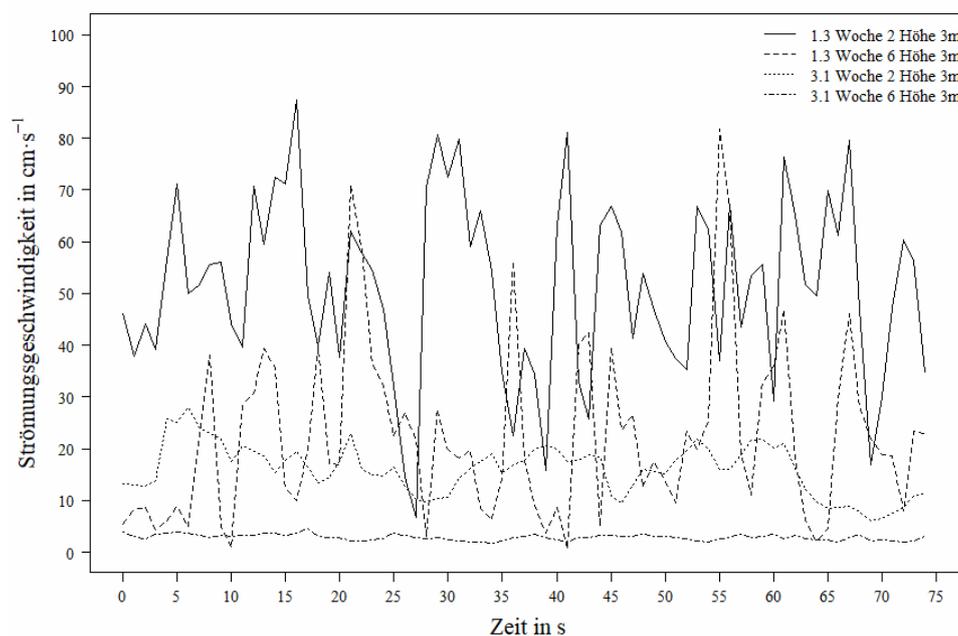


Abbildung 3: Vergleich der Messverläufe der Strömungsgeschwindigkeiten an den Positionen 1.3 und 3.3 über ein Erfassungsintervall in der zweiten Versuchswoche bei TS-Gehalten von 8,02 und 10,75 % (Diese Position befindet sich direkt neben dem Rührflügel des Langachsührwerks)

Aufgrund der weniger stark variierenden Strömungsgeschwindigkeiten während der sechsten Messwoche wurde angenommen, dass sich in hochviskosen Gärsubstraten die Turbulenzen verringern, was zugleich die Genauigkeit der Messung erhöhte. Hingegen lässt sich vermuten, dass bei

niederviskosen Gärsubstraten turbulente Strömungsverhältnisse mit starken Schwankungen der Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten vorherrschen.

Die von Woche zu Woche in unterschiedlichen Höhen gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten an der Messschleuse 1.1 zeigt Abbildung 4. Insgesamt verringerten sich die Strömungsgeschwindigkeiten des Gärsubstrates mit dem Anstieg des TS-Gehaltes. Die Messstelle an Schleuse 1.1 befand sich in räumlicher Nähe zum TMR, sodass dieses die Strömungsgeschwindigkeiten an dieser Messstelle stark beeinflusste. Die Höhe des TMR lag ca. 3 m oberhalb des Fermenterbodens. Bei einem TS-Gehalt von 9,61 % in der vierten Messwoche reduzierten sich die Geschwindigkeiten im Vergleich zur dritten Messwoche auf dieser Rührwerkshöhe um bis zu 50 %, während am Fermenterboden sowie an der Fermenteroberfläche eine Reduktion von 60 bis 70 % gemessen wurde. Der Einfluss des TMR auf die Strömungskurve war also ab diesem Zeitpunkt nicht mehr so ausgeprägt wie in den ersten drei Messwochen. Veränderungen des TS-Gehaltes hatten ab der dritten Messwoche keinen so bedeutsamen Effekt auf die Strömungsgeschwindigkeiten mehr wie zuvor; ebenso war der Geschwindigkeitsverlauf über die Fermenterhöhe gleichmäßiger. Der Flüssigkeitsstrahl und die damit verbundenen erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten auf Höhe des TMR nahmen ab der vierten Messwoche, bei TS-Gehalten bis 9,61 %, ab und waren am Ende der Untersuchung in Messwoche sechs kaum noch feststellbar. Bei zu hohen TS-Gehalten neigen Tauchmotorrührwerke dazu, eine Kaverne zu bilden (ROSTALSKI 2009). Dies bedeutet, dass das Rührwerk nicht in axialer Richtung fördert, sondern vielmehr das Substrat radial erneut ansaugt, was zu einer Art Kurzschluss führt. Die in Messwoche sechs festgestellten Strömungsgeschwindigkeiten deuten darauf hin, dass sich eine solche Kaverne bildete. Über die gesamte Fermenterhöhe gesehen nahmen die Geschwindigkeiten in den sechs Messwochen um bis zu 85 % ab.

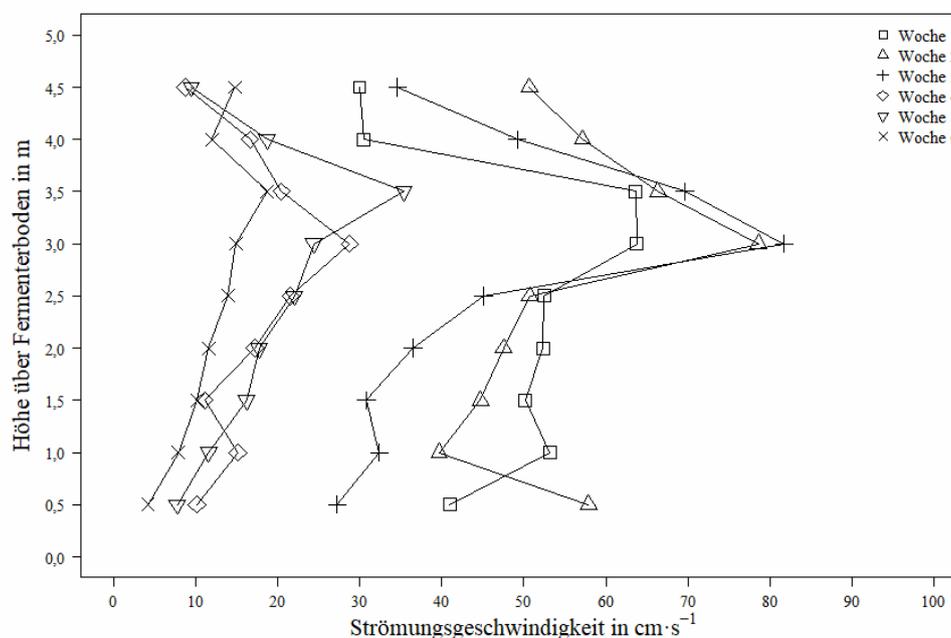


Abbildung 4: Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten an der Messschleuse 1.1, in Strömungsrichtung direkt hinter dem TMR, in Versuchswoche eins bis sechs

Direkt abströmig neben dem LAR befand sich die Messstelle 1.3. Auf einer Höhe von 2,5 m war der Einfluss des LAR auf die Strömungskurve deutlich ausgeprägt (Abbildung 5).

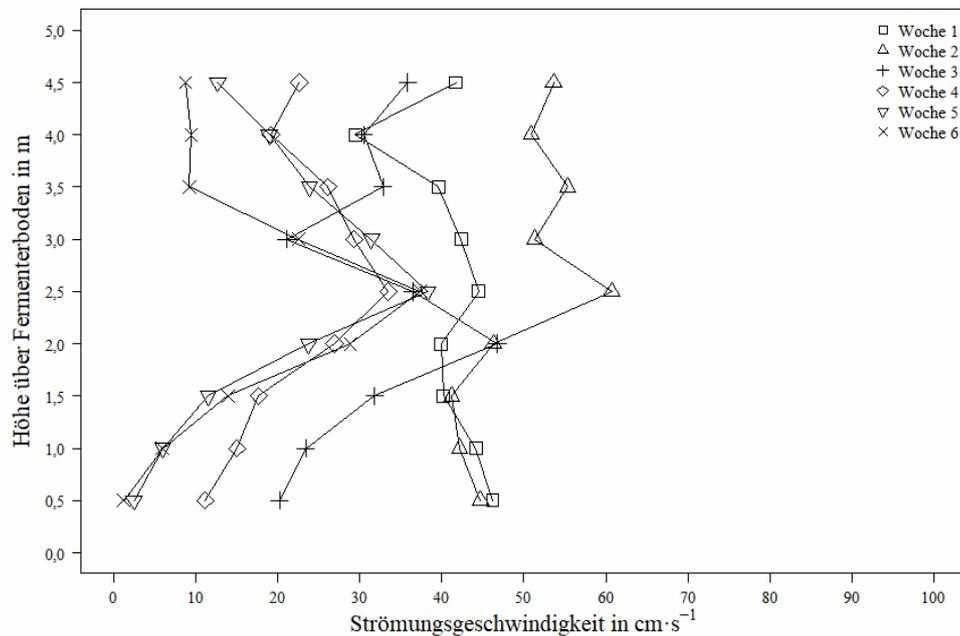


Abbildung 5: Strömungsgeschwindigkeiten an der Messschleuse 1.3, abströmig neben dem LAR, über den gesamten Versuchszeitraum hinweg

Bei einem TS-Gehalt von 8,84 % stellten sich ab Messwoche drei auf einer Höhe von 2,5 m konstante Strömungsgeschwindigkeiten von 33,47 bis 38,27 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ein. In Bodennähe sowie in den oberen Bereichen des Fermenters war ab der zweiten Messwoche eine starke Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten festzustellen. In Höhe von 4,5 m und somit direkt an der Oberfläche war eine Verringerung von 53,63 auf 8,71 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ und somit eine Reduktion um 85 % festzustellen. Eine noch stärkere Abnahme fand in Bodennähe statt. Hier verringerten sich die Strömungsgeschwindigkeiten von 46,17 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ auf 1,19 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, dies entspricht einer Reduktion um 97,5 %. Gleichzeitig erhöhte sich der TS-Gehalt im Gärgemisch von 7,74 % auf 10,75 %. Über die gesamte Fermenterhöhe und alle Messstellen wurde an Messstelle 1.3 mit 37,36 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ die höchste Geschwindigkeit in der letzten Messwoche ermittelt (Abbildung 6).

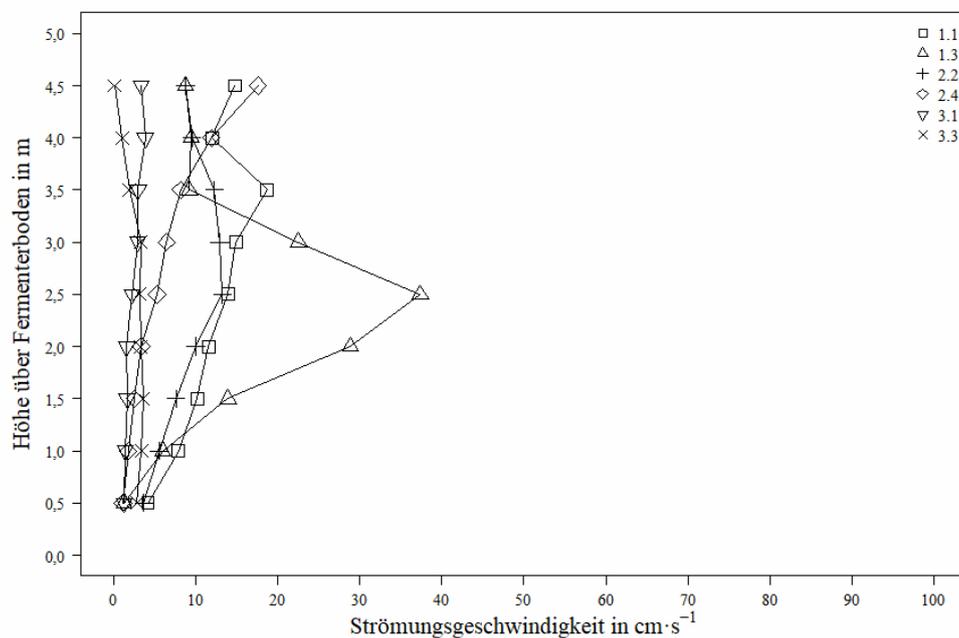


Abbildung 6: Mittlere gemessene Strömungsgeschwindigkeiten in der sechsten Messwoche an allen Positionen

Die Ergebnisse der Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten an allen Messpunkten in der ersten und der letzten Woche zeigen deutliche Unterschiede in der Streuung der Geschwindigkeiten (Abbildung 7). In der ersten Woche, als das Gärsubstrat noch dünnflüssig und niedrigviskos war, wurden die Geschwindigkeiten stark von der Position und Höhe der Rührwerke und dem Strömungsradius beeinflusst (beispielhaft hierfür Position 1.1). In der letzten Woche hatten hingegen der Einfluss der Rührwerke und deren Position auf die Strömungsgeschwindigkeiten in dem höherviskosen Gärgemisch drastisch abgenommen. Einzig an der Messstelle 1.3, welche in der Nähe des LAR liegt, zeigte sich noch ein deutlicher Einfluss des Rührwerks. Die hier eingetragene Kraft des Rührflügels konnte in Korrespondenz mit der Fermenterwand entsprechende Strömungsgeschwindigkeiten in Richtung der Messstelle erzeugen.

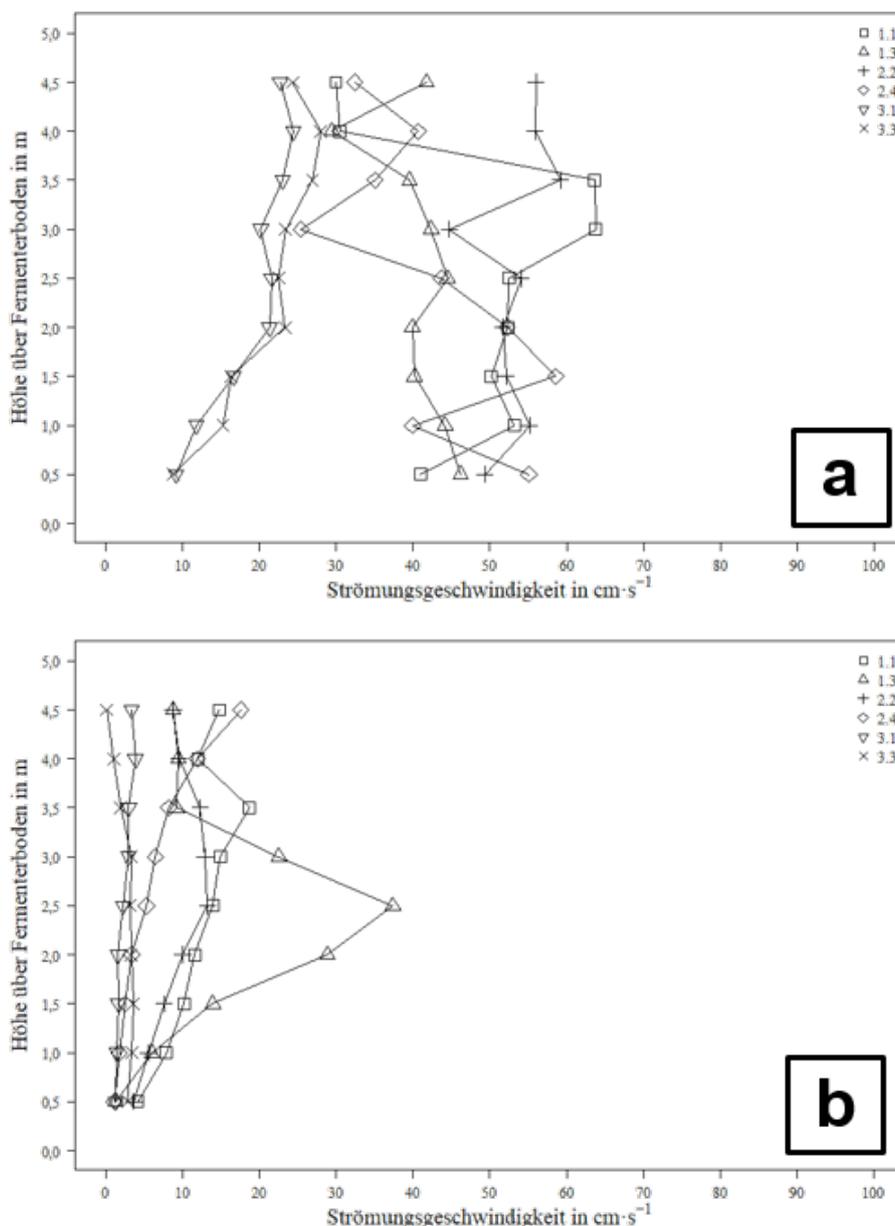


Abbildung 7: Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in der ersten (a) sowie der sechsten Woche (b) über alle Messpositionen und Fermenterhöhen

Um eine hohe Mischgüte im Fermenter zu gewährleisten, sind in der Praxis jene Positionen von Bedeutung, an welchen die Strömungsgeschwindigkeiten sich auf nahe Null reduzieren. Dies war an den Schleusen 1.3, 2.4 sowie 3.1 ab der fünften Messwoche an den untersten beiden Positionen mit Geschwindigkeiten zwischen 0,96 bis 1,72 cm·s⁻¹ zu beobachten. In der sechsten Messwoche wurden an Schleuse 3.1, welche sich nicht im direkten Einflussbereich des TMR befindet, bis auf einer Höhe von 2 m nur Geschwindigkeiten bis 1,59 cm·s⁻¹ ermittelt. An Schleuse 3.3 wurden an den beiden oberen Positionen, an welchen das LAR sich in direkter Nähe befindet, in der sechsten Messwoche Geschwindigkeiten von 1,59 cm·s⁻¹ gemessen. Im Vergleich zur Arbeit von KRESS et al. (2018), welche im selben Fermenter mit einem TS-Gehalt von 14,1 % durchgeführt wurde, lässt sich feststellen, dass

selbst bei Geschwindigkeiten unter $2,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ noch eine Nährstoffverteilung und Durchmischung des Substrates stattfindet. „Totzonen“, welche eine nicht ausreichende Durchmischung aufzeigen, wurden von LEONZIO (2018) festgestellt, wobei jedoch kein Vergleich zur tatsächlich vorherrschenden Nährstoffverteilung aufgezeigt werden konnte. Es kann also nicht abschließend geklärt werden, ob geringe Strömungsgeschwindigkeiten zu „Totzonen“ führen und ob „Totzonen“ gleichzeitig bedeuten, dass dort keine ausreichende Nährstoffverteilung vorliegt. Ebenfalls können Leistungsverluste im Biogasprozess nicht eindeutig auf „Totzonen“ zurückgeführt werden.

Mit zunehmendem TS-Gehalt und damit einhergehend steigender Viskosität sanken die Strömungsgeschwindigkeiten an allen Messpositionen um bis zu 98 %. Durch das hochviskose Gärsubstrat wurde auch die Reichweite der Rührwerke verändert. So war die Reichweite des TMR zu Beginn der Untersuchung sehr stark ausgeprägt und verringerte sich bis zum Ende des Versuchszeitraums, wie anhand der Strömungsgeschwindigkeiten an Messstelle 1.1 und Höhe 3,0 m erkennbar wird. Dort waren die Geschwindigkeiten zu Beginn der Untersuchung bei maximal $81,78 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ und verringerten sich bis auf $14,84 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ in der letzten Versuchswoche.

Für das untersuchte Langachsrührwerk mit einem Einbauwinkel von 45° kann aufgrund der durchgeführten Messungen keine Aussage darüber getroffen werden, ob Strömungen außerhalb der Horizontalen auftreten. Hierfür war der verwendete Messsensor nicht geeignet, da mit diesem lediglich horizontale Strömungen gemessen werden konnten. Es ist jedoch sehr wahrscheinlich, dass aufgrund der Einbaulage des Rührpropellers auch vertikale Strömungen induziert werden.

Das Fließverhalten wurde im Verlauf der Untersuchung mit ansteigender Viskosität homogener. Betrachtet man den gesamten Fermenter, so traten die höchsten Geschwindigkeiten in den mittleren Schichten (Fermenterhöhe: 1,5 bis 3 m) sowie den mittleren Radien (Durchmesser: 4,5 bis 9 m) auf. In der Nähe der Wände, des inneren Betonpfeilers sowie in Richtung Boden nahmen die Strömungsgeschwindigkeiten stark ab. Aufgrund der Einbaulage beider Rührwerke und deren Wirkrichtung sind die höheren Geschwindigkeiten in den mittleren Schichten sowie dem mittleren Radius zu erklären.

Schlussfolgerungen

Es konnten in dieser Untersuchung Strömungsprofile im Fermenter aufgenommen werden sowie der Einfluss des TS-Gehaltes und der dynamischen Viskosität bezogen auf die Scherrate des Gärsubstrates aufgezeigt werden. Im Versuchszeitraum nahm der Trockensubstanzgehalt des Gärsubstrates relativ um 38 % zu. Mit dem Anstieg des Trockensubstanzgehaltes stieg auch die scheinbare Viskosität des Gärsubstrates um 85 % an. Der Anstieg der Viskosität und des TS-Gehaltes führte dazu, dass die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten bei gleichen Rührzeiten und Drehzahlen der Rührwerke im Versuchsfermenter um mehr als 97 % abnahmen. Mit der absoluten Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten verringerte sich auch deren Schwankung. Dies legt den Schluss nahe, dass in niedrigviskosen Gärsubstraten turbulente Strömungen dominieren, während in hochviskosen Gärsubstraten laminare Strömungsverhältnisse überwiegen. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse liefern erstmals Grundlagen für entsprechende Strömungsmessungen im Praxisfermenter, sodass bisherige Ergebnisse aus CFD-Modellen, wie von KOLL (2012) dargestellt, validiert werden können: Die in der vorliegenden Studie gemessenen maximalen Strömungsgeschwindigkeiten waren denjenigen in den CFD-Modellen von Koll sehr ähnlich. Die Ergebnisse dieser Arbeit belegen jedoch, dass mit den bisherigen Modellen die durchschnittlichen Geschwindigkeiten über das gesamte Behältervolumen hinweg deutlich überschätzt wurden. So sind im Bereich der mittleren Radien die Ge-

schwindigkeiten in der Praxis um bis zu 95 % (CFD: $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ nach KOLL (2012), Praxis: $1,07 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) und in den innersten Bereichen des Fermenters teilweise sogar um 99,5 % (CFD: $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ nach KOLL (2012), Praxis: $0,05 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) geringer als in den Modellen. Es konnte in beiden Untersuchungen ein starker TS-Einfluss auf das Fließverhalten festgestellt werden. Sowohl in den CFD-Modellen als auch in den Praxismessungen wurde ein sogenannter Teetasseneffekt festgestellt (KOLL 2012): Hierbei sind die Strömungsgeschwindigkeiten in der Fermentermite am niedrigsten.

Mit den hier vorgestellten Ergebnissen können Strömungssimulationen angepasst und verbessert werden. Dies kann dazu beitragen, dass zukünftige Studien allgemein effektiver gestaltet werden und Untersuchungen im Labor oder in Simulationen näher an die tatsächlich in der Praxis vorherrschenden Verhältnisse herangeführt werden können. Diese Arbeit unterstützt die These, dass es aufgrund der Geschwindigkeitsverteilung im Fermenter zu „Totzonen“ kommen muss. Untersuchungen zur Nährstoffverteilung von LEMMER et al. (2013) und KRESS et al. (2018) konnten diese These jedoch nicht bestätigen, weshalb davon ausgegangen werden muss, dass weitere Mechanismen zur Nährstoffverteilung beitragen. Hierfür kommen Diffusionsprozesse, aber auch auftretende Temperaturunterschiede oder aufsteigende Gasblasen in Frage. Entsprechende Effekte können aber in Praxisanlagen kaum untersucht werden, weshalb dies durch Laborversuche oder in Simulationen zu beweisen wäre.

Literatur

- Adhikari, B.; Jindal, V.K. (2001): Fluid flow characterization with tube viscometer data. *Journal of Food Engineering* 50(4), pp. 229–234
- Baker, R. C. (2016): *Flow Measurement Handbook - Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications*. Cambridge University Press
- BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2017): *Erneuerbare Energien und EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2017)*. Berlin, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
- FNR (2013): *Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung*. Gülzow, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- Gemmeke, B.; Rieger, C.; Weidland, P.; Schröder, J. (2009): *Biogas-Messprogramm II, 61 Biogasanlagen im Vergleich*. Gülzow bei Güstrow, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
- Jobst, K.; Lomtscher, A.; Deutschmann, A.; Fogel, S.; Rostalski, K.; Stempin, S.; Brehmer, M.; Kraume, M. (2015): *Optimaler Betrieb von Rührsystemen in Biogasanlagen*. In: *Tagung KTBL/FNR-Kongress, KTBL/FNR, 22.–23.09.2015, Potsdam, KTBL, S. 140–149*
- Kress, P.; Nägele, H.-J.; Oechsner, H.; Ruile, S. (2018): Effect of agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters. *Bioresource Technology* 247, pp. 1–6
- Koll, C. (2012): *Aufnahme, Auswertung und Beurteilung rheologischer Parameter zur Auslegung und Simulation von Fördereinheiten sowie Rühraggregaten in Biogasanlagen*. Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover
- Lemmer, A.; Bekker, M.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2008): *Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“*. *Landtechnik - Agricultural Engineering* 63(2), S. 80–81, <https://doi.org/10.15150/lt.2008.778>
- Lemmer, A.; Nägele, 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
- Leonzio, G. (2018): Study of mixing systems and geometric configurations for anaerobic digesters using CFD analysis. *Renewable Energy* 123, pp. 578–589
- Lomtscher, A.; Jobst, K.; Fogel, S.; Rostalski, K.; Stempin, S.; Kraume, M. (2017a): Scale-up of mixing processes of highly concentrated suspensions using electrical resistance tomography. *Flow measurement and instrumentation* 53, pp. 56–66

- Lomtscher, A.; Jobst, K.; Kraume, M. (2017b): Fibers and particles in stirred systems: influence on the flow velocities. *Chemie Ingenieur Technik* 89(4), pp. 424–431
- Mönch-Tegeder, M.; Lemmer, A.; Hinrichs, J.; Oechsner, H. (2015): Development of an in-line process viscometer for the full-scale biogas proces. *Bioresource Technology* 178, pp. 278–284
- Nägele, H.; Lemmer, A.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2012): Electric Energy Consumption of the full-scale Research Biogas Plant „Unterer Lindenhof“: Results of longterm and full detail Measurements. *Energies* 5(12), pp. 5198–5214
- Prechtel, S. (2005): Optimierte Durchmischung von Biogasreaktoren. ATZ Entwicklungszentrum, Sulzbach-Rosenberg
- Scheftelowitz, M.; Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Hillebrand, K.; Naumann, K.; Ziegler, D.; Witt, J. (2015): Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben Ila Biomasse). Zwischenbericht Juni 2015, DBFZ, Leipzig
- Schulz, H.; Eder, B. (2006): Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiel. Staufen, Ökobuch
- Slatter, P.T. (1997): The rheological characterisation of sludges. *Water Science and Technology* 36(11), pp. 9–18
- Rostalski, K. (2009): Tauchmotorrührwerke in Biogasanlagen – Ein Beitrag zur Effizienzsteigerung. In: Tagungsband zur 18. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e. V. – Biogas: dezentral erzeugen – regional profitieren – international gewinnen. Fachverband Biogas e. V., 03.–05.02.2009, Hannover, S. 59–65
- Verein deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, VDLUFA (2007): Methodenbuch III - Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. Darmstadt, VDLUFA-Verlag
- Wiedemann, L.; Conti, F.; Janus, T.; Sonnleitner, M.; Zörner, W.; Goldbrunner, M. (2016): Mixing in Biogas Digesters and Development of an Artificial Substrate for Laboratory-Scale Mixing Optimization. *Chemical Engineering & Technology* 40 (2), pp. 238–247
- 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

Autoren

M. Sc. Philipp Kress ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **PD Dr. Andreas Lemmer** ist Projektleiter an der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie, **M. Sc. Bastian Kolb** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Verfahrenstechnik der Tierhaltungssysteme an der Universität Hohenheim, Garbenstr. 9, 70599 Stuttgart.
E-Mail: philipp.kress@uni-hohenheim.de

Dr. Hans-Joachim Nägele ist Dozent an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, ICBT Institut für Chemie & Biotechnologie, Einsiedlerstrasse 31, CH-8820 Wädenswil

Danksagungen

Diese Forschung wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 03KB101B) im Rahmen des Projektes „FlexFeed - Flexibilisierte Fütterung in Biogasprozessen mit Modell-basierter Prozesserkennung im Praxismaßstab“ gefördert.