

# Entwicklung praxistauglicher Messmethoden zur Viskositätsmessung in Biogasmedium

Wolfgang Fichtner<sup>1</sup>, Jens Zosel<sup>1</sup>, Wolfram Oelßner<sup>1</sup>, Boris Habermann<sup>2</sup>, Peter Zimmermann<sup>3</sup>  
und Michael Mertig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V. Meinsberg (KSI), Waldheim, Deutschland

<sup>2</sup>Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte (IASP), Berlin, Deutschland

<sup>3</sup>TEB Ingenieurbüro (TEB), Berlin, Deutschland

Kontakt: wolfgang.fichtner@ksi-meinberg.de

## Einleitung

Die Effizienz von Biogasanlagen hängt neben anderen Einflussfaktoren signifikant von der Viskosität des Biogasmediums ab. Bisher existiert noch kein zuverlässiges, leicht handhabbares und ökonomisches Verfahren zur *In-situ*-Messung dieses Parameters. Eine Übersicht bzgl. Geräten und Verfahren, die für die rheologische Charakterisierung von Gärsubstraten geeignet sind, wird in [1] gegeben.

Um Biogasmedien hinsichtlich ihrer Viskosität am optimalen Arbeitspunkt einzustellen und dauerhaft zu regeln, sollte im Vorhaben eine neuartige Viskositätsmessung entwickelt und erprobt werden, die für inhomogene, stückige und strukturviskose Biogasmedien in großen Reaktorvolumina integrale Messwerte liefert und für alle Prozesse mit flüssigen und breiigen Medien einsetzbar ist [2].

Folgende Messprinzipien sollten im Rahmen dieser Arbeit auf ihre praktische Einsatzfähigkeit für die Messung der Viskosität in Biogasmedien geprüft werden.

### A) Gastracermethode

Die Medienviskosität wirkt sich in hohem Maß auf die Aufstiegs- und Abstiegsgeschwindigkeit von Gasblasen und Körpern aus, die eine deutlich geringere Dichte als das Biogasmedium selbst aufweisen. Diese Abhängigkeit sollte für die Viskositätsmessung verwendet werden, indem an frei wählbaren Positionen im Fermenter, beispielsweise in Bodennähe, durch ein fest installiertes Rohr Gasblasen mit definiertem Volumen oder gasgefüllte Kunststoffkugeln (Tracer) freigesetzt werden. Sobald ein solcher Tracer an der Oberfläche des Gärmediums ankommt, lässt sich dies mit einer empfindlichen Spurengasmessung im Headspace bzw. mit einer elektromagnetischen Detektion des Kunststofftracers, beispielsweise über RFID-Technik, detektieren. Die Zeitdauer des Traceraufstiegs ist dann ein Maß für die Viskosität des Biogasmediums.

### B) Messung von Sinkgeschwindigkeiten

Ein zweites Verfahren, das zur Messung der Viskosität eingesetzt werden kann, besteht in der Messung von Absink- oder Aufstiegs- und Abstiegsgeschwindigkeiten von Probekörpern, vorzugsweise Kugeln oder abrollenden Probekörpern, mit deutlich höherer bzw. niedrigerer Dichte als der des Biogasmediums. Werden diese Probekörper beispielsweise

an dünnen Fäden oder Kabeln befestigt lassen sie sich nach der Messung leicht zurückholen und es kann ihre Position online überwacht werden. Beide unter A) und B) genannten Messmethoden können u.a. durch vertikale Bewegungen des Messmediums erheblich gestört werden. Diese lassen sich durch Abschalten der Rührwerke Großfermentern zwar vermeiden, im Hinblick auf die interessanten Aspekte der Strukturviskosität ergeben sich jedoch Einschränkungen, da die Viskosität auch in Fermentern mit intensiverer Strömung geprüft werden soll.

### C) Messung des Rotationswiderstandes von Probekörpern

Dieses Verfahren ist apparativ deutlich aufwendiger und somit auch kostenintensiver als die beiden vorgenannten Verfahren, lässt sich aber hervorragend für präzise Vergleichsmessungen vor allem in Laborreaktoren einsetzen und sollte deshalb im Vorhaben ebenfalls untersucht werden.

## Erprobung eines berührungslos arbeitenden Drehmomentsensors für Rührwerkswellen

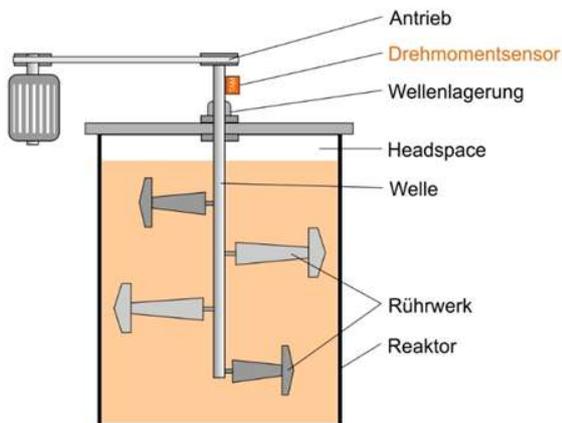
Da die Viskosität in realen Biogasmedien schwer zu messen ist, kann sie beispielsweise durch die Messung des aktuell wirkenden Drehmomentes an den Wellen der eingebauten Rührwerke indirekt kontrolliert und überwacht werden.

Um die Möglichkeiten einer berührungslosen Drehmomentmessung praktisch zu erproben, wurde ein magnetischer Drehmomentsensor A3-LD der Firma Torque And More GmbH, Starnberg, als Messsystem zur Erfassung eines viskositätsbezogenen Parameters an die Biogas-Laboranlage des KSI adaptiert (Abb. 1).

Das Ziel des Sensoreinsatzes bestand in der berührungslosen Erfassung des in die Rührerwelle eines Laborfermenters eingebrachten Drehmomentes, mit dem das in Abb. 2 dargestellte Rührwerk angetrieben wird. Nach der Konstruktion und Materialauswahl für eine neue Rührerwelle und einen mechanisch hochstabilen Adapter konnte der Drehmomentsensor unter Einsatz von Modell- sowie realen Gärmedien erfolgreich erprobt werden.



**Abb.1** Magnetischer Drehmomentsensor der Firma TAM, berührungslos an einer Stahlwelle appliziert [Prospektabbildung TAM *Torque And More*. 2017].



**Abb. 2:** Anordnung eines berührungslosen Drehmomentsensors zur indirekten Überwachung der Viskosität in einer Biogas-Laboranlage (schematisch).

Die Kalibrierung erfolgte an einem 1m langen horizontal an der Rührerwelle montierten Hebelarm. An dessen Ende wurde tangential mittels Federkraftwaage eine Kraft zwischen 0 bis 9,81 N (0,0 bis 1,0 kp) eingeleitet. Aus den Kalibrierdaten ergeben sich die in Tabelle 1 aufgeführten Werte.

**Tab. 1:** Kalibrierwerte eines magn. Drehmomentsensors.

| Drehrichtung | im Urzeigersinn | gegen Uhrzeigersinn |
|--------------|-----------------|---------------------|
| Steigung     | 0,0695 V/Nm     | -0,0692 V/Nm        |
| Nullpunkt    | 2,474 V         | 2,531 V             |

Die Absolutbeträge der Steigungen der Kurven differieren bei Änderung der Drehrichtung nur minimal. Erwartungsgemäß zeigte sich in den Werten des Achsenabschnittes (Signalspannung im drehmomentfreien Zustand) ein deutlicher Hystereseeffekt. Die Sensitivität sowie die daraus resultierende untere Messgrenze des gewählten Drehmomentsensors sind für den geplanten Einsatz an der Rührerwelle eines Laborfermenters nicht optimal, da hier Drehmomente im Bereich bis 20 Ncm zu erwarten sind.

Bei der Erprobung an einem mit Wasser gefüllten Reaktorgefäß zeigte sich, dass weitere Parameter, insbesondere der Abstand zwischen Rührerwelle und Sensor, Einflüsse auf die Messung ausüben. Geringfügige Abstandsänderungen, die sich während einer Umdrehung der Welle mit dem gewählten Aufbau nicht vermeiden lassen, verursachen eine sinusähnliche Schwingung auf dem Signal des Drehmomentsensors, aus der sich ebenfalls die Drehzahl und die Position der Welle ermitteln lassen.

Diese hohe Querempfindlichkeit zu nicht ursächlich mit dem Drehmoment verknüpften Parametern machte es erforderlich, bei der Signalauswertung neben der Mittelwertbildung die Differenzbildung der Messwerte zwischen den alternierenden Drehrichtungen in die Auswertung einfließen zu lassen. Der dafür notwendige Formalismus wurde in eine spezielle Auswertesoftware umgesetzt.

Nach der Erprobung des Drehmomentsensors im Labor des KSI und dem Transfer der Biogas-Laboranlage zum Projektpartner IASP wurden erweiterte Tests in realen Gärmedien durchgeführt und die automatische Auswertung der Resultate an die Gegebenheiten vor Ort angepasst. Es wurden Untersuchungen an verschiedenen Substraten vorgenommen und die Grenzen der Einsatzfähigkeit dieses Sensors ermittelt. Die dabei erzielten Resultate dieser Untersuchungen belegen, dass es trotz der suboptimalen Auslegung des berührungslosen Drehmomentsensors im Hinblick auf seine geringe Sensitivität und seine hohe untere Messgrenze möglich war, Drehmomentverläufe und damit Viskositätsveränderungen durch Anstiege in der Raumbelastung bzw. durch Verdünnungsprozesse mit diesem Sensor abzubilden. Es ist deshalb davon auszugehen, dass solche Sensoren bei optimaler Auslegung vorteilhaft für die Drehmomentmessung an Rührwerken für Biogasanlagen eingesetzt werden können.

## Viskositätsmessung mit Probekörpern

Als alternative Messmethode zur Bestimmung der Viskosität von Biogassubstrat mittels aufsteigenden Gasblasen wurden im KSI die Eignung mechanischer Probekörper zur Viskositätsmessung untersucht. Diese Probekörper werden mit einem Kabel oder Faden mit einer Haltevorrichtung verbunden und nach Freigabe durch ihre auftriebsverminderte Gewichtskraft durch das Biogassubstrat in Richtung der Schwerkraft bewegt. Alternativ kann auch durch Einstellung einer Probekörperdichte, die kleiner als die Dichte des Messmediums ist, ein Aufstieg der Probekörper im Messmedium erreicht werden. Diese Variante bietet sich an, wenn sich der Zugang zum Fermenter in der Nähe des Fermenterbodens befindet. Die Viskosität des Gärmediums beeinflusst den Bewegungsablauf der Probekörper so, dass sich kurz nach dem Start der Bewegung eine konstante mittlere Geschwindigkeit einstellt, deren Wert mit steigender Medienviskosität absinkt. Aus dieser mittleren Geschwindigkeit, der Dichtedifferenz zwischen Probekörper und Biogas-Gärmedium und dem Durchmesser des Probekörpers lässt sich die Viskosität berechnen. Werden Versuche mit unterschiedlichen Probekörperdichten durchgeführt und so verschiedene mittlere Geschwindigkeiten eingestellt, ist weiterhin die Erfassung der Abhängigkeit der Viskosität vom Schergefälle möglich. Für die Vorversuche im Labor wurde ein Glasgefäß mit einer Wasserfüllung (Leitungswasser bei 23°C) von 80 Litern eingesetzt. Die Länge der Messstrecke von der Wasseroberfläche bis zum Gefäßboden beträgt ca. 90 cm. Durch die Gefäßseitenwand wurden Videoaufnahmen der Bewegungsvorgänge erstellt. Mit Hilfe einer Haltekonstruktion oberhalb der Gefäßöffnung konnten definierte mechanische Verhältnisse für den Start des Bewegungsvorganges erzielt werden.

### A) Selbstabrollender Probekörper (SARP) am

#### Kabel

##### Konzeption

Variante 1 betrifft einen neu entwickelten und als Patent [3] eingereichten selbstabrollenden Probekörper (SARP), der sich in Analogie zum bekannten Spielzeug Jo-Jo im Messmedium bewegt (Abb. 3 und 4). Das durch das Eigengewicht des SARP forcierte Absinken im Biogassubstrat ist dementsprechend mit einer Rotation des SARP verknüpft. Das Biogassubstrat hemmt durch seine Viskosität den Bewegungsablauf des SARP maßgeblich, der durch eine integrierte Lage- und Kompass-Sensorik erfasst und in Echtzeit über das Messkabel zu einer externen Elektronikeinheit außerhalb des Biogassubstrates übertragen wird. Mit Hilfe einer neu geschaffenen Software wird aus den Sensordaten die vom Probekörper beschriebene Bahn-Zeit-Kurve ermittelt und daraus die gesuchten Viskositätswerte anhand von Kalibrierdaten berechnet.

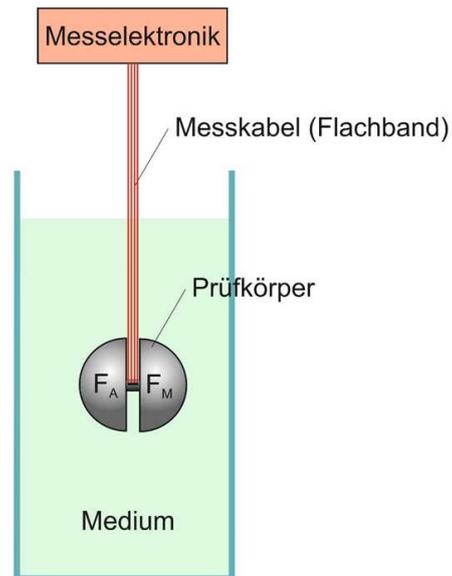


Abb. 3: Messanordnung mit SARP (schematisch).

Die zwei Halbkugeln des SARP mit dem Radius 50 mm sind mit einer zylindrischen kurzen Achse mechanisch verbunden, auf der ein 4-adriges Flachbandkabel montiert und aufgewickelt ist. Dieses Kabel ermöglicht die Echtzeitübertragung der Positionsdaten von der Sensorelektronik im Inneren einer Halbkugel an die Elektronikeinheit zur Datenverarbeitung außerhalb des Messmediums. Das Flachbandkabel ist zu Versuchsbeginn im Spalt zwischen den Halbkugeln aufgewickelt und mit der Haltevorrichtung oberhalb des Versuchsbehälters verbunden.

Zu Versuchsbeginn wird der SARP an der Medienoberfläche von einer zangenförmigen Haltevorrichtung freigegeben und sinkt daraufhin mit einer überlagerten Rotation im Modellmedium Wasser ab. Treibende Kraft ist dabei die Schwerkraft auf die Masse des SARP, vermindert um dessen Auftriebskraft im Messmedium.

Der reale Bewegungsablauf des SARP wurde in Vorversuchen durch Videoaufnahmen dokumentiert und ausgewertet, wobei die Kugelhälften mit verschiedenen Massestücken gefüllt wurden, um die Gewichtskraft zu variieren.



Abb. 4: Prototyp des SARP aus Aluminium mit montierter Sensorelektronik

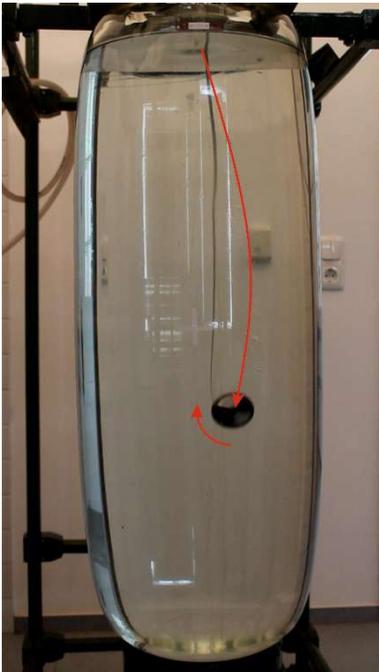
##### Messelektronik

Da in den undurchsichtigen Gärmedien in Biogasreaktoren der Bewegungsablauf des SARP nicht von außen be-

obachtbar ist, wird er durch die integrierte Sensorelektronik ermittelt. Diese besteht aus zwei Platinen, wobei die größere (Adafruit FLORA v3) einen Mikrocontroller Atmega32u4 trägt und die kleinere Platine einen Sensor LSM303DLHC mit zwei dreidimensionalen Sensoren für Magnetfeld und Beschleunigung enthält.

#### Bewegungsmessung

Zur Untersuchung des prinzipiellen Bewegungsablaufes des SARP erfolgten verschiedene Versuche, bei denen die wirksame Gesamtmasse (Eigenmasse – Masse des verdrängten Wassers) von 6,1 g bis 52,9 g variiert wurde. Die Bewegung wurde dabei mittels Videotechnik aufgezeichnet und ausgewertet. Es zeigte sich erwartungsgemäß, dass die vertikale Bewegung beim Abrollen des SARP mit einer horizontalen Komponente überlagert ist. Diese resultiert aus der Querkraft, die aufgrund des Magnus-Effektes auf einen rotierenden Körper im viskosen Medium quer zu dessen linearer Bewegung wirkt. Die Bahnkurve ähnelt damit einer nach unten gerichteten Parabel (Abb. 5).



**Abb. 5:** Bahnkurve eines SARP im Modellmedium Wasser

## **B) Kugelförmiger Probekörper (KP) am Faden**

#### Konzeption

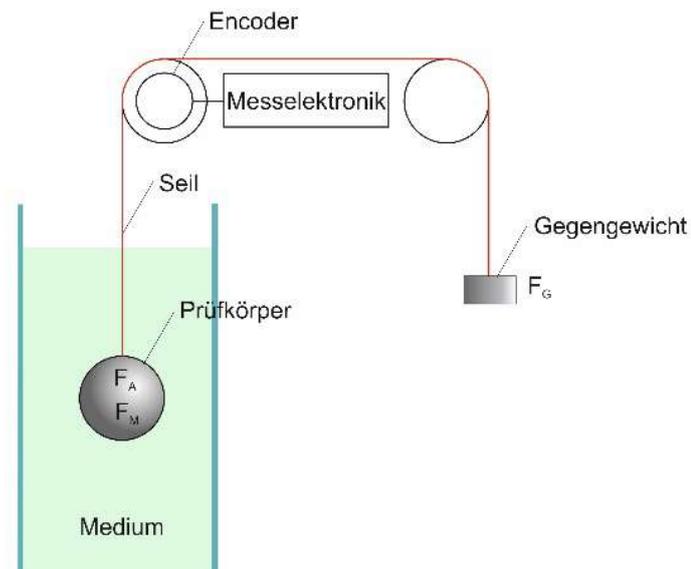
Der bei dieser Messvariante zum Einsatz gebrachte Probekörper ist eine Kugel mit einem Durchmesser von 50 mm, die durch 3D-Druck zweier miteinander verschraubbarer Halbkugeln gefertigt wurde. Für die Versuche in Wasser wurde die wirksame Masse zwischen 0 und 100g variiert. Im System aus Probekörper, Seil und Gegengewicht gemäß Abb. 6 wirken folgende Kräfte:

- $F_M$  Gewichtskraft auf die Kugel, resultierend aus deren Masse  $m_K$ ,
- $F_A$  Auftriebskraft der Kugel, resultierend aus deren Volumen und der Dichte des verdrängten Wassers
- $F_G$  Gewichtskraft auf das Gegengewicht, resultierend aus dessen Masse  $m_G$

Durch die Kombination der Kugel mit dem Gegengewicht am Seil konnten Versuche in den Modi „Steigen“ ( $F_M + F_A < F_G$ ) und „Sinken“ ( $F_M + F_A > F_G$ ) durchgeführt werden, wobei  $F_M$  und  $F_A$  unterschiedliche Vorzeichen aufweisen.

Bei der Betrachtung der dynamischen Bewegungsvorgänge wurden folgende Vereinfachungen getroffen:

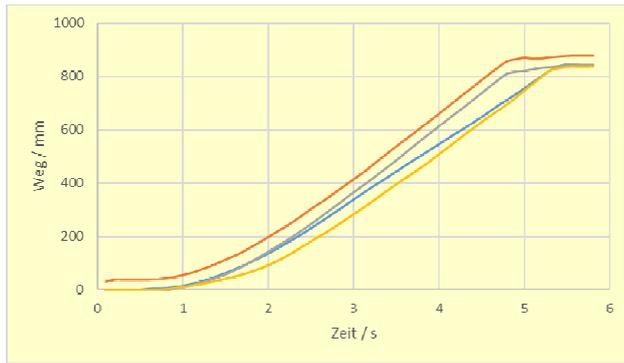
- Seil masselos
- Seil auftriebslos
- Seilrollen reibungslos
- Seilrollen frei von Trägheitsmomenten



**Abb. 6:** Messanordnung mit kugelförmigem Probekörper KP (schematisch)

#### Online-Messung

Die im oberen Teil der Abb. 6 schematisch dargestellte Messelektronik wurde an einem freien Wellenende einer Umlenkrolle montiert. Signalgeber ist dabei ein Encoder (Broadcom Inkrementalgeber, 256 Impulse/U). Die Erfassung des Drehwinkels  $\varphi$  über der Zeit während eines Bewegungsvorganges wird durch eine Software (TEB) realisiert und graphisch dargestellt. Die in Abb. 7 dargestellten Weg-Zeit-Verläufe zeigen eine relativ hohe Reproduzierbarkeit des Bewegungsablaufes der absinkenden Kugel. Nach einer Beschleunigungsphase in den ersten beiden Sekunden nach dem Start ist eine weitestgehend konstante Geschwindigkeit erreicht, ersichtlich an dem konstanten Anstieg der Kurven bis zum Bewegungsende.



**Abb. 7:** Weg/Zeit-Diagramm der Probekörperbewegung in vier Versuchen mit den Parametern  $m_K = 130,6$  g,  $m_G = 56,54$  g, Wassertemperatur  $19,7$  °C

Das Erreichen einer konstanten Endgeschwindigkeit ist ebenfalls im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm (Abb. 8) ablesbar. Hierbei ist die Überlagerung einer Schwankung charakteristisch, deren Ursache in der Ausbildung einer turbulenten Umströmung der Kugel bei Geschwindigkeiten  $> 100$  mm/s vermutet wird. Am Ende der Messstrecke geht die Geschwindigkeit abrupt auf null zurück.



**Abb. 8:** Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm.

## Vergleich der Probekörper

Für den Einsatz in der Praxis weisen beide Varianten verschiedene Vor- und Nachteile auf. Eine vergleichende Übersicht zu unterschiedlichen Kriterien ist in Tabelle 2 aufgeführt. Ausgehend von Erfahrungen zum Einsatz der Probekörper im Labor und Erfahrungen mit realen Gärmedien in Technikumsanlagen und Großanlagen wird für den kugelförmigen Probekörper KP eine größere Praxistauglichkeit prognostiziert als für den selbstabrollenden Probekörper SARP.

**Tab. 2:** Vergleich von praxisrelevanten Parametern der Probekörper

|                            | A) SARP   | B) KP   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Vergleichskriterium</b> |   |   |
| Sensorelektronik           | im SARP Sensorkabel im Substrat   | außerhalb der Kugel Sensorkabel außerhalb           |
| Hardwarekosten             | mittel  | gering  |
| Wegberechnung              | $f(\varphi, x, y, z)$   | $f(\varphi)$  |
| Viskositätsberechnung      | <b>aufwändig</b>  | <b>einfacher Zusammenhang</b>                       |
| phys. Modell               | umströmte Halbkugel um Querachse rotierend Spalt variable Tiefe         | umströmte Kugel                                     |
| Messvorgang                | beim Abrollen und Absinken bzw. Aufsteigen                              | beim Absinken oder Aufsteigen                       |
| Rückholvorgang             | Kabelreinigung erforderlich, automatisierbar                            | Seilreinigung erforderlich, automatisierbar         |
| Platzbedarf Messpfad       | mittel  | gering  |
| Fehlereinflüsse            | Dichteunterschiede<br>Kabelsteifigkeit<br>Magnus-Effekt<br>Spalteffekte | Dichteunterschiede<br>Seileinflüsse<br>Lagerreibung |

## Ausblick

Für die weitere Erprobung des Einsatzes mechanischer Probekörper sind Messungen in Probelösungen unterschiedlicher Viskosität (Mischung von Wasser mit Carboxymethyl-cellulose Natriumsalz) geplant. Dazu muss ein geeignetes Verfahren zur Schichtung von Lösungen unterschiedlicher Zellulosegehaltes gefunden werden. Damit lassen sich vertikale Gradienten hinsichtlich der Viskositätswerte realisieren, die mit den Messverfahren entsprechend abgebildet werden sollen, um deren Einsatzfähigkeit zu verifizieren.

Für Messungen in Biogassubstrat soll ein Versuchsreaktor eingesetzt werden. Die hardwareseitig bereits fertig gestellte Sensorelektronik für den Einsatz des SARP wird hinsichtlich ihrer Software ergänzt und in Betrieb genommen.

Für die Halte- und Rückholvorrichtungen von SARP und KP sind praxistaugliche Konstruktionen zu entwickeln.

## Literatur

- [1] Messmethodensammlung Biogas, Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich, Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassennutzung“ Band 7; Kap. 5.5 „Viskosität“, Seite 102, November 2013.
- [2] BAIER, M., HABERMANN, B., CHRISTMANN, B., ZOSEL, J., FICHTNER, W., ZIMMERMANN, P.: VisOB-Viskositätssensor zur Optimierung von Biogasprozessen. 13. *Biogasfachtagung* in Potsdam, 12/2018
- [3] ZOSEL, J. OELßNER, W. MERTIG, M.: Vorrichtung zur Bestimmung der Viskosität von Biogasmedien. *Patent-anmeldung* 2.3.2018

## Danksagung

Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Vorhaben VisOB wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt.

Das Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V. Meinsberg wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung.