



Auswirkungen der Applikation von Pyrolysekohle im Biogasprozess

eingereicht am 24.07.2023

von

Elisa Deiß | Südring 7 | 18059 Rostock

Matrikel-Nr.: 220200598

Gutachter:

Dr. Jan Sprafke

Universität Rostock

Justus-von-Liebig-Weg 6

18059 Rostock

Zweitgutachter:

Dr. Hans Korte

Universität Rostock

Tannenweg 22

18059 Rostock

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004949

Bachelorarbeit

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung - Keine Bearbeitungen 4.0 International
Lizenz.

I. Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Dazu gehört an erster Stelle mein Betreuer Dr. Jan Sprafke, welcher mir die Möglichkeit gegeben hat, im Bioenergetikum der Universität Rostock Erfahrungen in der wissenschaftlichen Praxis zu sammeln. Ich bedanke mich für seine hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit.

Zudem gebührt mein Dank meiner Kollegin Annabell Apitz, die mich in das Vorgehen der Viskositätsmessung eingeführt hat und immer ein offenes Ohr für experimentelle und technische Schwierigkeiten hatte.

Mein abschließender Dank gilt meinen Eltern, die mich während des Studiums stets unterstützt und bekräftigt haben, meinen Weg zu gehen.

Elisa Deiß

Rostock, 21.07.2023

II. Inhaltsverzeichnis

I.	Danksagung	3
II.	Inhaltsverzeichnis.....	5
III.	Abbildungsverzeichnis.....	7
IV.	Formelverzeichnis	9
V.	Tabellenverzeichnis.....	10
VI.	Abkürzungsverzeichnis	11
1.	Einleitung.....	13
2.	Status quo der Kohleapplikation	15
3.	Chancen und Herausforderungen des Wirtschaftsdüngers	21
3.1	Definition von Wirtschaftsdünger.....	21
3.2	Einsatz im Biogasprozess	22
3.2.1	Vorteile für Anlagenbetreiber.....	22
3.2.2	Herausforderungen Stickstoffgehalt und Schaumbildung.....	23
4.	Grundlagen der Viskositätsmessung	26
4.1	Definition von Viskosität	26
4.2	Rheologische Begriffe	26
4.3	Einfluss der Viskosität auf den Biogasprozess	31
4.4	Ermittlung der Viskosität.....	33
4.4.1	Bestimmung nach DIN	36
4.4.2	Bestimmung über die scheinbare Viskosität.....	37
4.5	Zusammenhang zwischen Temperatur und Viskosität	39
5.	Rheologische Versuche.....	40
5.1	Material	40
5.2	Aufbau und Durchführung des Laborversuchs	40
5.2.1	Probenvorbereitung.....	41
5.2.2	Bestimmung der Viskosität.....	42
5.2.3	Einsatz verschiedener Substrate im Laborversuch	45
5.3	Durchführung und Ergebnisse.....	48
5.3.1	Einfluss der Homogenisierung	48
5.3.2	Einfluss der Kohle	50
5.3.3	Einfluss der Temperatur	60
5.3.4	Einfluss des Einfrierens.....	61
5.3.5	Einfluss der Lagerdauer	64

5.3.6	Einfluss des Wirtschaftsdüngers	65
5.4	Zusammenfassung und Versuchsbeurteilung	65
5.5	Realisierbarkeit im Praxismaßstab	67
6.	Fazit.....	68
VII.	Literaturverzeichnis	69
VIII.	Anhang.....	73
7.	Eidesstattliche Erklärung	76

III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung Schaumaufbau	24
Abbildung 2: Zweiplattenmodell – Fluidscherung zwischen ruhender und bewegter Platte	26
Abbildung 3: Funktionsweise von CS- und CR-Rotationsrheometern nach der Searle- Methode	34
Abbildung 4: Funktionsweise eines CR-Rotationsrheometers nach der Couette- Methode	34
Abbildung 5: Homogenisierung einer Fermenterprobe mit einem handelsüblichen Mixer	41
Abbildung 6: Schaumverhalten einer Biogasanlagenprobe während der Homogenisierung	42
Abbildung 7: Probe vor und nach dem Aufrühren	42
Abbildung 8: Messung im Becherglas	43
Abbildung 9: Messung in der Weithalsdose	43
Abbildung 10: Ungültige Messung mit der DIN-SP-5 aufgrund von Ablagerungen	44
Abbildung 11: Übersicht der Probengewinnung für V1 bis V3	46
Abbildung 12: Übersicht der Probengewinnung für V4 bis V6	47
Abbildung 13: Kiefernholzwürfel vor und nach der Pyrolyse	47
Abbildung 14: Viskositätsverlauf während der Messung bei Mischprobe 1	49
Abbildung 15: Viskositätsverlauf während der Messung bei Mischprobe 2	49
Abbildung 16: Ablagerungen auf der Spindel bei frischer Probe	50
Abbildung 17: Ablagerungsfreie Spindel bei homogenisierter Probe	50
Abbildung 18: Schaumverhalten bei einer Probe ohne Kohlezusatz	51
Abbildung 19: V1, Viskositätsverlauf bei 21 °C	52
Abbildung 20: V1, Dokumentation der Bläschensetzung nach dem Aufrühren einer Kohle-Probe bei 36 °C	53
Abbildung 21: V1, Viskositätsverlauf bei 36 °C	54
Abbildung 22: Ablagerungen auf der Messspindel bei allen drei Probensätzen	54
Abbildung 23: V1, Viskositätsverlauf bei 7 °C	56
Abbildung 24: Ablagerungen auf der Messspindel trotz zweiter Homogenisierung	56
Abbildung 25: Einfluss von zweifacher Homogenisierung und Lagerdauer (Probe blanko)	57

Abbildung 26: V1, sichtbarer Bodensatz bei Entsorgung der Proben nach der Messung bei 7 °C	57
Abbildung 27: V1, Einfluss der Kohle auf das viskose Verhalten von Biomasse	58
Abbildung 28: V2, Einfluss der Kohle auf das viskose Verhalten von Biomasse	59
Abbildung 29: V3, Einfluss der Kohle auf das viskose Verhalten von Biomasse	59
Abbildung 30: V1, Temperatureinfluss auf Probe blanko	60
Abbildung 31: V1, Temperatureinfluss auf Probe Kohle 10 µm	61
Abbildung 32: V1, Temperatureinfluss auf Probe Kohle 70 µm	61
Abbildung 33: V3, nach dem Auftauen homogenisierte Proben	62
Abbildung 34: Vergleich der Versuchsreihen V1 bis V3 bei 6 °C	63
Abbildung 35: Vergleich der Versuchsreihen V1 bis V3 bei 21 °C	63
Abbildung 36: Vergleich der Versuchsreihen V1 bis V3 bei 36 °C	63
Abbildung 37: V5, Temperatureinfluss auf Mischprobe 3 bei vier Messungen an einem Tag	64

IV. Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der Schubspannung	27
Formel 2: Berechnung der Geschwindigkeitsdifferenz.....	27
Formel 3: Berechnung des Geschwindigkeitsgefälles.....	28
Formel 4: Berechnung der dynamischen Viskosität.....	28
Formel 5: Berechnung der Schergeschwindigkeit unter Einbezug des Systemfaktors	38
Formel 6: Abhängigkeit der scheinbaren Viskosität von der Schergeschwindigkeit.....	38
Formel 7: Maximal zulässige Viskosität	44

V. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rheologische Begriffe nach DIN	29
Tabelle 2: Maximal zulässige Viskosität für die im Versuch verwendeten Spindeln.....	44
Tabelle 3: Übersicht der Versuchsreihen	47
Tabelle 4: V1, Probenverhalten während der Viskositätsmessung bei 21 °C	51
Tabelle 5: V1, Probenverhalten während der Viskositätsmessung bei 36 °C	53
Tabelle 6: V1, Probenverhalten während der Viskositätsmessung bei 7 °C	55
Tabelle 7: Untersuchung der Auswirkungen der Kohleadaption:	
V1, Viskositätsmessung bei 21 °C	73
Tabelle 8: Untersuchung der Auswirkungen der Kohleadaption:	
V1, Viskositätsmessung bei 36 °C	74
Tabelle 9: Untersuchung der Auswirkungen der Kohleadaption:	
V1, Viskositätsmessung bei 7 °C	75

VI. Abkürzungsverzeichnis

A	Fläche
ATB	Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie
AG	Aktiengesellschaft
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
cm	Zentimeter
d	Tag
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBC	European Biochar Certificate (Europäisches Pflanzenkohle Zertifikat)
ECHA	European Chemical Agency (Europäische Chemikalienagentur)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
F	Kraft
FM	Frischmasse
FONA	Forschung für Nachhaltigkeit
FZ	Formelzeichen
h	Stunde
HTC	Hydrothermale Carbonisierung
HTK	Hühnertrockenkot
IKTS	Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme
K	Kelvin
L	Liter
M	Drehmoment
m ²	Quadratmeter
mg	Milligramm
ml	Milliliter
mm	Millimeter
MP	Mischprobe
mPa s	Millipascalsekunde
N	Newton
NH ₃	Ammoniak
NH ₄	Ammonium-Ion

NH ₄ -N	Ammonium
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (Europäische Chemikalienverordnung)
rpm	revolutions per minute (Umdrehungen pro Minute)
s	Sekunde
SDG	Sustainable Development Goal (Ziel für nachhaltige Entwicklung)
TM	Trockenmasse
V	Versuchsreihe
v	Geschwindigkeit
W	Watt
%	Prozent
°C	Grad Celsius

1. Einleitung

Das Vorantreiben der weltweiten regenerativen Energiewende ist eines der 2015 deklarierten 17 „Sustainable Development Goals“ der Vereinten Nationen („UN-Nachhaltigkeitsziele“). Als „SDG 7: Bezahlbare und saubere Energie“ definiert, soll bis 2030 der globale Zugang zu sauberen Kraftstoffen und Technologien geschaffen und weitere Fortschritte bei der Integration erneuerbarer Energien in Anwendungssystemen erzielt werden (Vereinte Nationen 2023).

Die Gründe für den Ausbau der erneuerbaren Energien sind vielfältig: Sei es die globale Erwärmung, der menschgemachte Klimawandel, die Endlichkeit fossiler Rohstoffe oder die Abhängigkeit vieler Länder von importierten Energieträgern. Die Förderung „sauberer“, grüner Energie zu Substitution fossiler Energieträger ist somit ein zentrales, geopolitisches Ziel.

Biogasanlagen nehmen dabei eine wichtige Schlüsselfunktion ein (Fachverband Biogas e. V. 2019): Während bspw. Windkraft und Photovoltaik nur volatil Strom generieren können, ist Energie aus Biomasse grundlastfähig. Sie kann allgegenwärtig gewonnen werden und jederzeit flexibel einspringen, wenn andere Erneuerbare nicht nutzbar sind.

Das in der Anlage gebildete und anschließend im Blockheizkraftwerk verbrennende Gas produziert nicht nur Strom, sondern auch Wärme, die sowohl für den Eigenbedarf der Anlage, als auch in der externen Versorgung Anwendung findet. Biogas ist jedoch nicht nur eine Variable in der stetigen Energieversorgung, es lässt sich, aufbereitet zu Biomethan, auch im Mobilitätssektor als Kraftstoff einsetzen. Indem es das häufig verwendete Erdgas substituiert, leistet es ferner einen Beitrag zur Dekarbonisierung im Verkehr und der chemischen Industrie (Zimmermann u. a. 2021).

Der Betrieb von Biogasanlagen wird allerdings auch umstritten, insbesondere im Zusammenhang mit der „Teller oder Tank?“-Debatte. Anstatt allein für den Biogasprozess Energiepflanzen anzubauen, wäre es vorteilhaft, auf im Prozessgeschehen anfallende biogene Reststoffe zurückzugreifen (Thiering und Bahrs 2011).

Wirtschaftsdünger bietet sich dort als Alternativsubstrat an, zumal er als Abfall- bzw. Nebenprodukt produktionskostenfrei zur Verfügung steht (Thiering und Bahrs 2011). Jedoch wird bisher nur ein Drittel seines Potenzials in Deutschland genutzt: Die meisten der ca. 9.600 Biogasanlagen setzen weiterhin Silomais und Ganzpflanzensilagen als Substrat ein (BMEL Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2022). Mit Hinblick auf die Verschärfung des sogenannten „Maisdeckels“ im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2023 der

Bundesregierung, wird sich jedoch der Einsatz von Getreidekorn und Mais zukünftig verringern: Er soll von bisher 40 Masseprozent auf 30 Masseprozent ab dem Jahr 2026 sinken (Bundesregierung Deutschland 2022). Der Gesetzgeber möchte damit die „Vermaisung“ der Landschaft reduzieren und „die Verwertung von alternativen Einsatzstoffen wie Abfall- und Reststoffen in Biogasanlagen [anreizen]“.

Wirtschaftsdünger erweist sich allerdings bei der Vergärung als nur bedingt einsetzbar, da er die den Biogasprozess störende Ammonium-Hemmung begünstigt (ATB 2014). Durch Zugabe von Pflanzenkohle soll seine Verwendung nun deutlich gesteigert werden, da diese laut Herstellern den Prozessablauf und die Biogasproduktion optimiert (Fetzer Rohstoffe + Recycling GmbH 2023). Dazu haben bereits mehrere Studien eine signifikante Gasertragssteigerung als Folge der Applikation nachweisen können (Neumann 2019).

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollen daher die Auswirkungen der Kohlezugabe auf Parameter wie Rheologie und Schaumbildung untersucht werden. Des Weiteren soll eine Methode entwickelt werden, um Viskositätsmessungen an Gärsubstraten sinnvoll durchzuführen. Parallel dazu werden zum Zeitpunkt der Experimente noch andere Versuche bezüglich eines Forschungsprojektes ablaufen.

2. Status quo der Kohleapplikation

Die fördernden Eigenschaften der Kohlezugabe in den Gärprozess sind bereits seit langerem bekannt. 2014 verfasste das ATB Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. den Artikel „Kohle-Doping für Biogasanlagen - Mit Biokohle zu höheren Gaserträgen“, welcher auf der Webseite FONA (Forschung für Nachhaltigkeit) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) veröffentlicht wurde. Es wurde nachgewiesen, dass „der Einsatz von Biokohle einen effektiven Ansatz zur Erhöhung der Biogasausbeute sowie zur Stabilisierung des Biogasprozesses bietet“.

Bio- bzw. Pflanzenkohle bezeichnet ein Produkt der thermochemischen Behandlung von Biomasse. Sie ist für Anlagenbetreiber sehr attraktiv, weil sie aus den anfallenden Gärresten selbst hergestellt werden (ATB 2014).

Die Kohle wird häufig mit dem Pyrolyseverfahren hergestellt: Dabei werden Energieträger thermisch unter Sauerstoffausschluss zersetzt, bis die wasserstoff- und sauerstoffreichen flüchtigen Bestandteile abgespalten sind bzw. der Träger „entgast“ ist (Krzack u. a. 2018). Der Prozess wird daher auch Entgasung oder Thermolyse genannt. Je nach Höhe der Behandlungstemperatur wird in der Pyrolyse zwischen der Schwelung (bei 500 °C bis 600 °C) und der Verkokung (bei 800 °C bis 1.100 °C) unterschieden. Des Weiteren erfolgt eine Differenzierung aufgrund der unterschiedlichen Einsatzstoffe in den Verfahren: Die Schwelung wird zur Pyrolyse von Holz, Braunkohle, Kohlenwasserstoffen und Abfällen eingesetzt, wohingegen die Verkokung nur der Behandlung von Braun- und Steinkohle dient. Je nach Pyrolyseart fallen dabei unterschiedliche Kondensate und Gase als Nebenprodukte an.

Biokohle wird folglich auf Basis eines Schwelprozesses gewonnen, der bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen stattfindet. Ein anderweitiges Verfahren ist die hydrothermale Behandlung, bei der im wässrigen Milieu je nach Prozessbedingungen ein braunkohlenähnlicher Energieträger generiert wird (Krzack u. a. 2018).

Die Kohle findet Anwendung zur Steigerung des Wirkungsgrades von Biogasanlagen und Optimierung von Prozessbedingungen (ATB 2014). Sie wird deshalb auch den bisher weniger genutzten biogenen Reststoffen beigemengt, wozu u. a. der Wirtschaftsdünger gehört (siehe Kapitel 3). Ihr Einsatz erweist sich insbesondere bei prozessstörenden Reaktionen, wie der Ammonium-Hemmung, als wirtschaftlich. Ammonium, welches aus organischem Stickstoff während der Vergärung gebildet wird, stört die Mikroflora im Fermenter und verringert somit die Gasausbeute. Gerade stickstoffreiche Abfälle wie der Wirtschaftsdünger Geflügelmist, erweisen sich in der Verwendung als schwierig. Die Untersuchungen des ATB

haben gezeigt, dass die Zugabe von Biokohle eine beginnende Ammonium-Hemmung unterbinden und gleichzeitig die Struktur der Mikroflora positiv beeinflussen kann. Ferner wurde ein erhöhter Anteil methanbildender Mikroorganismen als Folge der Applikation nachgewiesen. Da die Kohle auch als direkte Nahrungsquelle für die Mikroorganismen nutzbar ist, kann dies als weitere Variable für den Anstieg des Biogasertrages angesehen werden.

Die Wissenschaftler des ATB definierten die bei ihren Versuchen eingesetzte Pflanzenkohle als „ein kohlenstoff- und oberflächenreiches Material, das ähnlich der Holzkohle bei der Verschmelzung von Biomasse entsteht“. Es wurden zwei Gärreste verwendet, deren Umwandlung zu Biokohle einerseits durch hydrothermale Carbonisierung, andererseits durch Pyrolyse erfolgte. Letztere Pyrolysekohle wurde auch in den nachfolgenden Versuchen zur Bestimmung der Viskosität verwendet (siehe Kapitel 5.2.3).

Die durchgeführten Versuche zeigten, dass die positive Wirkung der Biokohle sinkt, je höher die Ammoniumkonzentration im Gärsubstrat steigt. Allerdings wurden die getesteten Biokohlen nicht gezielt für den Einsatz in Biogasanlagen entwickelt, wodurch „noch ein erhebliches Optimierungspotenzial zu erwarten“ ist.

Es wurde außerdem festgestellt, dass die mittels hydrothermaler Carbonisierung erzeugte Kohle besonders für den Einsatz in Biogasanlagen geeignet ist. Da der gängige HTC-Prozess im Wasser stattfindet, biete er passende Bedingungen für die Verkohlung von feuchten Gärresten. Des Weiteren zeichne sich das Verfahren durch eine hohe Energieeffizienz aus, da das in kombinierten Biogas-Biokohle-Verfahren anfallende Prozesswasser sich als gut vergärbare Biomasse in den Fermenter einspeisen lässt und die Kohle als Aufwuchsträger und zusätzliche Nahrungsquelle für Mikroorganismen nutzbar ist. Laut dem ATB lässt sich somit der Gasertrag insbesondere bei schwer abbaubaren Biomassen wie Stroh „deutlich - bis auf das Doppelte – steigern“.

Die Applikation von Kohle im Gärprozess erfolgt jedoch längst nicht mehr ausschließlich im Labor: Sie hat sich schon vor Jahren in der Praxis etabliert. Nach Sina Beckmann, Geschäftsführerin des Beratungsdienstleisters „Energieeffekte“, liefert Pflanzenkohle vielseitige Vorteile für Anlagenbetreiber (Neumann 2019). Sie nimmt Schadstoffe aus dem Prozess auf und bindet Ammoniumstickstoff, wodurch die für den Gasertrag schädliche Ammonium-Hemmung verringert wird. Dadurch ermöglicht sie den vermehrten Einsatz stickstoffhaltiger Substrate wie z. B. Mist. Des Weiteren begünstigt die schwammige Oberflächenstruktur der Kohle die Bakterienansiedelung, was zu einer Zunahme der Mikroorganismen und somit zu

einer Zunahme des Umsatzes im Prozess und der Biogasausbeute führt. Die Erhöhung derselben kann ferner in den funktionalen Gruppen der Kohleoberfläche begründet sein, welche einen direkten oder indirekten Elektronentransfer ermöglichen und dadurch chemische Reaktionen beschleunigen (Kumar u. a. 2021).

Zusätzlich dazu übt die Kohle einen positiven Einfluss auf den pH-Wert des Fermenterinhaltes aus: Dieser steigt aufgrund ihrer basischen Wirkung an, womit das Wachstum der Archaeen (bevorzugen $\text{pH} > 8$) begünstigt wird (Neumann 2019). Es besteht in diesem Zusammenhang die Vermutung, dass die Kohle die Konzentration an gelösten Säuren wie bspw. Propionsäure beeinflusst (Zimmermann u. a. 2021). Indem sie diese adsorbiert, dient sie als Puffer im Prozess. Der Ursprung dieser Eigenschaft könnte dabei in ihrem basischen Ascheanteil liegen. Der pH-Wert von Biokohle ist zwar nicht festgelegt, liegt jedoch häufig im Bereich von 10 (Meyer-Kohlstöck u. a. 2016). Eine weitere Erklärung für seinen Anstieg wäre, dass aufgrund des Kapillardrucks innerhalb der Kohle eine Verschiebung des NH_3/NH_4 -Verhältnisses stattfindet (Neumann 2019).

Zudem hält die Kohle den Biogasprozess viskos, was zu einer Verbesserung der Rührbarkeit des Fermenterinhaltes und sinkenden Stromaufnahmen für Pumpen und Rührwerke führt (Neumann 2019). Somit lassen sich auch Schwimmschichten vermeiden.

Daneben soll der Einsatz von Pflanzenkohle laut Herstellern wie der EGoS GmbH (2023) die Schaumbildung in Biogasanlagen verhindern. Dieses Phänomen wird auch von anderen Kohleherstellern im Zusammenhang mit der Verwendung zur Gülleaufwertung beschrieben (Beiselen GmbH 2022).

Beratungskunden von „Energieeffekte“ beobachteten ferner einen sinkenden Bedarf an Spurenelementen als Folge der Kohleapplikation (Beckmann in Neumann 2019). Da diese selbst keine Spurenelemente enthält, besteht die Vermutung, dass der vermehrte Einsatz stickstoffhaltiger Substrate eine erhöhte Zufuhr bewirkt. Es besteht laut Beckmann aber auch die Möglichkeit, „dass die Kohle für eine bessere Verfügbarkeit der prozessinternen Spurenelemente sorgt“.

Dass die Biokohle das Prozessgeschehen fördert, konnte auch der Anbieter Carbuna AG in Zusammenarbeit mit einem großen deutschen Biogasanlagenbetreiber nachweisen (Neumann 2019). In einem dreimonatigen Versuch wurde Pflanzenkohle in zwei Fermentern analysiert und gegen einen Referenz-Fermenter getestet. Dies bewirkte einen spezifischen Gasmehrertrag von 5,2 % und eine Steigerung der Normbiogasproduktion um 10,2 %. Der Betreiber konnte dadurch Ausbeute und Durchsatz deutlich verbessern. Laut der Carbuna

AG tritt dieser Effekt in allen Biogasanlagen, die Pflanzenkohle verwenden, auf. Er sei dabei stärker in Anlagen zu finden, die extrem saure oder stickstoffreiche Substrate einsetzen.

Als potenzielle Gründe für die Verbesserung des Ertrages benennt der Kohleanbieter die guten Puffereigenschaften der Pflanzenkohle bei sauren Substraten, die Sorption von Toxinen, die z. B. durch das Absterben von Bakterien freigesetzt werden, den allgemein verbesserten Elektronentransfer zur Steigerung mikrobieller Aktivität sowie die Fähigkeit zur Ammoniumpufferung. Die Kohleadaption bringe also insgesamt eine „Summe verschiedener Verbesserungseffekte“ mit sich. Die Firma plante zu diesem Zeitpunkt ein Forschungsprojekt, um diese genauer zu untersuchen.

2020 arbeitete die Carbuna AG zusammen mit der DBU Deutsche Bundesstiftung Umwelt an einer Studie, deren Ziel die Untersuchung der Nutzung von Pflanzenkohle als Zuschlagsstoff in Biogasanlagen in Theorie und Praxis war. Es sollten daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, um den Biogasprozess effizienter und letztendlich umweltfreundlicher zu gestalten. In dem 2021 folgenden Abschlussbericht „Pflanzenkohle zur Steigerung des Methanertrags in Biogasanlagen“ steht jedoch geschrieben, dass sich kein signifikanter Ertragszuwachs durch Kohlezugabe feststellen ließ (Zimmermann u. a. 2021). Allerdings wurde nicht untersucht, ob die in Biogasanlagen auftretenden Prozesshemmer, wie bspw. Schwimmschichten oder Schwefelanreicherung, durch die Kohleapplikation verhindert werden können. Interviews mit Betreibern hatten dort gezeigt, dass „Pflanzenkohle insbesondere bei solchen Problemen als hilfreich wahrgenommen wird“.

Außerdem entsprach die Dosierung der Pflanzenkohle in den Batch-Versuchen der DBU nur 0,27 % der FM (Zimmermann u. a. 2021). Andere Untersuchungen, wie von Meyer-Kohlstock u. a. (2016) oder Dudek u. a. (2019) beschrieben, die mit Bioabfällen und einer Kohleapplikation von 5 % bzgl. der TM gearbeitet hatten, wiesen hingegen einen Mehrgasertrag von bis zu 5 % nach. Es konnte sogar beim Zusatz von kommerzieller Holzkohle zu Rinderdung eine Ertragsverbesserung von 34,7 % in semikontinuierlichen Fermentern erzielt werden (Dudek u. a. 2019).

Sollten sich Betreiber für den Einsatz von Pflanzenkohle entscheiden, müssten sie, um das passende Produkt für ihre Biogasanlage auswählen zu können, einige Aspekte beachten, so Beckmann (Neumann 2019). Sie befürwortet im Gegensatz zum ATB die Verwendung von Pyrolysekohle:

„Hierbei werden die durch die Verkohlung entstehenden Gase und Dämpfe komplett herausgefiltert, sodass die Pflanzenkohle dann zu 100 % schadstofffrei ist. Kohlen, die mit über 700 °C hergestellt worden sind, wirken im Austauschprozess im Fermenter besser.“

(Beckmann in Neumann 2019)

Ferner weist Beckmann auf die Notwendigkeit eines zertifizierten Kaufes hin. Um hochwertige Kohle ohne Schad- und Giftstoffe zu erwerben, sei es sinnvoll, auf das EBC-Premium-Zertifikat (European Biochar Certificate) zu achten. Das wäre auch im Hinblick auf den späteren Gärrest wichtig, da es sonst zu einer Schadstoffbelastung des Prozesses und des auf den Acker ausgebrachten Substrates käme.

Um die Kohle dann optimal einzusetzen, eigne sich laut Beckmann vor allem die Kaskadennutzung: Dabei erfolgt die Fütterung der Nutztiere mit Futterkohle, die dann zusammen mit weiteren Nährstoffen im Wirtschaftsdünger ausgeschieden wird. Als Substrat in der Biogasanlage eingesetzt, kann der daraus entstandene Gärrest als „Bodenverbesserer“ und Humusbildner auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht werden.

Nach Zimmermann u. a. (2021), ist die Kaskadennutzung ebenfalls der wahrscheinlichste Pfad, auf dem Pflanzenkohle künftig in Biogasanlagen gelangen wird.

Ob sich aus der Kohleapplikation Nachteile für den Biogasprozess ergeben, ist nicht bewiesen. Im Abschlussbericht der DBU heißt es, dass „Pflanzenkohle keine negativen Auswirkungen auf Biogasanlagen hat [und die Kaskadennutzung] für Biogasanlagenbetreiber unbedenklich ist und durch geeignete Maßnahmen unterstützt werden sollte“ (Zimmermann u. a. 2021). Auch Beckmann waren negative Folgen unbekannt, außer beim Einsatz minderwertiger Kohle, da diese oft mit Schadstoffbelastung einhergeht.

Die Autoren des Abschlussberichts wiesen des Weiteren darauf hin, dass Pflanzenkohle neben der Biogasproduktion auch in der Tierfütterung positive Effekte zeige. Sie könne „die Tiergesundheit fördern, Tierarztkosten reduzieren und beim Einsatz bei Milchvieh die Zellzahlen in der Milch reduzieren“ (Zimmermann u. a. 2021).

Solch eine Anwendungsmöglichkeit beschreibt auch der Kohlehersteller „Moola“ (Fetzer Rohstoffe + Recycling GmbH 2023). Dieser unterscheidet seine Produkte daher in drei Kohlearten: Pflanzen-, Einstreu- und Futterkohle.

Die nach Moola „klassische“ Pflanzenkohle wird als Beimischung in Biogasanlagen verwendet. Der Hersteller garantiert dafür eine Reduktion des Biomasseeinsatzes mit einer Substrateinsparung von bis zu 10 %, eine nachhaltige Steigerung des Gasertrages um 3 %, sowie eine Senkung der Anlagenbetriebskosten. Ferner bewirbt er die Kohle zur Verbesserung der Fließ- und Rührfähigkeit sowie zur schnellen Vermehrung methanbildender Mikroorganismen aufgrund der Oberflächeneigenschaften. Des Weiteren preist Moola die nährstoffreichen Gärreste gleichfalls als „Bodenverbesserer“ für Ackerflächen an.

Die zweite Kohleart, die Einstreukohle, gelangt hingegen auf indirektem Weg in die Biogasanlage. Der Anbieter verweist dabei auf die Fähigkeit seines für die Stallhaltung konzipierten Produktes, die bis zu fünffache Menge ihres Eigengewichtes an Wasser, organischen und mineralischen Stickstoffverbindungen aufnehmen zu können. Somit bindet sie Schadstoffe, Giftstoffe und Gerüche. Das fördert die Tiergesundheit, da mikrobiellen Krankheitserregern die Nährstoffgrundlage entzogen wird. Gleichzeitig reduziert die Kohle giftige Ammoniakemissionen. Wird das Einstreusubstrat anschließend als Wirtschaftsdünger in die Biogasanlage eingetragen, gelangt auch die Kohle in den Gasbildungsprozess.

Ähnlich verhält es sich mit der Futterkohle: Ursprünglich zur Verbesserung der Tiergesundheit und Stärkung des Immunsystems verfüttert, wird sie mit den Ausscheidungen gleichfalls zu Wirtschaftsdünger, so auch von Beckmann und Zimmermann u. a. (2021) beschrieben.

Ein weiteres, oft verwendetes Argument der Hersteller ist, dass die Kohle einen Beitrag im „Kampf gegen den Klimawandel“ leistet. Sie speichere langfristig schädliches CO₂ und andere Treibhausgase (Fetzer Rohstoffe + Recycling GmbH 2023) und erzeuge bei ihrer Herstellung klimaneutrale Energie (Carbuna AG 2023a). Die Aussage, Pflanzenkohle mache als Kohlenstoffsenke ausgestoßene Emissionen „rückgängig“, gehe aber nur mit entsprechender Zertifizierung und konsequenter Nachverfolgung des Kohleproduktes einher, so die Carbuna AG.

Letztendlich sollte daneben beachtet werden, dass die Gasproduktion von vielen Faktoren wie bspw. Anlagentyp, Anfangsproblem und Fütterung abhängig ist, wodurch es zwei bis drei Monate dauern kann, bevor sich erste Erfolge durch Kohleapplikation einstellen (Beckmann in Neumann 2019).

3. Chancen und Herausforderungen des Wirtschaftsdüngers

3.1 Definition von Wirtschaftsdünger

Als Wirtschaftsdünger werden nach dem deutschen Düngegesetz, § 2 Abs. 2, Düngemittel definiert, die

„1. als tierische Ausscheidungen a) bei der Haltung von Tieren zur Erzeugung von Lebensmitteln oder b) bei der sonstigen Haltung von Tieren in der Landwirtschaft oder 2. als pflanzliche Stoffe im Rahmen der pflanzlichen Erzeugung oder in der Landwirtschaft, auch in Mischungen untereinander oder nach aerober oder anaerober Behandlung, anfallen oder erzeugt werden.“

(Umweltbundesamt 2023)

Eine weitere, gängige Bezeichnung ist die des Hofdüngers (Kaltschmitt u. a. 2016). Seine Grundmasse besteht aus den Biomassefraktionen Kot und Harn, wobei ersterer mehr oder weniger fest, letzterer flüssig ist.

Wie alle anderen in der Biogasproduktion eingesetzten Substrate, wird der Wirtschaftsdünger einem bestimmten Biomassepotenzial zugeordnet (Kaltschmitt u. a. 2016). Dieses gibt Aufschluss auf die potentielle energetische Nutzbarkeit verschiedener Biomassen. Die Potenziale werden unterschieden in:

- a) Holzartige Biomasse
- b) Rückstände und Nebenprodukte aus der landwirtschaftlichen Primärproduktion
- c) Sonstige Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle
- d) Energiepflanzen aus landwirtschaftlicher Produktion

Wirtschaftsdünger gehört somit nach Kaltschmitt u. a. (2016) dem Potenzial „Sonstige Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle“ an.

Abhängig von der Reinheit der Substrate werden laut den Autoren vier verschiedene Arten von Hofdünger unterschieden: Festmist, Jauche, Gülle und Vollgülle.

Festmist entsteht, wenn die Grundstoffe Kot und Harn aufgrund der Aufstellungsart der Nutztiere mit dem Einstreumaterial zusammenfallen. Tritt aus dem Festmist Sickersaft aus, wird dieser als Jauche bezeichnet.

Gülle ist ein Gemisch, das bei einem Zusammenfall von Kot und Harn ohne sonstige Zusatzstoffe (außer Wasser) entsteht. Die Beigabe von Wasser kann dabei unbeabsichtigt z. B. aufgrund von Spaltbodenhaltung erfolgen.

Handelt es sich um eine gezielte Wasserzugabe, bspw. zu Transport- und Reinigungszwecken, wird das Gemisch als Vollgülle bezeichnet. Es kann neben Wasser noch weitere Komponenten enthalten, so wie Futterreste und Laub. Vollgülle ist daher eine „heterogene Mischung von Flüssigkeiten unterschiedlicher Herkunft, in der verschiedenartigste Feststoffe enthalten sein können“ (Kaltschmitt u. a. 2016).

3.2 Einsatz im Biogasprozess

In vielen landwirtschaftlichen Betrieben werden Exkreme aus der Nutztierhaltung bereits unbehandelt als Wirtschaftsdünger genutzt. So wird durch die Ausbringung auf Nutzflächen eine Schließung der innerbetrieblichen Nährstoffkreisläufe angestrebt (Kaltschmitt u. a. 2016). Dies ist jedoch nur bei einer flächenangepassten Tierhaltung möglich, da es ansonsten zu einem Nährstoffüberschuss auf den Ausbringflächen kommen kann und die Gefahr einer Stickstoffauswaschung in Grund- und Oberflächenwasser besteht.

Doch auch in der Biogasgewinnung hat sich die Anwendung von Wirtschaftsdünger bewährt, da die Substrate aus technischer Sicht relativ einfach zu vergären sind.

3.2.1 Vorteile für Anlagenbetreiber

In Deutschland werden Gülle, Jauche und Mist bereits teilweise zur Biogaserzeugung genutzt. Ihr Anteil betrug einer Betreiberumfrage des DBFZ zufolge 49 % am massebezogenen Substrateinsatz im Jahr 2021 (FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2022).

Nach aktuellem Stand der FNR liegt die Nutzung von Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen jedoch erst bei ca. 30 % bzgl. des jährlichen Anfalls (FNR 2023c). Dies soll sich zukünftig ändern, da die Bundesregierung die Verwendung tierischer Exkreme zu Energieerzeugung fördern und attraktiver gestalten möchte.

Neben der durch das EEG festgelegten Vergütung (FNR 2023b) beruht die finanzielle Unterstützung auf dem positiven Beitrag, den die Vergärung zum Klimaschutz leistet (FNR 2023c). Werden die Abfallprodukte wie allgemein üblich zu Düngezwecken auf landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt, setzen sie während ihrer Lagerung und Ausbringung klimarelevante Emissionen wie bspw. Methan frei. Wird der Wirtschaftsdünger nicht ausgebracht, sondern stattdessen vergärt, verringert sich seine Lagerdauer erheblich (Kaltschmitt u. a.

2016) und somit auch die Emissionen. Außerdem entweicht das im Biogasprozess freigesetzte Methan nicht in die Atmosphäre, sondern unterliegt einer weitergehenden Nutzung. Betreiber, die Wirtschaftsdünger als Substrat einsetzen, werden daher seit 2022 von der Bundesregierung mit der „Investitionsförderung - Emissionsmindernde Maßnahmen zur Vergärung von Wirtschaftsdüngern“ finanziell unterstützt (BMEL 2022b). Die Förderung hat zum Ziel, den Anteil an Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen im Sinne des Klimaschutzes deutlich zu erhöhen.

Die Vergärung erweist sich für Landwirte auch vor dem Hintergrund der 2020 novellierten Düngeverordnung als sinnvoll: Diese sieht längere Sperrfristen für die Düngeausbringung in den Herbst- und Wintermonaten vor, wodurch auch die Düngung mit Gülle stark eingeschränkt ist (FNR 2023a). Um einem Gülleüberschuss in diesem Zeitraum entgegenzuwirken, bietet sich ihre Nutzung in Biogasanlagen als mögliche Alternative an.

Ein weiterer Vorteil gegenüber der Verwendung zu Düngezwecken ist nach Kaltschmitt u. a. (2016) die abnehmende Geruchsbelästigung, die mit den Exkrementen einhergeht. Verantwortliche Geruchsstoffe werden durch den Einsatz in Biogasanlagen schlicht zu Gas abgebaut, wodurch der Gärrest deutlich weniger „stinkt“ als das frische Substrat.

3.2.2 Herausforderungen Stickstoffgehalt und Schaumbildung

Sowohl das ATB (2014) als auch Kaltschmitt u. a. (2016) verweisen auf mögliche Probleme im Biogasprozess, die mit Hühnerexkrementen auftreten. Da diese aufgrund der relativ hohen Stickstoffgehalte bei der anaeroben Behandlung zur Entstehung von hohen Ammonium-Konzentrationen führen, wird die Gasbildung nachhaltig gehemmt (Kaltschmitt u. a. 2016). Inwiefern die durch stark proteinhaltige Substrate geförderte Bildung von Schaum Biogasanlagenbetreiber vor Herausforderungen stellt, beschreiben Kliche und Lebuhn in dem Artikel „Schaum in Biogasanlagen“, welcher im „Biogas Forum Bayern“ Nr. III - 19/2023 veröffentlicht wurde.

So behindert der Schaum die Biogasentnahme und -verwertung und führt in manchen Fällen sogar zum Ausfall der Prozesstechnik. Davon ist nicht nur die Anlagensicherheit betroffen, sondern auch die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage. Im schlimmsten Fall sind die Schäden so groß, dass es zu einem Betriebsausfall kommen kann, der langwirige und teure Instandsetzungsmaßnahmen nach sich zieht. Die Vermeidung von Schaum ist daher oberstes Gebot für Anlagenbetreiber.

Die Schaumentstehung kann unterschiedliche Ursachen haben. Ihnen gemein ist, dass sie als Voraussetzung eine Gasbildung bzw. eine Gaseinführung in eine Flüssigkeit und das Vorhandensein von grenzflächenaktiven Substanzen benötigen (Kliche und Leuhn 2023). Es wird zwischen zwei Schaumtypen unterschieden, dem Kugelschaum und dem Polyederschaum. Kugelschaum bildet sich aus dem Zusammenschluss von Gasblasen in einer Flüssigkeit: Er besitzt einen vergleichsweise großen Wassergehalt. Schwindet dieser, entstehen polyedrische Gasblasen, in der Summe Polyederschaum genannt.

Die Gasblasengröße variiert zwischen wenigen Millimetern und mehreren Zentimetern. Das allgemeine Schaumerscheinungsbild ist abhängig von der jeweiligen Stoffgruppe, die ihn verursacht hat. In Biogasanlagen sind diese Stoffgruppen hauptsächlich Proteine oder Polysaccharide (Schleimstoffe).

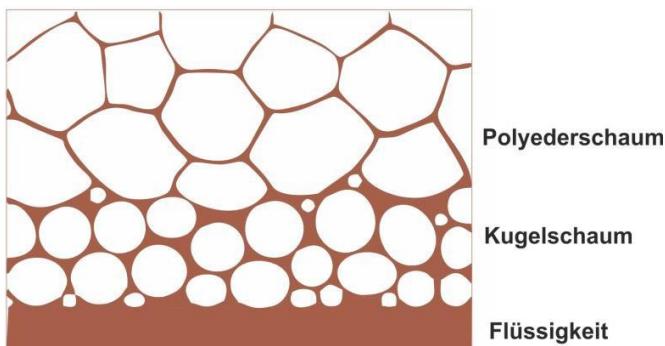


Abbildung 1: Darstellung Schaumaufbau

Quelle: <https://docplayer.org/docs-images/62/47469766/images/3-0.jpg>

(Letzter Zugriff: 01.06.2023)

Die Ursachen für die Entstehung von Schaum sind vielfältig und können sowohl biologischen als auch mechanischen Ursprungs sein. Gleichzeitig kann aber auch eine ungeeignete Prozessführung oder Substratauswahl zur Schaumbildung führen. Dort liegt das Problem häufig in einer mangelhaften Einsatzstoffzusammensetzung oder in falsch dimensionierten Beschickungssintervallen.

So kann ein zu hoher Proteinanteil im Substrat eine Schaumursache sein, die hinsichtlich der Untersuchung von Fermentern, die mit Wirtschaftsdünger arbeiten, von besonderer Relevanz ist. Zu den schaumfördernden Substraten gehören nach Kliche und Leuhn (2023) z. B. Getreide, Kleegras, Hühnertrockenkot und Rindergülle.

Ein zu niedriger TM-Gehalt kann ebenfalls zu verstärktem Schäumen führen. Er erweist sich auch im Hinblick auf den Untersuchungsschwerpunkt Viskosität als unzulässig für die Fließeigenschaften (vgl. Türk und Deckert 1990 in Kapitel 4.3).

Ungeeignete Rührtechnik und -intervalle sind zudem mögliche Fehlerquellen für schlechte Viskositäten und die Bildung von Schaum. Mit ihnen einher geht auch die unzureichende Durchmischung der Gärsubstrate im Fermenter.

Zuletzt können nach Kliche und Lebuhn (2023) auch Spurenelement- und Nährstoffmangel Ursachen der Schaumbildung sein. Ihr Eintritt ist allerdings beim Einsatz von Wirtschaftsdünger nicht zu erwarten, da dieser um Vergleich zu Energiepflanzen eine erhöhte Nährstoffkonzentration aufweist (Thiering und Bahrs 2011). Sollten dennoch Mängelscheinungen auftreten, kann der Einsatz von Biokohle die Störungen minimieren (vgl. Neumann 2019).

Die Entstehung von Schaum beruht folglich auf einem Zusammenspiel verschiedenster Fehlerquellen. Zur Vermeidung empfehlen Kliche und Lebuhn eine kontinuierliche Prozessführung mit möglichst konstanten äußeren Bedingungen (bspw. der Temperatur). Die Beschickungsintervalle sollten möglichst kurz (halbstündlich bis stündlich) und die Beschickungsmengen vertretbar sein. Die Zudosierung von Getreide, Zuckerrüben und anderen leicht abbaubaren Substraten sollte in geringeren Mengen erfolgen, dafür aber bei Bedarf häufiger. Außerdem darf der TM-Gehalt nicht zu niedrig sein.

4. Grundlagen der Viskositätsmessung

4.1 Definition von Viskosität

Die Viskosität ist nach DIN 1342-1 „die Eigenschaft eines fließfähigen (vorwiegend flüssigen oder gasförmigen) Stoffsystems, unter Einwirkung einer Spannung zu fließen und irreversibel deformiert zu werden“. Die Spannung ist derweil nur von der Verformungsgeschwindigkeit abhängig und kann gleichzeitig als Ursache dieser angesehen werden.

Die Viskosität ist somit ein Maß für die Kraft, die ein Körper oder ein Fluid seiner aufgezwängten Verformung entgegenbringt (Koll 2012), bzw. für die innere Reibung eines Fluids (Friedrich-Schiller-Universität Jena 1994). Sie kann quantitativ über den Viskositätskoeffizient, die dynamische Viskosität η oder die Viskositätsfunktion beschrieben werden und wurde früher auch als Zähigkeit bezeichnet (viskos = zähflüssig). Der bei der Viskositätsmessung zu untersuchende Verformungsprozess unterliegt dabei einer permanenten Umwandlung von Strömungsenergie in Wärme (DIN 1342-1:2003-11).

4.2 Rheologische Begriffe

Die rheologischen Grundgrößen (siehe Tabelle 1) können am Zweiplattenmodell veranschaulicht werden (Koll 2012):

Zwischen zwei parallelen Platten mit einem Abstand d befindet sich ein Fluidfilm, der aus unendlich vielen und dünnen laminaren Schichten besteht. Um die obere Platte um ΔL zu verschieben, wird eine tangential angreifende Kraft F benötigt. Diese ist abhängig von den rheologischen Eigenschaften des Fluids.

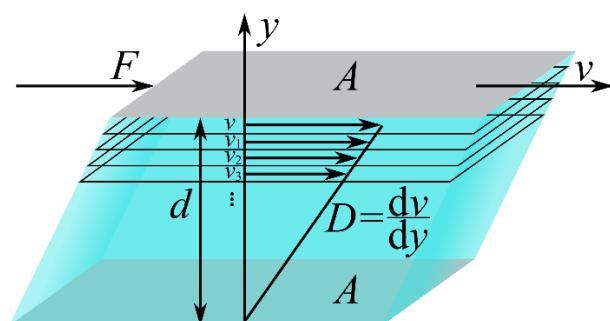


Abbildung 2: Zweiplattenmodell – Fluidscherung zwischen ruhender und bewegter Platte

Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9a/Definition_Viskositat.png

(Letzter Zugriff: 17.05.2023)

Drückt die Kraft wie in Abbildung 2 die obere Platte in eine Richtung x, so beginnt die sich zwischen den Platten befindliche Flüssigkeit zu fließen. Aus dem Verhältnis der Kraft F und der Plattenfläche A ergibt sich die Schubspannung τ , eine wichtige Ausgangsgröße zur Ermittlung der Viskosität.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Berechnung der Schubspannung

Mit τ - Schubspannung [Pa]
 F - Kraft [N]
 A - Fläche [m^2]

Die bewegte Platte gibt den entsprechenden Impuls mittels Adhäsion auf die angrenzende laminare Schicht weiter (Friedrich-Schiller-Universität Jena 1994). Durch diese erfolgt wiederum die Weitergabe eines schwächeren Impulses über an die darauffolgende laminare Schicht. Der Vorgang wiederholt sich, es resultiert ein Schergefälle im Fluidfilm, auch Geschwindigkeitsgefälle D oder Scherrate genannt.

Dieses definiert sich bei ebener, geradliniger Parallelströmung in Richtung x (entsprechend Geschwindigkeit v_x , siehe Abbildung 2) als der Grenzwert des Quotienten aus dem Geschwindigkeitsunterschied Δv zwischen zwei Ebenen 1 und 2 und ihrem Abstand Δy (DIN 1342-2:2003-11):

$$\Delta v_x = v_{x1} - v_{x2} \quad (2)$$

Berechnung der Geschwindigkeitsdifferenz

Mit Δv_x - Geschwindigkeitsdifferenz [$m s^{-1}$]
 v_{x1} - Geschwindigkeit von Ebene 1 [$m s^{-1}$]
 v_{x2} - Geschwindigkeit von Ebene 2 [$m s^{-1}$]

$$D = \frac{\Delta v_x}{\Delta y} \quad (3)$$

Berechnung des Geschwindigkeitsgefälles

Mit D - Geschwindigkeitsgefälle $[s^{-1}]$
 Δv_x - Geschwindigkeitsdifferenz $[m s^{-1}]$
 Δy - Abstand zw. den Ebenen $[m]$

In newtonschen Flüssigkeiten (siehe Tabelle 1) ergibt sich aus der Schubspannung τ und dem Geschwindigkeitsgefälle D folgender mathematischer Zusammenhang:

$$\eta = \frac{\tau}{D} \quad (4)$$

Berechnung der dynamischen Viskosität

Mit η - Dynamische Viskosität $[Pa s]$
 τ - Schubspannung $[Pa]$
 D - Geschwindigkeitsgefälle $[s^{-1}]$

Der Proportionalitätskoeffizient, die dynamische Viskosität η , ist eine für die betrachtete Flüssigkeit charakteristische Größe und hängt ausschließlich von der Temperatur und vom Druck ab. Sie lässt sich nach dem Gesetz der inneren Reibung jedoch nur im newtonschen Bereich beschreiben (DIN 1342-2:2003-11).

Bei nicht-newtonschen bzw. nichtlinearen Flüssigkeiten wird die scheinbare Viskosität η_s angegeben. Sie entspricht der Viskosität, die eine newtonsche Flüssigkeit gleichen Fließverhaltens aufweist (Friedrich-Schiller-Universität Jena 1994).

Tabelle 1: Rheologische Begriffe nach DIN

Begriff	FZ	Definition
dynamische Viskosität	η	1) Für Scherströmungen maßgebender Viskositätskoeffizient (stoffspezifischer Koeffizient im Fließgesetz für newtonsche Flüssigkeiten), der nur von der Temperatur und vom Druck abhängig ist 2) Für nicht-newtonsche Flüssigkeiten und im Fließbereich plastischer Stoffe ein Wert der Scherviskositätsfunktion für gegebene Schubspannung oder für gegebenes Geschwindigkeitsgefälle
Elastizität		Eigenschaft eines Stoffes, der zufolge einer Spannung eine reversible Verformung hervorruft
Fließgrenze	τ_f	Kleinste Schubspannung, oberhalb derer ein plastischer Stoff sich rheologisch wie eine Flüssigkeit verhält
Geschwindigkeitsgefälle	D	Schergeschwindigkeit in einer geradlinigen Schichtenströmung
newtonsche Flüssigkeit		Flüssigkeit, für die bei der einfachen Scherströmung die Schubspannung proportional dem Geschwindigkeitsgefälle ist
nicht-newtonsche Flüssigkeit		Flüssigkeit, für die bei der einfachen Scherströmung die Schubspannung nicht proportional dem Geschwindigkeitsgefälle ist: Unterscheidung in Flüssigkeiten mit <ol style="list-style-type: none"> nichtlinearer Viskosität linearer Viskoelastizität nichtlinearer Viskoelastizität
scheinbare Viskosität	η_s	Viskositätswert, der durch einen Punkt auf der scheinbaren Viskositätskurve gegeben ist

Fortsetzung Tabelle 1: Rheologische Begriffe nach DIN

Begriff	FZ	Definition
scheinbare Viskositätskurve		Viskositätskurve einer nicht-newtonischen Flüssigkeit oder eines plastischen Stoffes oberhalb der Fließgrenze, wobei statt der Schubspannung oder des Geschwindigkeitsgefälles Größen verwendet werden, die mit Hilfe von Gleichungen berechnet sind, die nur für newtonische Flüssigkeiten gelten
Schergeschwindigkeit	$\dot{\gamma}$	Scherkomponente des Tensors der Verformungsgeschwindigkeit, die bei geradliniger Scherströmung dem Geschwindigkeitsgefälle entspricht
Scherströmung		Strömung, die sich als nur durch Schubspannungen verursacht darstellen lässt
Scherviskositätsfunktion		Stoffspezifische Funktion für den Zusammenhang zwischen Schubspannung und Geschwindigkeitsgefälle in der Schichtenströmung einer Flüssigkeit oberhalb der Fließgrenze
Schichtenströmung		Laminare Strömung, bei der infinitesimal dünne Schichten tangential zueinander bewegt werden, sodass die Schichten selbst keine Deformationen erfahren
Schubspannung	τ	Auf die Fläche bezogene Kraft, deren Richtung parallel zur Angriffsfläche liegt
Verformungsgeschwindigkeit		Zeitbezogene Änderung der Verformung
Viskoelastizität		Erscheinung, dass Stoffe sowohl Elastizität als auch Viskosität besitzen können
Viskositätsfunktion		Einen zähflüssigen Stoff kennzeichnende Stoffeigenschaften (dynamische Viskosität, Dehnviskosität, Volumenviskosität) als Funktion der entsprechenden Spannungen oder Verformungsgeschwindigkeiten

Fortsetzung Tabelle 1: Rheologische Begriffe nach DIN

Begriff	FZ	Definition
Viskositätskoeffizient		Stoffspezifischer Koeffizient in rheologischen Stoffgesetzen, der viskose Eigenschaften beschreibt (Bsp.: dynamische Viskosität)
Viskositätskurve		Graphische Darstellung der Scherviskositätsfunktion über dem Geschwindigkeitsgefälle oder über der Schubspannung

4.3 Einfluss der Viskosität auf den Biogasprozess

Die Viskosität nimmt Einfluss auf wesentlich ablaufende strömungstechnische und stoffliche Transportprozesse und ist daher insbesondere für die Biogaserzeugung von großer Bedeutung (DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum u. a. 2015). Sie ist prägend für das Prozessergebnis und die damit einhergehende Methanausbeute.

Des Weiteren ist ihre Kenntnis aus verfahrenstechnischer Sicht wichtig für die Betreibung von Biogasanlagen, z. B. für die Bemessung hydromechanischer Förderanlagen (Türk und Deckert 1990). Steigt die Viskosität, so verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit bei einer bestimmten Drehzahl und der Fermenterinhalt wird schlechter durchmischt (Schneider und Gerber 2020). Eine geringere Viskosität hingegen erfordert einen geringeren Einsatz von zusätzlicher Rührtechnik und kann so den Energiebedarf der Biogasanlage senken.

In dem von Türk und Deckert (1990) verfassten Artikel „Rheologische Eigenschaften von Faulschlamm nach anaerober Fermentation von Gülle im Biogasreaktor“, wurde diesbezüglich das sich durch den biochemischen Prozess verändernde Fließverhalten von Frischgülle untersucht. Diese unterliegt dabei gleich mehreren Umwandlungen innerhalb des fortschreitenden Biogasprozesses.

Der während der Fermentation stattfindende Abbau organischer Substanz unter mesophilen Bedingungen (im Falle der Untersuchungen noch bei Temperaturen von 33 bis 35 °C und einer Verweilzeit von 15 bis 20 d) führt zu einer Verminderung des TM-Gehaltes um etwa 20 bis 30 % (Türk und Deckert 1990). Dabei werden zuerst die kleinsten organischen Teilchen abgebaut, anschließend große Moleküle wie Zellulose und rohproteinhaltige Substanzen sowie Feststoffteilchen zerlegt. Das sorgt für eine Veränderung der strukturellen Bindungen und Wechselwirkungen innerhalb der Suspension.

Als Folge tritt die Flotation leichter Faserstoffe ein, die zur Schwimmschichtbildung und Sedimentation führt. Letztere ist häufig Ursache für Messfehler bei der Viskositätsbestimmung, weshalb die Suspension während der Messung gerührt werden muss. Nach Türk und Deckert (1990) hat sich die Erzeugung einer Sekundärströmung in Sedimentationsrichtung bewährt (unter Verwendung eines Searle-Rotationsviskosimeters, siehe Kapitel 4.4).

Die Versuche zeigten eine Verbesserung der Güllefließeigenschaften durch die anaerobe Fermentation, was mit der Verminderung des TM-Gehaltes um 20 bis 30 % zu erklären wäre (Türk und Deckert 1990). Dieses Verhalten wurde am stärksten bei Rindergülle beobachtet, bei Schweine- und Hühnergülle waren die Werte für das Viskositätsverhältnis relativ konstant.

Insbesondere die Hühnergülle erwies sich bei den Experimenten als Herausforderung: Ihr kolloid- und gallertartiger Charakter wuchs mit Zunahme von TM, es kam zur Bildung hydrophiler Aggregationen. Des Weiteren wurden bei TM > 15 % thixotrope Erscheinungen beobachtet, d. h. die Gülle verringerte ihre Viskosität selbst bei andauernden äußeren Einwirkungen, kehrte jedoch bei Beendigung der Belastung in ihre Ausgangsviskosität zurück. Außerdem war ihr Fließverhalten gegenüber dem der Schweine- und Rindergülle deutlich vermindert.

Die Abnahme der Viskosität als Folge des sich verringernden TM-Anteils wird auch von Schneider und Gerber (2020) in „Rheological properties of digestate from agricultural biogas plants: An overview of measurement techniques and influencing factors“ bestätigt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass sich verschiedene Gärreste selbst bei gleicher TM deutlich in ihren Viskositätswerten voneinander unterscheiden. Dies wäre mit der unterschiedlichen Zusammensetzung des jeweiligen Gärsubstrates, den unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen und Schleimstoffanteilen zu erklären, die zwar nicht den TM-Anteil beeinflussen, dafür aber die Viskosität.

Zusätzlich dazu ist die Viskosität von Gärsubstraten ebenfalls stark temperaturabhängig und sinkt daher mit zunehmender Temperatur T (Schneider und Gerber 2020). Auch verändert sich die Konsistenz von Gärresten nachweislich mit ΔT .

Türk und Deckert (1990) wiesen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass der Einfluss der Temperatur auf das Fließverhalten von Faulschlamm wie bei Frischgülle behandelt werden kann. Näheres dazu in Kapitel 4.5.

4.4 Ermittlung der Viskosität

Bei Gärsubstraten ist die passende Wahl des Messverfahrens bei der Bestimmung der Viskosität abhängig vom TM-Anteil und der Größe sowie Gestalt der Substratpartikel (Brehmer und Kraume, TU Berlin in „Messmethodensammlung Biogas“ 2015). Am gängigsten sind Rotationsversuche, die sich durch ihre Schnelligkeit und Präzision auszeichnen.

Dabei kommen entweder Rheometer oder Viskosimeter zum Einsatz. Diese Begriffe sind allerdings nicht einheitlich festgelegt: Üblicherweise ist ein Rotationsviskosimeter ein Messgerät, mit dem das Fließverhalten als Viskositätsfunktion über drehzahl- bzw. scherraten gesteuerte Rotationsversuche gemessen wird, wohingegen ein Rotationsrheometer zusätzlich weitere rheologische Tests ermöglicht (Mezger 2016). Dazu gehören z. B. drehmoment- bzw. schubspannungsgesteuerte Versuche.

Industriell hergestellte Rheometer bestehen aus einer Antriebseinheit und einem Messsystem. Sie arbeiten häufig nach der Searle-Methode (Abbildung 3): Dabei rotiert der innen liegende Messkörper (Rotor), während der äußere Messbecher (Stator) ruht. Umgekehrt verhält es sich mit der Couette-Methode (Abbildung 4): Dort ist der Messbecher der Rotor und der innere Messkörper der Stator (Mezger 2016).

Die zu untersuchende Probe befindet sich währenddessen im Spalt zwischen Rotor und Stator. Es erfolgt die Messung des für die Rotation benötigten Drehmoments M in Abhängigkeit von der Drehzahl n bzw. Winkelgeschwindigkeit ω (Brehmer und Kraume 2015). Aus diesen Werten lassen sich anschließend die Schubspannung τ und Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ bzw. das Geschwindigkeitsgefälle D berechnen.

Abhängig von dem vorgegebenen Parameter arbeiten Rotationsrheometer nach Radusch (2022) entweder nach dem CS- (CS = Controlled Stress) oder dem CR-Prinzip (CR = Controlled Rate). Beim CS-Prinzip wird unter Vorgabe eines definierten Drehmomentes oder einer Schubspannung das Geschwindigkeitsgefälle bestimmt, beim CR-Prinzip ist eine Schergeschwindigkeit vorgegeben und die resultierende Schubspannung wird ermittelt.

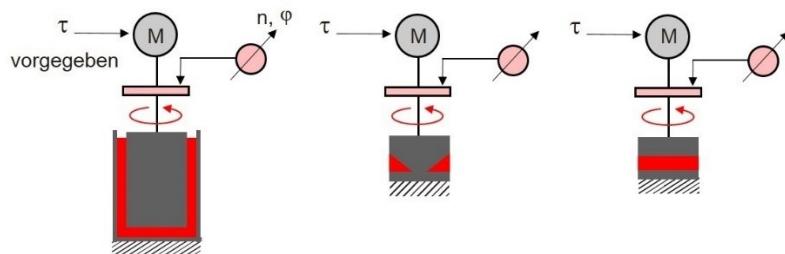
Die CS-Methode wird klassischerweise bei der Fließgrenzenbestimmung von Dispersionen, Pasten oder Gelen verwendet (Mezger 2016). Da in der Natur nahezu alle Fließvorgänge kraftgesteuert ablaufen, ist das Prinzip mit Umweltprozessen wie z. B. Erdrutschen (aufgrund der Gravitationskraft) vergleichbar. Die CR-Methode wiederum findet Anwendung bei Flüssigkeiten, die keine Fließgrenze haben, und bei Versuchen, in denen die Viskosität bei definierten Fließgeschwindigkeiten simuliert wird. Bei der nachfolgend in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Versuchsdurchführung wurde nach diesem Prinzip gearbeitet.

(CS) Rheometer: Geregeltes DrehmomentSchubspannung τ vorgegeben: Geschwindigkeitsgefälle/ Deformation messen

SEARLE Typ Messsystem:

der Rotor rotiert (bei Spitzen-Rheometern ist der CS- in den CR-Modus

umschaltbar

Geschwindigkeitsgefälle gemessen an der Rotorachse Messbecher bzw.
unterer Platte stationär**(CR) Rheometer/Viskosimeter: Geregelte Schubspannung**

Geschwindigkeitsgefälle vorgegeben: Schubspannung messen

SEARLE Typ Messsystem:

der Rotor rotiert

Schubspannung gemessen an Rotorachse, Messbecher bzw.

unterer Platte stationär

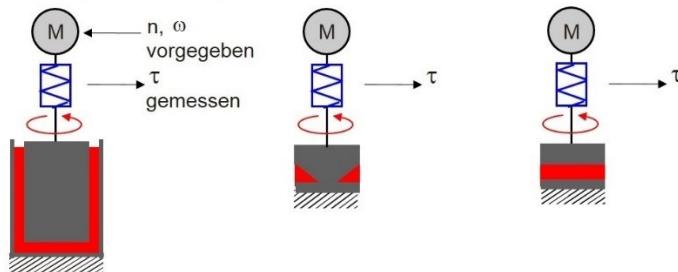


Abbildung 3: Funktionsweise von CS- und CR-Rotationsrheometern nach der Searle-Methode

(Radusch 2022 aus Schramm, Gebhard. 1995. „Einführung in Rheologie und Rheometrie“. Thermo Electron GmbH. Karlsruhe)

(CR) Rheometer/Viskosimeter: Geregelte Schubspannung

Geschwindigkeitsgefälle vorgegeben: Schubspannung messen

COUETTE Typ Messsystem:

Messbecher/untere Platte rotiert

Schubspannung an Innenzylinder/

Kegel/oberer Platte gemessen

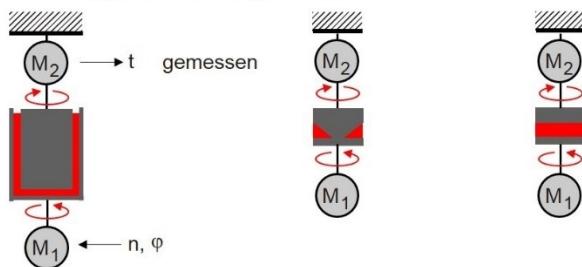


Abbildung 4: Funktionsweise eines CR-Rotationsrheometers nach der Couette-Methode

(Radusch 2022 aus Schramm, Gebhard. 1995. „Einführung in Rheologie und Rheometrie“. Thermo Electron GmbH. Karlsruhe)

Rotationsrheometer werden des Weiteren nach ihren Messsystemen unterschieden. Es gibt konzentrische Messsysteme, Kegel-Platte-, Platte-Platte- und Relativ-Messsysteme (Brehmer und Kraume 2015). Die oft verwendeten konzentrischen Systeme werden abermals unterteilt in Zylinder- und Doppelspalt-Messsysteme. Leicht handhabbar und schnell und genau im Bestimmen von Schubspannung, Scherrate und Temperatureinfluss, haben sie sich in Industrie und Forschung etabliert.

Jedoch eignet sich der Einsatz von derartigen Spaltsystemen nicht für faserige Suspensionen, wie sie häufig in Gärsubstraten zu finden sind (Jobst und Lincke, IKTS, in „Messmethodensammlung Biogas“ 2015). Die darin auftretenden Partikel können eine Länge von 50 mm und länger erreichen. Lagern sie sich innerhalb des Spaltes an, kommt es zu einer das Messergebnis verfälschenden Festkörperreibung. Des Weiteren können Messfehler durch Phasentrennungen entstehen, die aufgrund von Sedimentation im zylindrischen Messkörper auftreten. Diesen Problemen vorsorglich durch Partikelabtrennung vorzubeugen, ist nach Jobst und Lincke (2015) nicht sinnvoll, da auch die großen Partikel das Fließverhalten der Suspension maßgeblich beeinflussen.

Bei faserigen Suspensionen mit einer maximalen Faserlänge von 20 mm, wie sie auch in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen auftraten, wird ein Standard-Rotationsviskosimeter mit einem 6-blättrigen Flügelrührer empfohlen (Jobst und Lincke 2015). Dieser wurde jedoch nicht in den nachfolgend in Kapitel 5 beschriebenen Experimenten verwendet: Dort kamen stattdessen Scheibenspindeln zum Einsatz.

Die Viskosität wird durch die Messung des Fließwiderstandes gegen eine vorgegebene Drehzahl indirekt bestimmt (Jobst und Lincke 2015). Es erfolgt gleichzeitig die berührungslose Messung des dafür erforderlichen Drehmomentes über eine steife Torsionsfeder.

Über die interne Steuereinheit des Messgerätes werden wie nach Brehmer und Kraume (2015) Drehmoment, Drehzahl sowie Systemfaktoren (Geometrie) des verwendeten Messsystems gespeichert und daraus Werte für die Schubspannung, Schergeschwindigkeit und dynamische Viskosität bestimmt.

4.4.1 Bestimmung nach DIN

Die Messung der Viskosität mit Rotationsviskosimetern wird nach DIN wie folgt vorgegeben:

„Die zu untersuchende Flüssigkeit befindet sich im Messpalt zwischen den rotationssymmetrischen und koaxial angeordneten Randflächen, von denen die eine mit der Winkelgeschwindigkeit $[\omega]$ rotiert (Rotor), die andere ruht (Stator).

Ermittelt werden die Drehzahl und das Drehmoment, das nötig ist, um den Reibungswiderstand der Flüssigkeit im Ringspalt zu überwinden. Aus den geometrischen Abmessungen des Systems sowie den ermittelten Drehmoment- und Drehzahlwerten lassen sich die in der Flüssigkeit herrschende Schubspannung und die Schergeschwindigkeit berechnen.

Für Rotationsviskosimeter mit vorgegebener Winkelgeschwindigkeit stellt sich das zugehörige Drehmoment ein; es ist proportional zur Viskosität. Der nutzbare Bereich der Winkelgeschwindigkeit $[\omega]$ kann durch den messbaren Drehmomentbereich eingeschränkt sein.

Für Rotationsviskosimeter mit vorgegebenem Drehmoment stellt sich die Winkelgeschwindigkeit $[\omega]$ ein; sie ist umgekehrt proportional zur Viskosität. Der nutzbare Bereich des Drehmomentes kann durch den messbaren oder hydrodynamisch zulässigen Bereich der Winkelgeschwindigkeit eingeschränkt sein.“

(DIN 53019-1:2008-09)

Zu den für die Viskositätsbestimmung erforderlichen Geräten gehören nach DIN zum einen das Rotationsviskosimeter, zum anderen eine Temperiereinrichtung sowie die Temperaturmessung (DIN 53019-1:2008-09).

Das Rotationsviskosimeter besteht aus einem mechanischen Grundgerät, dem Messsystem und einer Antriebsvorrichtung sowie Einrichtungen zur Messung des Drehmoments und der Winkelgeschwindigkeit. Das Grundgerät oder Stativ dient hierbei der Justierung der beiden Messsystemkomponenten. Das Messsystem selbst, ausgebildet als koaxiale Zylinder, Kegel-Platte oder Platte-Platte, erzeugt ein definiertes Fließfeld.

Um eine Probe während der Messung hinreichend zu temperieren, werden verschiedene Einrichtungen verwendet. Dabei wird entweder eine der beiden Messsystemkomponenten thermostatisiert oder das gesamte Messsystem in eine Temperierkammer eingebracht. Letztere Methode benötigt allerdings einen gewissen Platzbedarf und war bspw. bei den dieser

Arbeit zugrunde liegenden Versuchen nur aufgrund der großen Freiflächen des Bioenergetikums der Universität Rostock umsetzbar. Die Thermostatisierung hingegen kann vielseitig über Flüssigkeitsthermostate, elektrische Heiz- oder Kühlelemente sowie durch Gas erfolgen.

Für die Bestimmung der Probentemperatur wird ein Temperaturfühler direkt in diese eingetaucht. Die Art des Thermometers ist dabei abhängig von der Größe des Messspaltes zu wählen. Da das Eintauchen das Fließfeld stört, muss die Messung vor und/oder nach der Scherung der Probe erfolgen.

Des Weiteren kann die Probentemperatur auch indirekt mit Temperaturfühlern bestimmt werden. Diese sind dann in die Messsysteme oder den Temperiermantel eingebaut. Der Vorteil der indirekten Messung besteht darin, dass sie kontinuierlich während des gesamten Versuches erfolgen kann.

Die DIN weist in dem Zusammenhang darauf hin, dass „insbesondere bei Messtemperaturen, die erheblich von der Umgebungstemperatur abweichen“, mit Differenzen zwischen Proben- und gemessener Temperatur gerechnet werden muss (siehe auch DIN 53019-2).

4.4.2 Bestimmung über die scheinbare Viskosität

Da bei Gärsubstraten die Viskosität selbst vom Geschwindigkeitsprofil abhängig ist und daher nicht konstant bleibt, wurde der Begriff der scheinbaren Viskosität η_s eingeführt (Jobst und Lincke, IKTS, in „Messmethodensammlung Biogas“ 2015). Diese ist ein Maß für nicht-newtonsche Flüssigkeiten, welche ein zeit- oder schergeschwindigkeitsabhängiges Verhalten aufweisen (Schneider und Gerber 2020). Ihre Berechnung erfolgt auf Basis des Scherwinkels in der Flüssigkeit und nicht, wie bei newtonschen Flüssigkeiten, über den Geschwindigkeitsgradienten.

Die Bestimmung der Viskosität von Gärsubstraten erweist sich in den meisten Fällen als schwierig, zumal herkömmliche, standardisierte Messsysteme häufig nicht dafür verwendbar sind (Schneider und Gerber 2020). Es fehlt an einheitlichen Vorgaben zur Probenvorbehandlung, dem Versuchsaufbau sowie dem Messverfahren. Aus diesem Grund lassen sich experimentelle Ergebnisse aus verschiedenen Studien bisher nur ansatzweise vergleichen. Jobst und Lincke (2015) verwendeten in ihrem Versuch aus Kapitel 4.4 ein Searle-Rotationsviskosimeter zur Bestimmung von η über η_s mit einem Flügeldrehkörper als Rotor. Vergleichsmessungen mit einer standardisierten Zylindermesseinrichtung deuteten allerdings auf einen systematischen Fehler bei ihrer gewählten Messanordnung hin. Es wurde daher

ein Systemfaktor F ermittelt, der die geometrischen Verhältnisse der Messanordnung berücksichtigt. Dieser wurde neben den vom Hersteller festgelegten Systemfaktoren in die Auswertung miteinbezogen.

$$\dot{\gamma} = F \cdot \dot{\gamma}^* \quad (5)$$

Berechnung der Schergeschwindigkeit unter Einbezug des Systemfaktors

Mit	$\dot{\gamma}$	-	Wahre Schergeschwindigkeit	$[s^{-1}]$
F	-		Systemfaktor	$[-]$
$\dot{\gamma}^*$	-		Schergeschwindigkeit	$[s^{-1}]$

$$\eta_s = f(\dot{\gamma}^*) \quad (6)$$

Abhängigkeit der scheinbaren Viskosität von der Schergeschwindigkeit

Für den Versuch wird von Jobst und Lincke (2015) eine Probenmenge von 10 Litern empfohlen, von der pro Einzelmessung jeweils 1,6 L verwendet werden. Die Probe sollte vor der Entnahme gut homogenisiert werden, um Sink- und Schwimmschichten aufzulösen. Allerdings wird nicht näher beschrieben, wie dies durchzuführen ist.

Nach der Homogenisierung wird die Probe abgedeckt und in einem Wasserbad auf eine zu definierende Temperatur gebracht. Anschließend erfolgt die Teilprobennahme von 1,6 L, die in einen Messbecher abgefüllt wird.

Die Probe sollte bei der Messung eine konstante Temperatur aufweisen und sich um nicht mehr als 2 K ändern. Um dies zu gewährleisten, muss eine Temperierung während des Messvorganges stattfinden. Jobst und Lincke empfehlen wie nach DIN 53019-1 eine Temperaturmessung jeweils vor und nach der eigentlichen Viskositätsbestimmung.

Nachdem Messbecher und Rotor positioniert worden sind, werden der zu bewertende Scherbereich und die Anzahl der Messpunkte eingestellt. Empfohlen werden mindestens ein Messpunkt je s^{-1} sowie die Durchführung von drei oder mehr Messungen pro Probe.

Bei Substraten mit sehr langen Fasern (größer 20 mm) tritt häufig das Phänomen auf, dass sie sich um den Rührer und die Rührerwelle wickeln. Dies führt zu einer Veränderung der Rührergeometrie und verfälscht somit das Messergebnis. Solche Suspensionen „können nicht mit bekannten Standardmesssystemen untersucht werden“, da „die Geometrie der

Messeinrichtung [...] den Größenverhältnissen der enthaltenen Partikel angepasst werden [muss]“, so Jobst und Lincke (2015).

In den nachfolgend in Kapitel 5 dargelegten Versuchen wurde dieses Problem mit Hilfe einer vorherigen Probenzerkleinerung umgangen. Diese geht nach Schneider und Gerber (2020) allerdings stets mit einer Veränderung des Fließverhaltens einher, weshalb sich die Viskositäten von vorbehandelten Proben nur schwer mit denen in einer Biogasanlage vergleichen lassen.

4.5 Zusammenhang zwischen Temperatur und Viskosität

Da die dynamische Viskosität gemäß DIN 1342-1 ausschließlich vom Druck und von der Temperatur abhängig ist, ist deren Ermittlung für die Versuchsdurchführung essenziell. Insbesondere, da die Abhängigkeit nicht durch allgemeine Gleichungen beschrieben werden kann (Friedrich-Schiller-Universität Jena 1994). So liegen nur für bestimmte Stoffe/Stoffklassen, wie z. B. Mineralöle, empirische Beziehungen vor.

Die Ursache der Viskosität aller fluiden Systeme liegt in den Wechselwirkungen auf molekularer Ebene. Die Art der Wechselwirkungen ist dabei von der chemischen Struktur des Fluids abhängig. Steigt die Temperatur, steigt auch die kinetische Energie der Teilchen. Als Folge dessen nimmt der Einfluss der Wechselwirkungen auf die Viskosität ab, sie sinkt daher mit steigender Temperatur. Diese stellt demnach eine Art Aktivierungsenergie bereit, damit die intermolekularen Wechselwirkungen überwunden werden können.

Es empfiehlt sich daher, die Bestimmung der Viskosität von Biomasse bei Fermentertemperatur durchzuführen, um ihr Verhalten im Biogasprozess zu untersuchen (Koll 2012).

5. Rheologische Versuche

5.1 Material

Für die Durchführung der rheologischen Versuche wurden die zu untersuchenden Proben in Weithalsdosen mit einem Volumen von 500 ml abgefüllt und sowohl bei Zimmertemperatur als auch in einer Wärme-, Kälte- oder Gefrierkammer gelagert. Es erfolgte eine Homogenisierung mit einem handelsüblichen Mixer (Maximalleistung von 1.200 W) sowie die Umfüllung der jeweiligen Probe in ein 250 ml fassendes Becherglas vor der eigentlichen Viskositätsbestimmung. Für diese wurden das Rotationsviskosimeter IKA ROTAVISC me-vi mit einem Temperaturmessfühler sowie das Viskosimeterstativ IKA ROTASTAND verwendet. Die eingesetzten Messspindeln entstammten dem „Standardspindelset IKA SP set-2“ und dem „Offenen DIN-Spindelset IKA O DIN S-1“. Sie wurden zwischen den einzelnen Messungen mit destilliertem Wasser gereinigt, um Ungenauigkeiten durch Substrat- und Kalkablagerungen vorzubeugen. Zu Umfüllzwecken nach den Mess- und Mixvorgängen kamen Spatellöffel sowie ein Silikonspatel zum Einsatz.

5.2 Aufbau und Durchführung des Laborversuchs

Um den Einfluss der Pyrolysekohle auf das Viskositäts- und Schaumverhalten von Gärsubstraten zu untersuchen, bedurfte es mehrerer Versuchsreihen mit unterschiedlichen Substraten, unterschiedlich großen Kohlepartikeln sowie Vergleichsreihen. Die Datengewinnung erfolgte im Technikum des Lehrstuhls für Abfall- und Stoffstromwirtschaft der Universität Rostock.

Die zu untersuchenden Substrate stammten einerseits aus einer mit Wirtschaftsdünger betriebenen Biogasanlage, andererseits aus 15 kontinuierlichen Gärfermentern des Technikums mit einem Nennvolumen von 20 Litern. Es handelte sich hierbei um Rundgefäß, bestehend aus einem Ankerrührwerk, einer Steuerungseinheit sowie einer wandseitigen Warmluftheizung. Die Befüllung und Probenentnahme erfolgte über ein Tauchrohr. Mittels eines Kugelventils an der Unterseite konnten die Fermenter entleert werden.

Die Probe aus der Biogasanlage wurde drei Monate vor der Versuchsdurchführung entnommen und in kleinere Proben aufgeteilt. Diese wurden teilweise mit Kohle versetzt und homogenisiert, anschließend eingefroren.

Nach der Entnahme aus der Gefrierkammer erfolgte das schonende Probenuftauen in der Kältekammer für drei Tage. Dabei sollte die biologische Aktivität durch die geringe Umge-

bungstemperatur von 6 °C unterdrückt werden. Inwiefern die Lagerdauer die viskosen Eigenschaften beeinträchtigt hat, wurde in einer separaten Messreihe untersucht, ebenso die Beeinflussung des Fließverhaltens durch Homogenisierung.

5.2.1 Probenvorbereitung

Um einheitliche Versuchsbedingungen zu schaffen, wurden sämtliche Proben vor den Viskositätsmessungen mit einem handelsüblichen Mixer (Maximalleistung 1.200 W) 120 Sekunden lang homogenisiert (Abbildung 5). Das lag darin begründet, dass die Proben je nach Herkunft und Alter (z. B. frisch aus den Fermentern entnommen oder bereits eingefroren und wieder aufgetaut) Fasern mit bis zu 2 cm Länge sowie Bodensatz, bestehend aus Kohle und/oder organischen Partikeln, enthielten. Durch die Homogenisierung wurden die Fasern zerkleinert, bis sie nur noch eine Länge von maximal 5 mm aufwiesen. Des Weiteren sorgte die Vorbehandlung für eine ausgiebige Durchmischung der Proben und machte die aufgrund der Lagerung eingetretene Phasentrennung wieder rückgängig.

Der Vorgang wurde für jede Teilprobe einzeln durchgeführt und der Mixer zwischen den Durchgängen mit Wasser gereinigt. Dadurch wurden auch Fasern, die sich eventuell um das Rührwerk gewickelt hatten, vor der darauffolgenden Probenbehandlung entfernt. Mit Ausnahme der zwei Proben, die keinen Wirtschaftsdünger enthielten (Versuchsreihe 4 und 5, siehe Tabelle 3), wiesen alle anderen ein stark schäumendes Verhalten beim Mixen auf. Dieses manifestierte sich nach der Entleerung des Mixers in der Bildung eines ca. 1 cm hohen Bläschenfilms (Abbildung 6).



Abbildung 5: Homogenisierung einer Fermenterprobe mit einem handelsüblichen Mixer

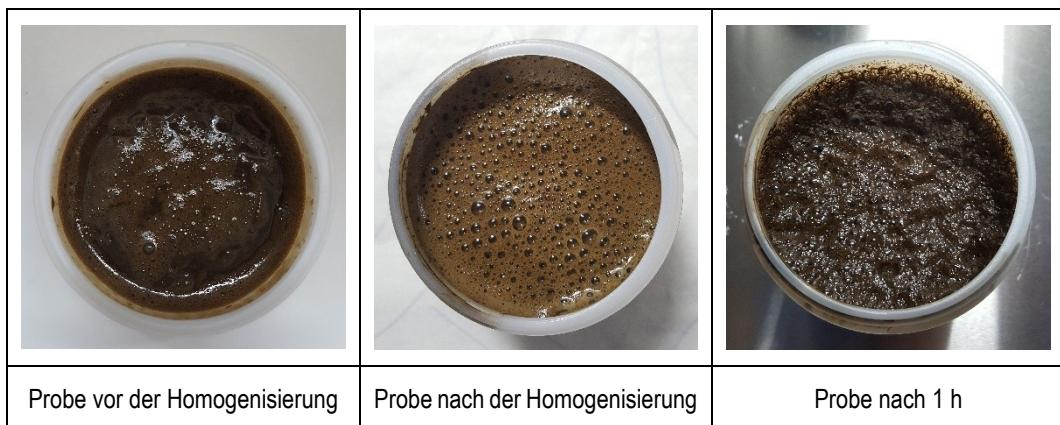


Abbildung 6: Schaumverhalten einer Biogasanlagenprobe während der Homogenisierung

5.2.2 Bestimmung der Viskosität

Die Proben wurden vor jeder Viskositätsmessung ca. 15 Sekunden lang aufgerührt, um bspw. sedimentierte Partikel zu mobilisieren oder die durch Homogenisierung entstandene, verkrustete Schaumdecke aufzulösen (Abbildung 7).



Abbildung 7: Probe vor und nach dem Aufrühren

Die Berechnung der Viskosität erfolgte nach der Searle-Methode auf Grundlage von Temperatur, Spindelgeometrie und vorgegebener Drehzahl (CR-Methode, siehe Kapitel 4.4) als Widerstand gegenüber der strömenden Flüssigkeit.

Das kalibrierte Gerät führte vor dem jeweils ersten Versuch immer eine Nivellierung und Eigenprüfung durch.

Der Hersteller empfahl folgende Testbedingungen:

- *Probenbehälter: Niedriger 600 ml Standardbecher*
- *Probenvolumen: 500 ml*
- *Konstante Temperatur*

- *Spindeleinbau: Spindel erst neigen, dann in die zu messende Flüssigkeit eintauchen, anschließend anschrauben*
- *Keine an der Spindel anhaftenden Luftblasen*
- *Flüssigkeit im Becher reicht bis zur Einkerbung an der Spindelwelle*
- *Abstand von Oberfläche Unterseite der Spindel bis Unterseite Becher > 10 mm*
- *Drehmomenttrendbereich: $10\% < M < 100\%$*

(IKA-Werke GmbH & Co. KG 2023c)

Die aufgeführten Bedingungen waren nicht alle einhaltbar. Wenn genug Probe für die Messung zur Verfügung stand, konnte diese direkt in der Weithalsdose (500 ml) stattfinden, was jedoch nur für die wenigen Fällen zutraf. Da die Originalproben in sehr viele Teilproben unterteilt waren, mussten diese vor der Messung in langgestreckte Bechergläser (250 ml) umgefüllt werden, um die Eintauchbedingungen zu gewährleisten (Abbildung 9).

In diesen Bechergläsern bestand nicht die Möglichkeit, die Spindel vor dem Anschrauben in die Probe geneigt einzutauchen, da ihre Geometrie zu klein war. So bestand beim Einsatz von Spindel SP-7 nur ein 5 mm breiter Abstand zu den Becherglaswänden. Des Weiteren kam es bei den vor dem Einfrieren homogenisierten Proben (siehe 5.2.3) häufig zu Ablagerungen auf der Spindel noch während des geneigten Eintauchprozesses.



Abbildung 8: Messung im Becherglas



Abbildung 9: Messung in der Weithalsdose

Für die Messungen wurden Scheibenspindeln der Größen SP-7 bis SP-9 verwendet sowie einmalig zwei DIN-Spindeln. Diese lieferten jedoch keine verwendbaren Ergebnisse, weil sich Ablagerungen in dem Spalt zwischen Rotor und Stator abgesetzt hatten und dadurch die Messwerte verfälschten (Abbildung 10).



Abbildung 10: Ungültige Messung mit der DIN-SP-5 aufgrund von Ablagerungen

Die Messungen erfolgten stets mit 50 Umdrehungen pro Minute für einen Zeitraum von 150 Sekunden. Dabei wurden alle 10 Sekunden die Ist-Drehzahl [rpm], Viskosität [mPa s], Temperatur [°C] und der Drehmomentbereich [%] erfasst.

Die mit der jeweiligen Spindel maximal messbare Viskosität wurde nach Herstellerangaben über den „Range coefficient“ erfasst. Dieser war abhängig von Spindeltyp und -geschwindigkeit vorgegeben. Die maximal zulässige Viskosität berechnete sich nach der Formel

$$\eta_{max} = \frac{\text{Range coefficient}}{\nu_{Spindel}} \quad (7)$$

Maximal zulässige Viskosität

Mit η_{max}	- Maximal zulässige Viskosität	[mPa s]
Range coefficient	- Systemfaktor	[-]
$\nu_{Spindel}$	- Spindelgeschwindigkeit	[rpm]

wobei als Spindelgeschwindigkeit 50 rpm eingesetzt wurden.

Tabelle 2: Maximal zulässige Viskosität für die im Versuch verwendeten Spindeln

Spindel	Range coefficient	Max. Viskosität [mPa s]
SP-7	40.000	800
SP-8	100.000	2.000
SP-9	200.000	4.000
DIN-SP-5	12.200	244
DIN-SP-6	36.500	730

Entgegen der Vorgabe der DIN 53019-1 wurde der Temperaturmessfühler zum Zeitpunkt der Viskositätsmessungen nicht aus den Proben entfernt, um die Änderungen von T während des Rotationsversuches detektieren zu können. Es ist daher davon auszugehen, dass der Sensor insbesondere bei den schmalen Bechergläsern das Fließfeld beeinflusst hat. Bei den weiteren Weithalsdosen wird diese Beeinträchtigung geringer ausgefallen sein, da dort der Messfühler weiter weg vom Zentrum mit der Spindel installiert war.

5.2.3 Einsatz verschiedener Substrate im Laborversuch

Bei der Viskositätsbestimmung wurden insgesamt sechs verschiedene Versuchsreihen (V) durchgeführt. Vier davon (V1 bis V4) galten der Ermittlung des Kohle- und Temperatureinflusses (vgl. Tabelle 3).

Während das zu untersuchende Substrat in V4 aus Fermentern des Technikums entnommen wurde, stammte jenes in V1 bis V3 aus der Biogasanlage des Milchviehbetriebes „Hof Postma“ in 18069 Lambrechtshagen. Diese wurde zum Zeitpunkt der Probennahme mit Wirtschaftsdünger betrieben, der in Hallen- bzw. Scheunenhaltung angefallen war (Postma 2023). Es handelte sich dabei um Rindergülle und Maissilage, die einerseits aus der Fütterung übriggeblieben ist, andererseits zusätzlich zugeführt wurde.

Die frische Probe wurde in drei Teilprobensätze aufgeteilt: Davon blieb einer unbehandelt, ein weiterer wurde mit Nadelholzkohle der Körnung $\leq 10 \mu\text{m}$ versetzt, der dritte mit Nadelholzkohle $\leq 2 \text{ mm}$, im Durchschnitt $\approx 70 \mu\text{m}$ groß (vgl. Abbildung 11). Die Zugabe betrug jeweils 1 % bezogen auf die Frischmasse.

Die Kohlen wurden von der PHK – Polymertechnik GmbH erworben, wobei es sich bei derjenigen mit der Körnung $\leq 10 \mu\text{m}$ um das kommerzielle Vorprodukt „Nerolit ® 100 HT 10 μm Absorberkohle“ handelte. Beide Produkte hatten nach Herstellerangaben eine spezifische Oberfläche von $> 395 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ und einen fixen Kohlenstoffanteil von 82 % in der Trockenmasse. Die Kohlen wurden bei Temperaturen $> 800 \text{ }^\circ\text{C}$ gewonnen und sind von der European Chemical Agency (ECHA) unter der REACH Nummer 240-383-3 als Holzkohle klassifiziert: Sie weisen demnach keine Gefahrstoffpotenziale auf (PHK – Polymertechnik GmbH 2019).

Die Probensätze wurden nach dem Kohleversatz in jeweils drei kleinere Proben für die Versuchsreihen V1, V2 und V3 unterteilt, wobei jede Reihe die gleichen Ausgangssubstrate „Probe blanko“, „Probe Kohle 10 μm “ und „Probe Kohle 70 μm “ enthielt. Innerhalb der jeweiligen Versuchsreihe wurden die Probentypen abermals auf drei Teilproben verteilt, wodurch

V1 und V3 insgesamt je neun Proben, V2 aus Substratmangel acht Proben mit einem durchschnittlichen Volumen von etwa 300 ml erhielten (siehe Abbildung 11).

Anschließend wurde die zweite Versuchsreihe homogenisiert und alle drei Reihen bis zum Beginn der Viskositätsexperimente in der Gefrierkammer gelagert. Die anteilige Homogenisierung erfolgte dabei zur weiterfolgenden Untersuchung der optimalen Probenvorbehandlung und Lagerung.

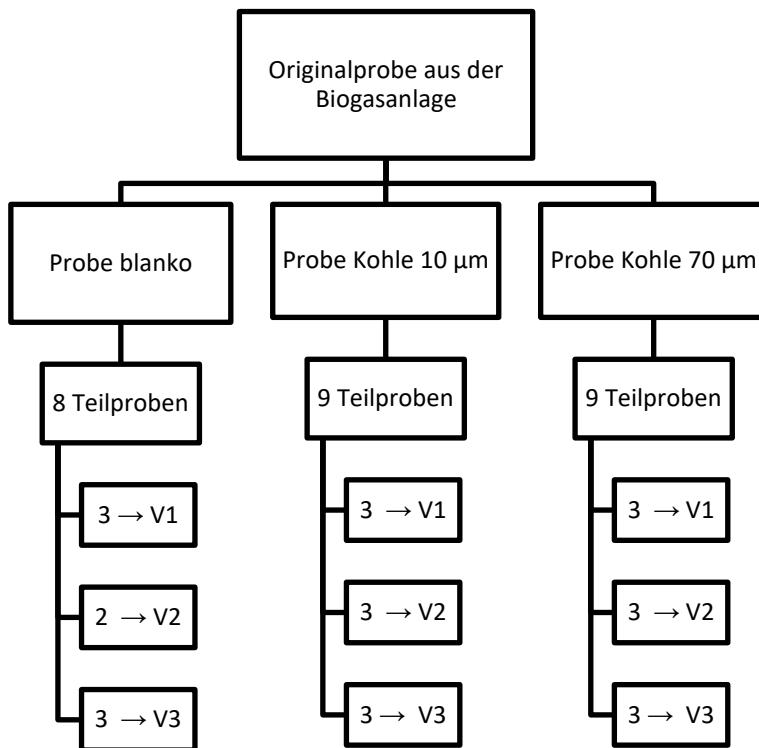


Abbildung 11: Übersicht der Probengewinnung für V1 bis V3
(Eigene Darstellung)

Die drei anderen Versuchsreihen (Nr. 4, 5 und 6, siehe Tabelle 3) beruhten auf Fermentermischproben (MP) aus Gruppen von vier (bzw. bei MP3 nur drei) kontinuierlich laufenden Fermentern, die mit dem gleichen Ausgangsmaterial und Substrat betrieben wurden.

Zwei der Fermentergruppen wurden mit Maissilage gefüttert, ein „blanko“ und einer, der zusätzlich mit Kohle für die Versuchsreihe 4 versetzt war. Zwei weitere Gruppen bekamen neben der Silage den Wirtschaftsdünger Hühnertrockenkot (HTK) zugeführt.

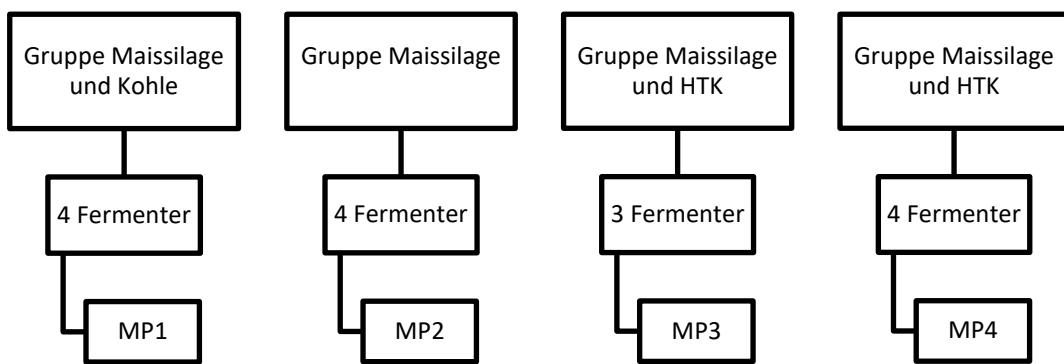


Abbildung 12: Übersicht der Probengewinnung für V4 bis V6

(Eigene Darstellung)

Die für V4 eingesetzte Kohle wurde nicht wie in V1 bis V3 extern bezogen, sondern im Technikum selbst hergestellt: Dabei wurden Würfel aus Kiefernholz mit einer Kantenlänge zwischen 5 und 8 mm bei über 700 °C thermisch behandelt. Nach der Pyrolyse waren die Würfel stark geschrumpft, sodass ihre Kantenlängen nur noch 3 bis 6 mm betragen. Sie wurden wie in den Versuchsreihen 1 bis 3 zu 1 % bezogen auf die Frischmasse den Fermentern beigemengt, jedoch nicht direkt in die Suspension, sondern in einem separaten Korb.



Abbildung 13: Kiefernholzwürfel vor und nach der Pyrolyse

Tabelle 3: Übersicht der Versuchsreihen

Nr.	Versuchsreihe (V)	Teilversuch	Anzahl Proben
1	Kohle gefroren, früher aufgetaut	Probe blanko	3
		Probe Kohle 10 µm	3
		Probe Kohle 70 µm	3
2	Kohle gefroren, vorher homogenisiert	Probe blanko	2
		Probe Kohle 10 µm	3
		Probe Kohle 70 µm	3

Fortsetzung Tabelle 3: Übersicht der Versuchsreihen

Nr.	Versuchsreihe (V)	Teilversuch	Anzahl Proben
3	Kohle gefroren, nachher homogenisiert	Probe blanko	3
		Probe Kohle 10 µm	3
		Probe Kohle 70 µm	3
4	Fermentermischprobe (Kohle, Maissilage)	Mischprobe 1	1
5	Fermentermischprobe (Maissilage)	Mischprobe 2	1
6	Fermentermischprobe (Maissilage, HTK)	Mischprobe 3	1
		Mischprobe 4	1

5.3 Durchführung und Ergebnisse

Die Proben wiesen je nach Versuchsbedingungen ein recht unterschiedliches Schaumverhalten vor, während und nach der Ermittlung der Viskosität auf. Der Anhang enthält einen Teil der Fotodokumentation der einzelnen Messungen. Die ausführliche Dokumentation sowie die erhobenen Daten werden aufgrund ihres Umfanges dieser Arbeit separat beigelegt.

5.3.1 Einfluss der Homogenisierung

Die Homogenisierung der Proben war notwendig, um fehlerfreie Viskositätsmessungen zu gewährleisten sowie Vergleiche durchführen zu können. Der Umstand, dass durch die Zerstörung großer Partikel das Fließverhalten der Gärsubstrate verändert wurde, musste gegenüber dem hohen Potenzial möglicher Messfehler durch Faserumwicklungen und Sedimentation akzeptiert werden.

Zur Berücksichtigung dieses Einflusses wurden die Auswirkungen der Homogenisierung anhand zweier Fermentermischproben aus den Versuchsreihen 4 und 5 untersucht und bewertet. Dabei unterlag V4 dem Einfluss der Kohlezugabe, während V5 unbehandelt war.

Die erste Viskositätsmessung erfolgte direkt nach der Probenentnahme, wobei die Substrattemperaturen bereits von 38 °C im Fermenter auf 26 °C gefallen waren. Nach der Homogenisierung betrugen die Temperaturen 23 °C.

Im Gegensatz zu den Proben aus der Biogasanlage (siehe Kapitel 5.3.2) unterlagen die Fermenterproben mit Maissilage keiner starken Schaumbildung während der Homogenisierung, weswegen ihre Viskosität sofort gemessen werden konnte. Die Werte der frischen Proben schwankten jedoch deutlich während des Messvorganges, was im zeitlichen Verlauf

$\eta(t)$ zu erkennen ist (Abbildung 14 und 15). Hingegen war $\eta(t)$ nach der Homogenisierung kontinuierlicher.

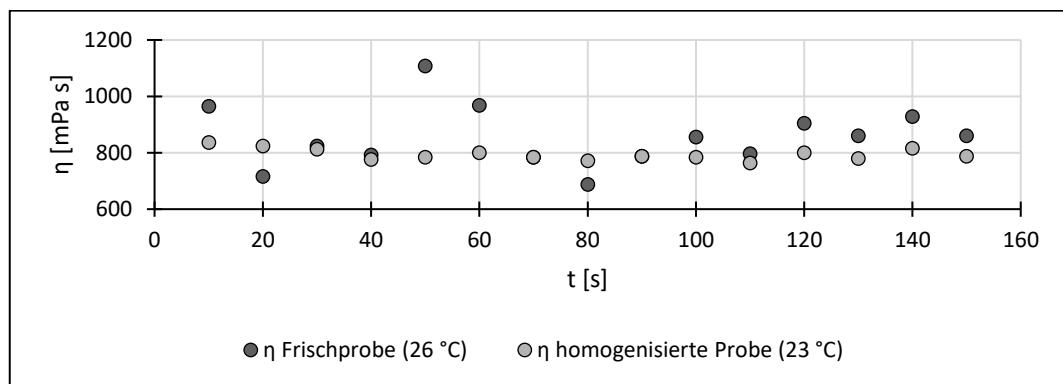


Abbildung 14: Viskositätsverlauf während der Messung bei Mischprobe 1

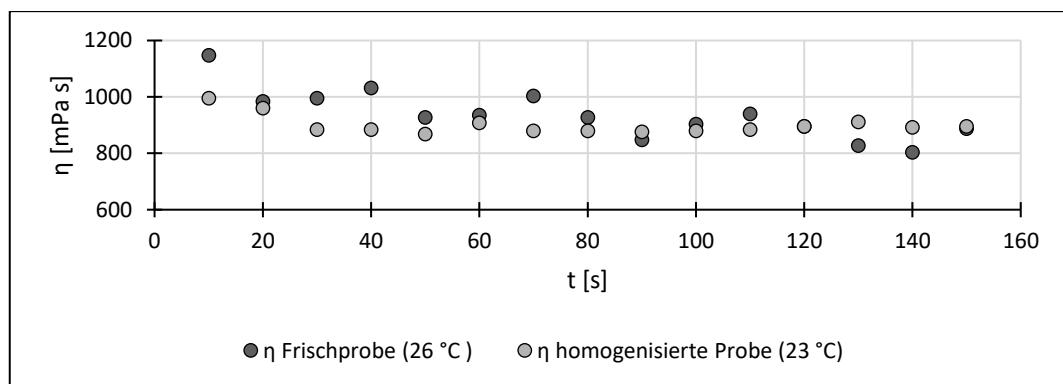


Abbildung 15: Viskositätsverlauf während der Messung bei Mischprobe 2

Des Weiteren wiesen die Daten nach der Homogenisierung weitaus geringere Standardabweichungen auf als zuvor. Da sich nach dem Messvorgang bei den Frischproben Partikel und Fasern sichtbar auf der Spindel abgelagert hatten (Abbildung 16), ist anzunehmen, dass diese zu den Schwankungen in der Viskosität geführt haben. Bei den homogenen Proben ließen sich derartige Ablagerungen nicht finden. Die Vorbehandlung mit dem Mixer erweist sich daher als gute Grundlage für die Vergleichbarkeit verschiedener Teilproben, da auch bei deren Entnahme nicht immer gewährleistet werden kann, dass alle für das Substrat typischen Bestandteile (wie z. B. Fasern bestimmter Länge) in der Probe enthalten sind.

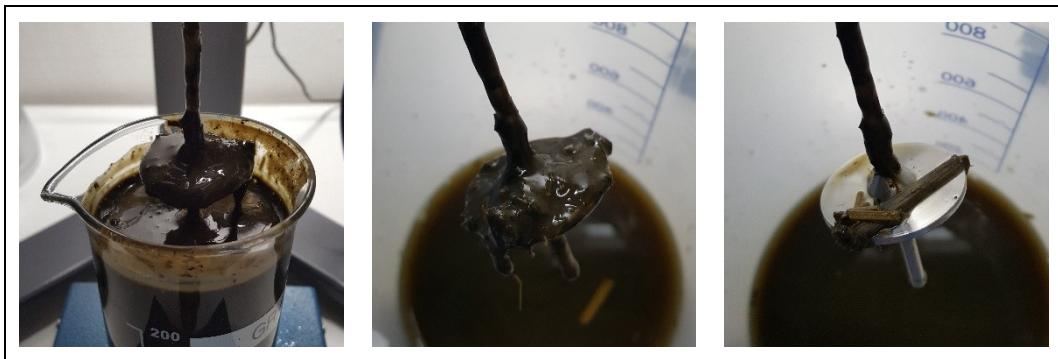


Abbildung 16: Ablagerungen auf der Spindel bei frischer Probe



Abbildung 17: Ablagerungsfreie Spindel bei homogenisierter Probe

Jedoch ist zu beachten, dass die Versuchsbedingungen für die betrachteten Messdurchgänge nicht einheitlich waren, da sich die Proben von der ersten zur zweiten Messung um 3 K abgekühlt hatten. Eine mögliche Beeinflussung durch die Temperatur wird daher in Kapitel 5.3.3 näher untersucht.

5.3.2 Einfluss der Kohle

Die Untersuchung der Kohleapplikation erfolgte anhand der Versuchsreihen 1 bis 4. Während bei der ersten Reihe allein die Einwirkung der Pyrolysekohle im Fokus stand, wurden bei Reihe 2 und 3 außerdem die Auswirkungen des verlängerten Einfrierens betrachtet, um eine geeignete Methode zur Bestimmung der Viskosität bei Gärsubstraten zu formulieren. V4 diente der Nachstellung der Umgebungsbedingungen in Biogasanlagen und als Vergleichsmittel zu den anderen Fermentern des Technikums.

Versuchsreihe 1

Die Homogenisierung der Proben in V1 erfolgte unmittelbar nach ihrer Entnahme aus der Kühlkammer. Die Gärsubstrate neigten durch die akute Durchmischung im Mixer zu starker Bläschenbildung, was beim Abfüllen in die Weithalsdosen zur Bildung eines Schaumfilms führte. Aufgrund dessen wurden die Proben vor der Viskositätsmessung 24 Stunden bei Zimmertemperatur gelagert, um den Abbau des Schaumes zu gewährleisten:

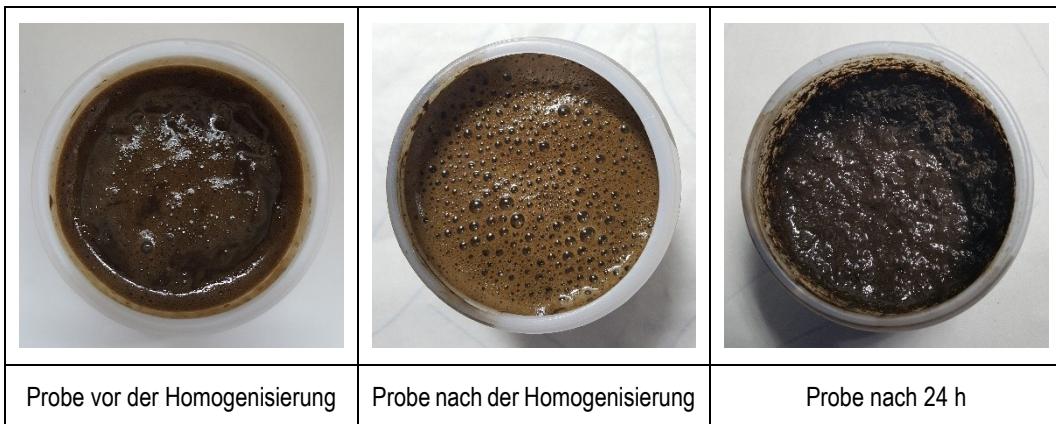


Abbildung 18: Schaumverhalten bei einer Probe ohne Kohlezusatz

Der anfangs aus vielen kleinen Blasen bestehende Schaum war nach Ablauf der Zeit in sich zusammengefallen und hatte eine Art Decke gebildet, in der vereinzelt große Blasen sichtbar waren. Während des Aufrührens vor der Messung löste sich die Schaumdecke wieder in kleinere Bläschen auf. Die Proben wiesen diesbezüglich ein unterschiedliches Verhalten auf, wobei das stärkste Schäumen stets bei den „blanco“-Proben beobachtet wurde (siehe auch Tabelle 7 im Anhang):

Tabelle 4: V1, Probenverhalten während der Viskositätsmessung bei 21 °C

Probe	Geruch	Optik		
		Vor dem Aufrühren	Nach dem Aufrühren	Nach der Messung
blanco	Pflanzengeruch	braun, großblasig, cremig	ganzflächig schaumig, kleinblasig	ganzflächig schaumig
Kohle 10 µm	fast geruchslos	dunkelbraun, großblasig, flüssig	ganzflächig schaumig, kleinblasig	weniger schaumig, teilweise glatt
Kohle 70 µm	fast geruchslos	dunkelbraun, großblasig, flüssig	schaumig, teilweise glatt, kleinblasig	glatt, vereinzelt schaumig

Bei dem anschließenden Messdurchgang bei 21 °C wiesen die drei „blanco“-Proben die höchsten Viskositäten auf, die geringste wurde beim Probensatz „Kohle 70 µm“ ermittelt.

Der Kohlezusatz hat folglich zu einer nachweisbaren Verflüssigung des Substrates geführt, so wie von Beckmann in Neumann (2019) beschrieben.

Abbildung 19 zeigt den Verlauf der Viskosität während der Messung beispielhaft an drei Teilproben. Diese bilden auch die Datengrundlage für die Abbildungen 19 bis 27.

Gemäß der vorhergegangenen Homogenisierung blieben die ermittelten Werte bei allen neun Messdurchgängen über die Zeit sehr konstant. Die Standardabweichungen betragen bei den „blanko“-Proben zwischen 4,5 und 5,4 mPa s, bei den „Kohle 10 µm“-Proben zwischen 1,4 und 2,7 mPa s und bei den „Kohle 10 µm“-Proben zwischen 0,6 und 1,5 mPa s. Anhand der Daten lässt sich schlussfolgern, dass die Kohleapplikation neben der Senkung der Viskosität diese auch robuster gegenüber Schwankungen macht.

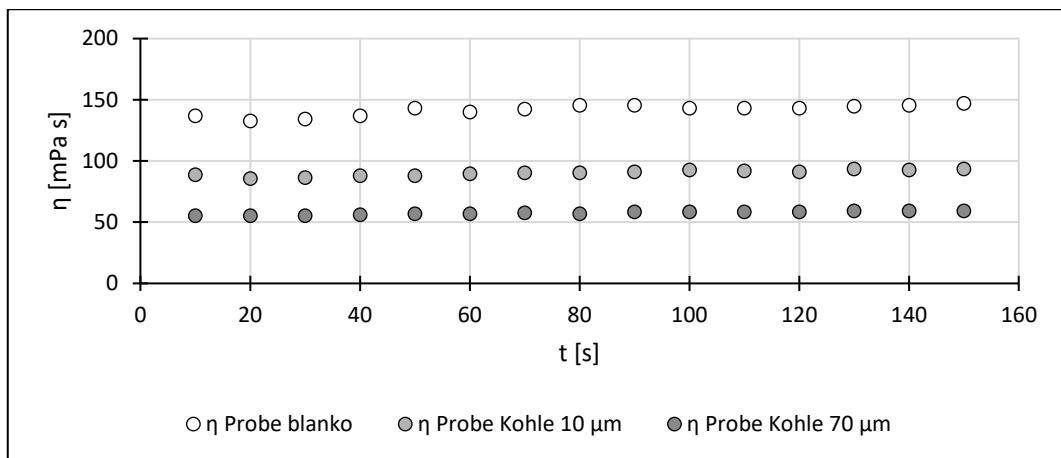


Abbildung 19: V1, Viskositätsverlauf bei 21 °C

Die Proben wurden nach der ersten Viskositätsbestimmung für 24 h in der Wärmekammer bei 38 °C gelagert. Diese Temperatur entspricht den typischen mesophilen Umgebungsbedingungen in Biogasanlagen (Kutschmitt u. a. 2016) sowie derer in den beprobten Fermentern. Die Erwärmung sollte zudem zu einer Aktivierung der Biomasse in anlagenähnlichem Umfeld führen.

Jedoch betrug die Probentemperatur bei der Viskositätsmessung nur noch 36 anstatt 38 °C, obwohl jede Probe einzeln aus der Wärmekammer geholt und nach dem Aufröhren sofort in ein Becherglas umgefüllt wurde: Dieses hatte zu jenem Zeitpunkt Umgebungstemperatur. Aufgrund der verhältnismäßig großen Fläche des Glases bezogen auf das Probenvolumen, kühlte sich die Biomasse in Wandnähe schnell ab. Da der Temperaturfühler an der Glaswand befestigt war, wich die dort ermittelte Temperatur von derer im Zentrum um 1 bis 2 K ab. Dieser Umfülleffekt war auch bei den anschließenden Messungen bei 6 °C zu finden.

Das Phänomen des abweichenden Temperaturwertes bei großer Differenz zwischen Proben- und Umgebungstemperatur wurde zudem auch in der DIN 53019-2 beschrieben (vgl. Kapitel 4.4.1).

Bei der Betrachtung des Schaumes war auffällig, dass die mit Kohle versetzten Proben ein schnelleres Setzungsverhalten aufwiesen als die „blanko“-Probe (siehe Abbildung 20 und Tabelle 8).

Tabelle 5: V1, Probenverhalten während der Viskositätsmessung bei 36 °C

Probe	Geruch	Optik		
		Vor dem Aufrühren	Nach dem Aufrühren	Nach der Messung
blanko	stark faulig	braun, glatt, vereinzelt schaumig, dünnflüssig	ganzflächig schaumig, kleinblasig	schaumig, vereinzelt glatt, sehr kleinblasig
Kohle 10 µm	leicht faulig	dunkelbraun, glatt, vereinzelt schaumig, dünnflüssig	ganzflächig schaumig, kleinblasig, schnelle Schaumsetzung	glatt, vereinzelt schaumig, sehr kleinblasig
Kohle 70 µm	leicht faulig	dunkelbraun, glatt, vereinzelt schaumig, dünnflüssig mit Bodensatz	ganzflächig schaumig, kleinblasig, schnelle Schaumsetzung	glatt, vereinzelt schaumig, sehr kleinblasig

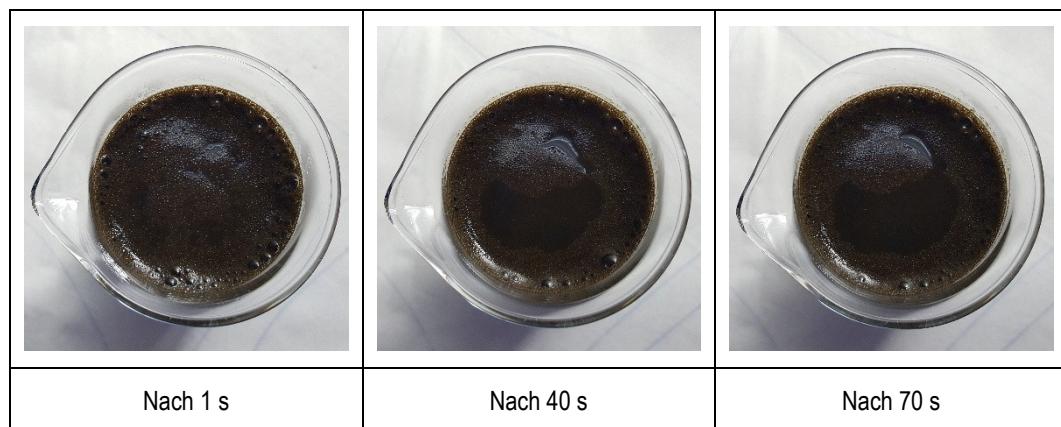


Abbildung 20: V1, Dokumentation der Bläschensetzung nach dem Aufrühren einer Kohle-Probe bei 36 °C

Wie bereits bei der ersten Messung besaßen die unbehandelten Proben die höchsten Viskositäten, es folgten die „Kohle 10 µm“-Proben und zuletzt diejenigen mit 70 µm großen Kohlepartikeln (Abbildung 21). Auch die Größenordnungen der Standardabweichungen entsprachen denen des ersten Versuches: Die größten Abweichungen traten bei den „blanko“-

Proben auf mit durchschnittlich 6,5 mPa s, es folgten die mit 10 µm großer Kohle versetzten (2,5 mPa s) und zuletzt die der „Kohle 70 µm“-Proben (1,3 mPa s).

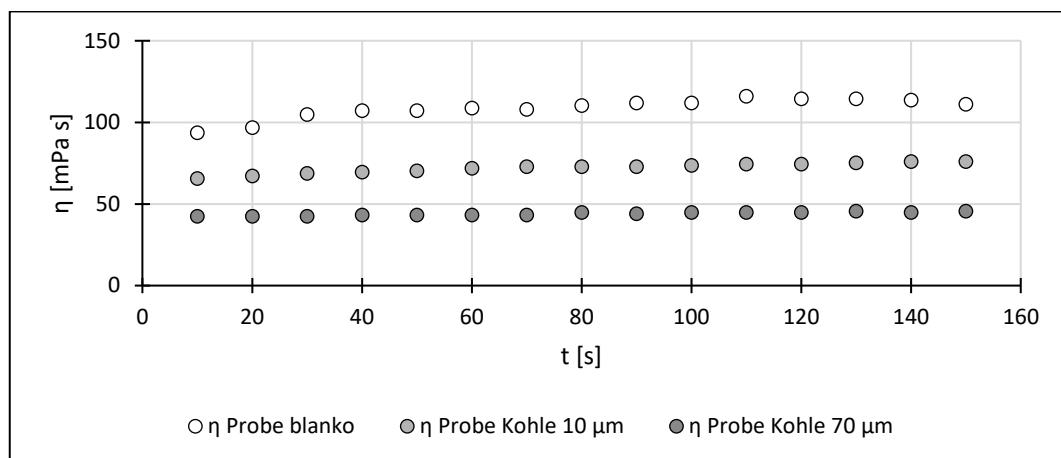


Abbildung 21: V1, Viskositätsverlauf bei 36 °C

Nach Beendigung der zweiten Messung wurden die Proben in die Kältekammer gebracht, wo sie bei 6 °C vier Tage lang lagerten. Die verlängerte Lagerdauer hing mit der Überbrückung eines Wochenendes zusammen und erwies sich im Nachhinein als nicht sinnvoll: Es kam in allen Proben zur Phasentrennung in dünnflüssige Probe und Bodensatz. Selbst nach dem Aufrühren stellte sich keine homogene Durchmischung ein, da kurz danach wieder eine Setzung der aufgewirbelten Partikel erfolgte.

Des Weiteren kam es bei der Messdurchführung häufig zu Ablagerungen auf der Spindel (Abbildung 22), auch war die ermittelte Viskosität deutlich höher als bei den Messungen bei 21 und 36 °C. Ob dies mit dem Einfluss der Temperatur, der überzogenen Lagerdauer oder mit der Störung durch die Ablagerungen einherging, ist nicht aussagbar.

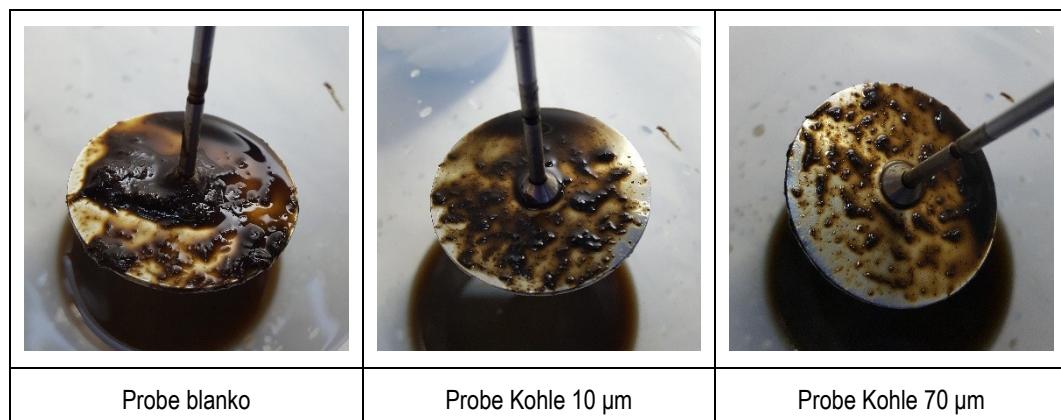


Abbildung 22: Ablagerungen auf der Messspindel bei allen drei Probensätzen

Ferner wiesen die Proben wieder nicht die gewünschte Temperatur von 6 °C, sondern zwischen 7 und 8 °C auf. Dies ist wie bei den Messungen bei 36 °C auf den Umfülleffekt durch das anders temperierte Becherglas zu erklären. Jener Fehler wurde bei den darauffolgenden Versuchsreihen 2 und 3 durch eine Vor temperierung des Becherglases vermieden.

Es war auffällig, dass alle Proben ein nur sehr gering ausgeprägtes Schaumverhalten aufwiesen (vgl. Tabelle 6 und 9). Dies könnte einerseits mit der Verringerung der mikrobiellen Aktivität bei 6 °C erklärt werden, andererseits mit dem zunehmenden Alter der Proben. Mit Betrachtung der nachfolgenden 3. Versuchsreihe erscheint hierbei die zweite Erklärung plausibler als die erste: Deren Proben hatten bei den Viskositätsmessungen bei 6 °C einen Tag nach der Homogenisierung dennoch stark geschäumt.

Tabelle 6: V1, Probenverhalten während der Viskositätsmessung bei 7 °C

Probe	Geruch	Optik		
		Vor dem Aufröhren	Nach dem Aufröhren	Nach der Messung
blanko	leicht faulig	braun, glatt, 2 Phasen	glatt, vereinzelt Blasen, cremig	glatt
Kohle 10 µm	geruchslos	dunkelbraun, glatt, 2 Phasen	glatt, vereinzelt Blasen, dünnflüssig	glatt
Kohle 70 µm	fast geruchslos	dunkelbraun, glatt, 2 Phasen	glatt, vereinzelt Blasen, flüssig	glatt

Das viskose Verhalten der Probensätze entsprach abermals dem der vorangegangenen Messungen (Abbildung 23), wenngleich die Größenordnung der Standardabweichungen sich insbesondere bei den „blanko“-Proben erhöhte: Diese lagen mittlerweile zwischen 6,9 und 11,3 mPa s. Bei den mit 10 µm großer Kohle versetzten Proben blieb die durchschnittliche Abweichung bei 2,5 mPa s, auch die der mit 70 µm Kohlepartikeln versetzten änderte sich kaum mit 1,4 mPa s.

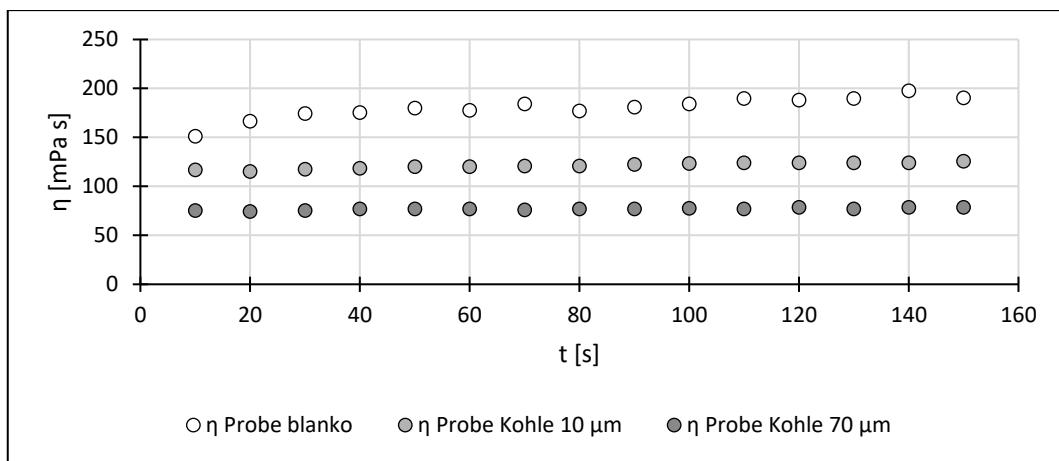


Abbildung 23: V1, Viskositätsverlauf bei 7 °C

Aufgrund des häufig auftretenden Ablagerungsproblems wurde versuchsweise eine der „blanko“-Proben nach Abschluss der Viskositätsmessungen nochmals homogenisiert, um die Phasentrennung aufzulösen. Dabei kam es jedoch zu starkem Schäumen, was zur Bildung eines 2 cm hohen Schaumfilmes in der Weithalsdose führte. Aus diesem Grund wurde die Viskositätsmessung auf den nächsten Tag verlegt.

Zwar hatte sich der Schaum in dieser Zeit etwas gesetzt, blieb aber noch bestehen. Des Weiteren kam es abermals zu Ablagerungen auf der Spindel (Abbildung 24).



Abbildung 24: Ablagerungen auf der Messspindel trotz zweiter Homogenisierung

Im Ergebnis sank die ermittelte Viskosität bei der nachträglichen Homogenisierung um etwa 50 mPa s (Abbildung 25). Es ist aber ungewiss, ob dies mit der besseren Durchmischung im Mixer oder mit dem Einfluss der Lagerdauer begründet werden kann.

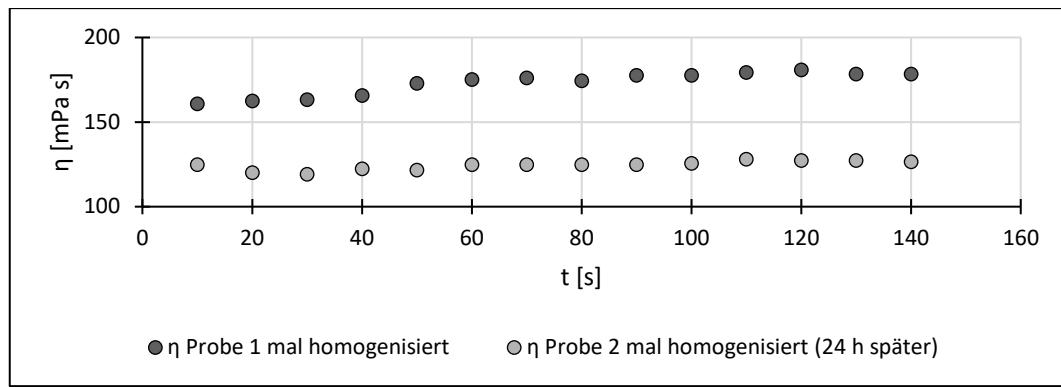


Abbildung 25: Einfluss von zweifacher Homogenisierung und Lagerdauer (Probe blanko)

Bei der anschließenden Entsorgung der Proben wurde die hervorgerufene Phasentrennung nochmals am zurückgebliebenen Bodensatz deutlich:

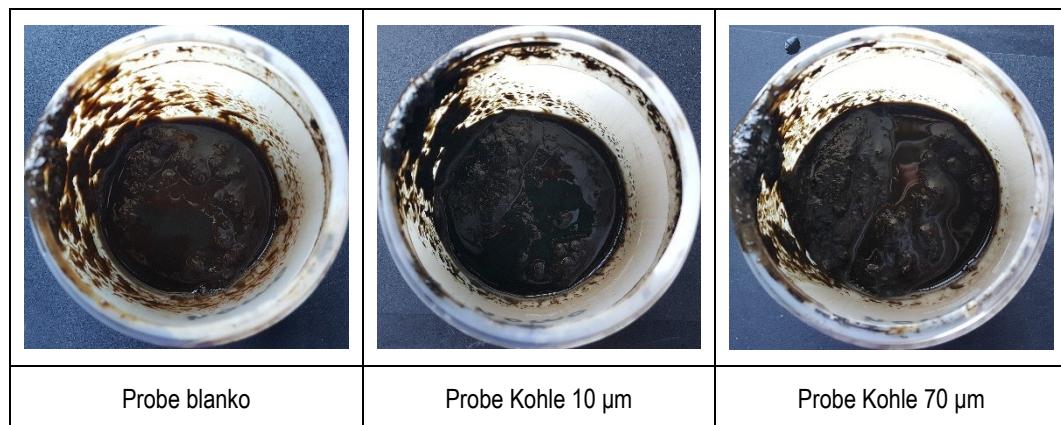


Abbildung 26: V1, sichtbarer Bodensatz bei Entsorgung der Proben nach der Messung bei 7 °C

Insgesamt wiesen alle Messreihen einen signifikanten Einfluss der Pyrolysekohle auf die Viskosität auf. Dabei wirkten die ca. 70 µm großen Kohlepartikel am stärksten viskositäts-senkend.

In der statistischen Auswertung wurden aus den jeweils 15 Werten pro Messdurchgang die Mediane aus den Einzelmessungen gebildet. Anschließend wurde aus den drei errechneten Medianen pro Probensatz der Mittelwert bestimmt und in Abbildung 27 eingetragen. Mittelwert und Median wichen dabei kaum voneinander ab.

Die Ermittlung der Trendlinien erfolgte polynomisch, da dadurch das beste Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 1$ erreicht werden konnte. Die Graphen zeigen das für viele Fluide typische Verhalten: Eine exponentielle Abnahme der Viskosität mit steigender Temperatur (Mezger 2016).

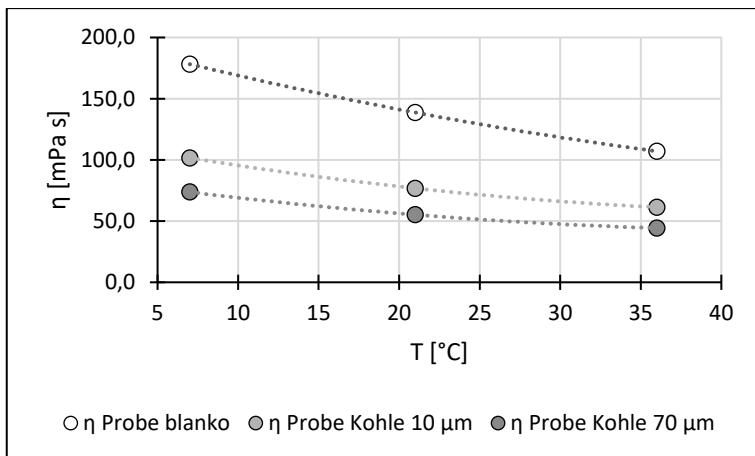


Abbildung 27: V1, Einfluss der Kohle auf das viskose Verhalten von Biomasse

Es zeigte sich, dass das Verhältnis $\eta_x : \eta_{\text{blanko}}$ der Viskositäten zwischen den mit Kohle versetzten Probensätzen und der Originalprobe weitgehend gleich blieb: So betrug es zwischen „Kohle 10 µm“ und „blanko“ zuerst 0,55 bei 21 °C, dann 0,57 bei 36 °C und 0,57 bei 7 °C. Bei „Kohle 70 µm“ und „blanko“ lag es anfangs bei 0,40 und blieb anschließend bei 0,41.

Versuchsreihe 2 und 3

Der viskositätsverringernde Effekt der Kohleapplikation ließ sich auch den in den Versuchsreihen 2 und 3 nachweisen, die zur Bestimmung der Auswirkungen des Probeneinfrierens und der Homogenisierung vor bzw. nach dem Gefrieren dienten. Der Effekt war wie bei V1 am stärksten bei den „Kohle 70 µm“-Proben ausgeprägt. Die Standardabweichungen der einzelnen Messungen hingegen waren deutlich geringer als in der ersten Versuchsreihe: Ihre Größenordnung betrug bei V2 zwischen 0 und 2,3 sowie zwischen 0,4 und 2,4 bei V3. In V1 lagen die Abweichungen noch zwischen 0,6 und 11,3. Die ausführliche Beschreibung der Versuchsdurchführung für V2 und V3 befindet sich in Kapitel 5.3.4., Abbildung 28 und 29 wurden wie bei V1 auf Basis von Medianen und Mittelwerten erstellt.

In beiden Versuchsreihen lässt sich wie bereits zuvor ein exponentieller Fall der Viskosität mit zunehmender Temperatur nachweisen, jedoch ist auffällig, dass der Abstand zwischen den Viskositäten der „Kohle“-Proben und der „blanko“-Probe deutlich verringert ist im Vergleich zu V1. Auch nimmt das Verhältnis zwischen „Kohle“ und „blanko“ mit zunehmender Temperatur zu, d. h. die Werte nähern sich immer weiter an: Bei „Kohle 10 µm“ von 0,68 zu 0,71 und 0,73, bei „Kohle 70 µm“ von 0,56 zu 0,59 und 0,62. Dies könnte auf den Einfluss des Einfrierens zurückgeführt werden (vgl. Kapitel 5.3.4) oder auf die zu V1 abweichende Messreihenfolge bei unterschiedlichen Temperaturen. Schließlich wurden die Proben aus

V1 als letztes bei 6 °C gemessen, wohingegen jene aus V2 und V3 als erstes bei dieser Temperatur untersucht wurden und dadurch noch keiner Beeinflussung durch die fortschreitende Lagerdauer unterlagen.

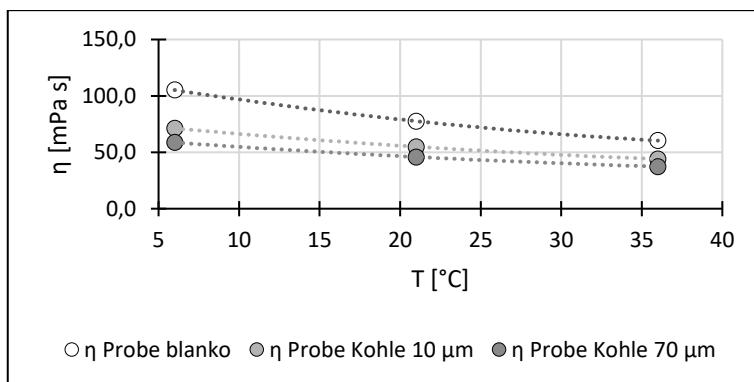


Abbildung 28: V2, Einfluss der Kohle auf das viskose Verhalten von Biomasse

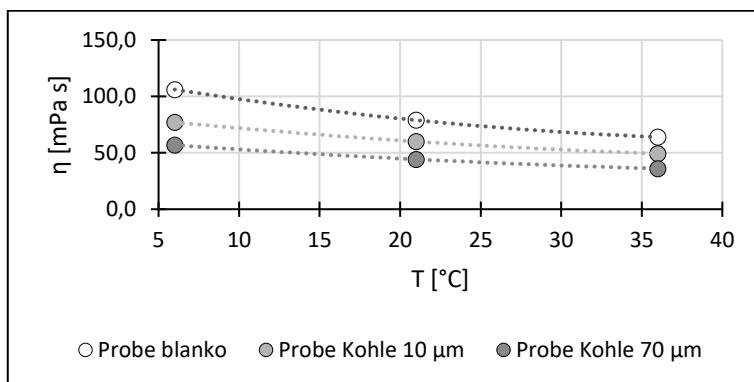


Abbildung 29: V3, Einfluss der Kohle auf das viskose Verhalten von Biomasse

Versuchsreihe 4 und 5

Die Untersuchung der Fermentermischprobe 1 aus V4 (Maissilage mit Kohlezugabe) ergab im Vergleich zur Mischprobe 2 aus V5 (Maissilage ohne Kohlezugabe) ebenfalls verringerte Viskositäten bei drei verschiedenen Temperaturen (23, 7 und 36 °C). Die durchschnittliche Differenz zwischen unbehandelter Probe und mit Kohlewürfeln versetzter Probe betrug dabei 112 mPa s. Die Kohlewürfel selbst waren in der entnommenen Mischprobe nicht enthalten, da sie in einem Korb separat zur Suspension im Fermenter positioniert waren.

Die Standardabweichungen der beiden Mischproben waren relativ gleich, die größten wurden bei 36 °C ermittelt, obwohl die dort gemessenen Viskositäten am geringsten ausfielen. Es ließ sich allerdings kein Zusammenhang zwischen Temperatur und Größenordnung der Abweichungen nachweisen.

Beide Proben wiesen im Vergleich zu den Versuchsreihen mit Rindergülle und Hühnertrockenkot ein deutlich geringer ausgeprägtes Schaumverhalten auf, was auf den niedrigeren Stickstoffgehalt des Maises zurückzuführen ist (vgl. Kliche und Lebuhn 2023).

5.3.3 Einfluss der Temperatur

Die Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur konnte in allen Versuchsreihen bei allen Probenarten nachgewiesen werden: Sie nahm mit zunehmender Temperatur ab. Dieses Verhalten entspricht nach Mezger (2016) dem eines typischen Fluids. Es ist folglich wie von Koll (2012) vorgeschlagen empfehlenswert, die Viskosität von Fermenterproben ausschließlich bei Fermentertemperatur zu messen, um das rheologische Verhalten in Biogasanlagen zu untersuchen.

Wie bereits in Kapitel 5.3.2 beschrieben, näherten sich die Viskositäten von unbehandelter und mit Kohle versetzter Probe mit zunehmender Temperatur immer weiter an. Ein Phänomen, dass im Rahmen dieser Bachelorarbeit nur bei den Versuchsreihen zu beobachten war, die über eine längere Zeit eingefroren waren. Da es in der Fachliteratur keine einheitlich vorgelegte Probenvorbehandlung von Fermentersubstraten gibt (Koll 2012), ist dieses Ergebnis schwer einzuordnen und zu vergleichen.

Abbildung 30 bis 32 zeigen nochmals den jeweiligen Viskositätsverlauf während der Messungen beispielhaft an den drei Teilproben aus V1. Die geringere Streuung der Messwerte bei den mit Kohle versetzten Proben ist somit deutlich bei allen Temperaturen sichtbar.

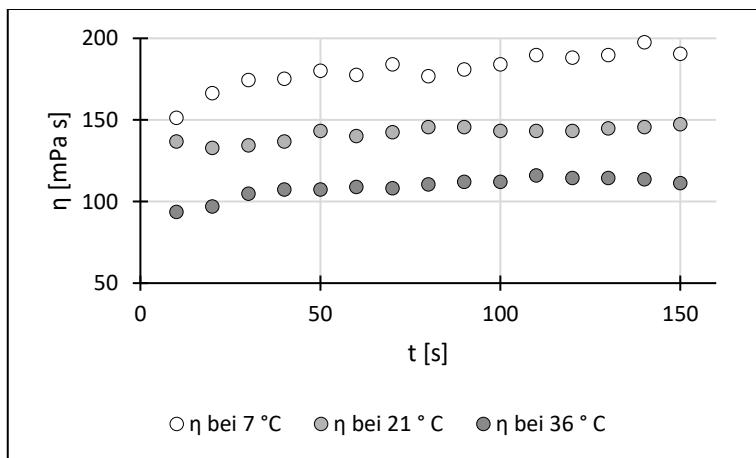


Abbildung 30: V1, Temperatureinfluss auf Probe blanko

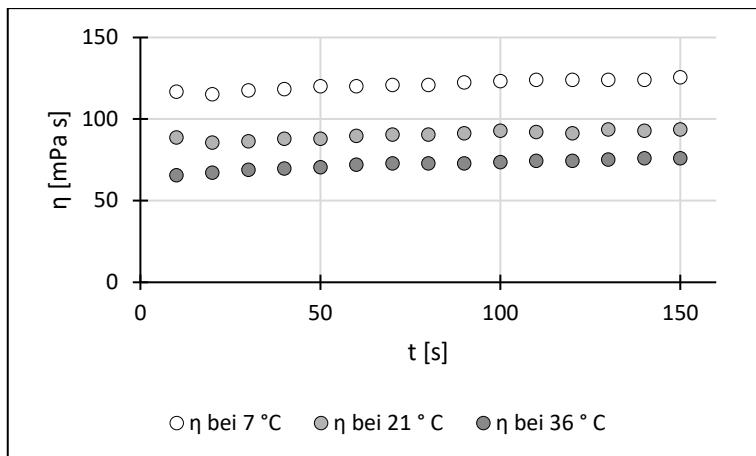


Abbildung 31: V1, Temperatureinfluss auf Probe Kohle 10 µm

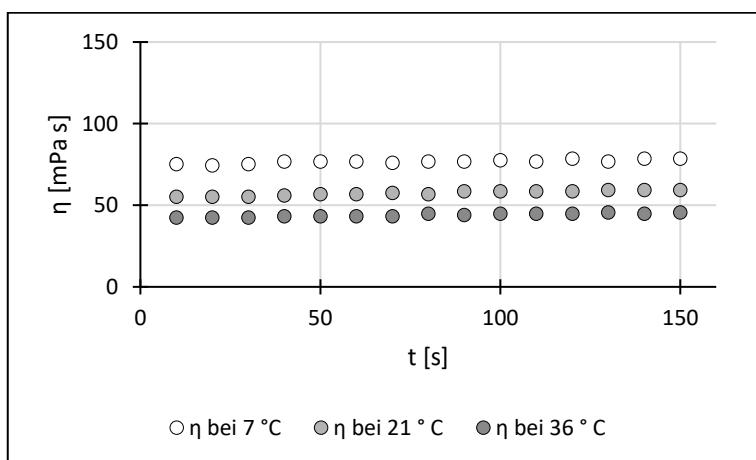


Abbildung 32: V1, Temperatureinfluss auf Probe Kohle 70 µm

5.3.4 Einfluss des Einfrierens

Um Proben aus Biogasanlagen bis zu ihrer anschließenden Untersuchung haltbar zu machen, müssen sie so konserviert werden, dass ihre Biomasse nicht weiter aktiv arbeiten kann. Das Einfrieren erweist sich dabei als eine einfache Lösung, den Fermentationsprozess aufzuhalten. Ein Versuch im Abfall- und Bioenergietechnikum der Universität Rostock, die Biomasse mittels Mikrowelle abzutöten, wurde nach wenigen Sekunden abgebrochen, da die Probe überquoll und aus ihrem Gefäß lief.

Inwiefern der Gefrierprozess die viskosen Eigenschaften der Biomasse beeinflusst, wurde in den Versuchsreihen 2 und 3 untersucht. Nach dem Aufteilen der Originalprobe aus der Biogasanlage Lambrechtshagen und der Kohlezugabe, wurde V2 vor dem Einfrieren homogenisiert, wohingegen V3 unbehandelt eingefroren wurde (siehe Kapitel 5.2.3). Beide Probenreihen wurden nach Abschluss der ersten Versuchsreihe in der Kältekammer bei 6 °C aufgetaut und Reihe 3 anschließend homogenisiert. Sie waren beinahe geruchslos und optisch nicht voneinander zu unterscheiden.

Entsprechend den Proben aus V1 neigten die länger eingefrorenen aus V3 ebenfalls zu starker Schaumbildung während des Mixvorganges, weshalb auch hier die Viskositätsmessung erst nach 24 h durchgeführt wurde (Abbildung 33). Der Schaum entsprach äußerlich dem der ersten Versuchsreihe. Das stärkste Schäumen, gemessen an der Schaumhöhe nach dem Umfüllen in die Weithalsdose, entwickelten die „blanko“-Proben. Diejenigen Proben aus V2, die bereits vor dem Einfrieren homogenisiert worden waren, zeigten stattdessen nahezu kein Schaumverhalten.

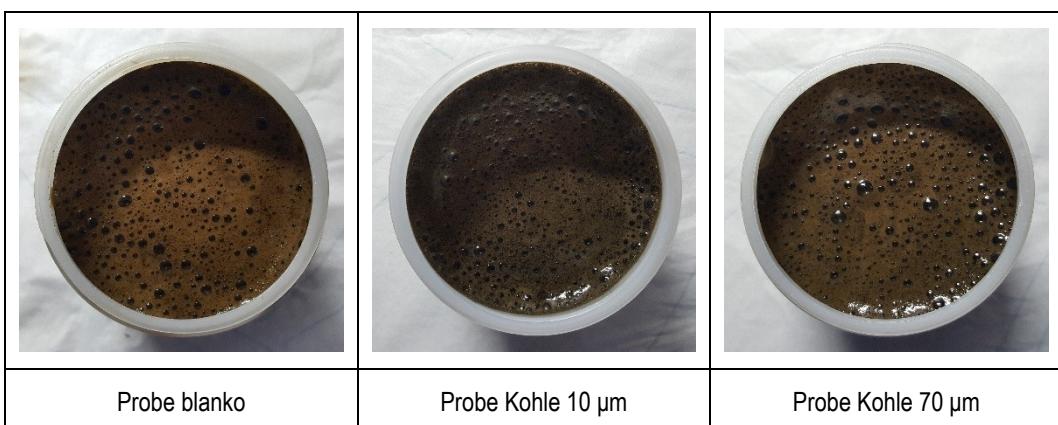


Abbildung 33: V3, nach dem Auftauen homogenisierte Proben

Bei der darauffolgenden Bestimmung der Viskosität wurden die Probensätze nicht wie in der ersten Versuchsreihe nach den Temperaturen 21, 36 und 7 °C gestaffelt gemessen, sondern zuerst bei 6, dann bei 21 und zuletzt bei 36 °C. Das war einerseits dem Umstand der Umgebungstemperatur von 6 °C beim Auftauprozess geschuldet, andererseits dem Bestreben, die Proben immer weiter zu erwärmen und nicht zwischendurch abkühlen zu müssen.

Um den in V1 durch die Differenz zwischen Proben- und Becherglastemperatur entstandenen Messfehler zu verhindern, wurden zwei Bechergläser 24 h in der Kältekammer bei 6 °C gelagert und bei den anschließenden Messungen abwechselnd eingesetzt: Während ein Glas zur Messung entnommen wurde, verblieb das andere in der Kammer. Nach Beendigung der Messung und Reinigung des ersten Becherglases wurde dieses wiederum in die Kältekammer gestellt und das zweite für die nächste Messung verwendet. Nach deren Abschluss war das erste dann wieder auf 6 °C heruntergekühlt und konnte erneut genutzt werden. Durch den wechselnden Einsatz und das Abkühlen ergab sich bei den Viskositätsbestimmungen die gewünschte Temperatur von 6 °C.

Das Verfahren wurde auch bei den Messdurchgängen bei 38 °C angewendet, allerdings fand durch das kurzzeitige Aufrühen der Proben bei Umgebungstemperatur auch bei den

Bechergläsern eine Abkühlung statt, wodurch der Temperatursensor wieder 36 anstatt 38 °C detektierte.

Die ermittelten Viskositäten waren etwas niedriger im Vergleich zu V1 (vgl. Kapitel 5.3.2).

Die größte Differenz wiesen die „blanko“-Proben auf, gefolgt von den „Kohle 10 µm“-Proben.

Die geringsten Abweichungen zwischen früher aufgetauter Probe (V1), vor dem Einfrieren homogenisierter (V2) und nach dem Einfrieren homogenisierter Probe (V3) traten bei der Applikation von 70 µm großer Kohle auf. Folglich übt das Einfrieren einen viskositätssenkenden Einfluss auf Biomasse aus (Abbildung 34 bis 36).

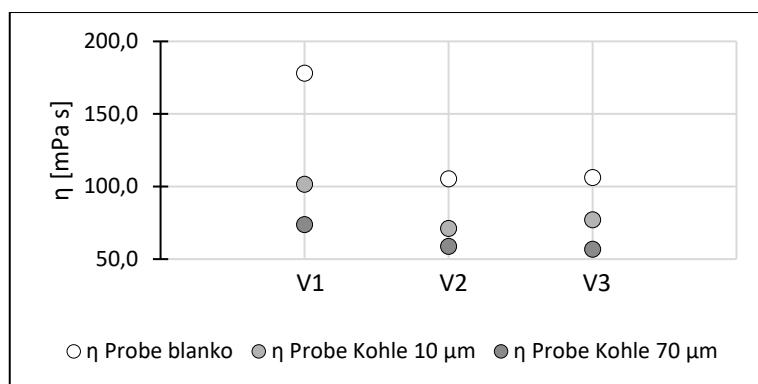


Abbildung 34: Vergleich der Versuchsreihen V1 bis V3 bei 6 °C

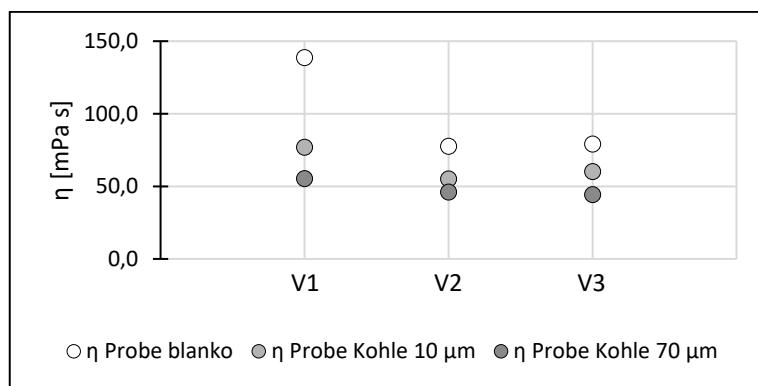


Abbildung 35: Vergleich der Versuchsreihen V1 bis V3 bei 21 °C

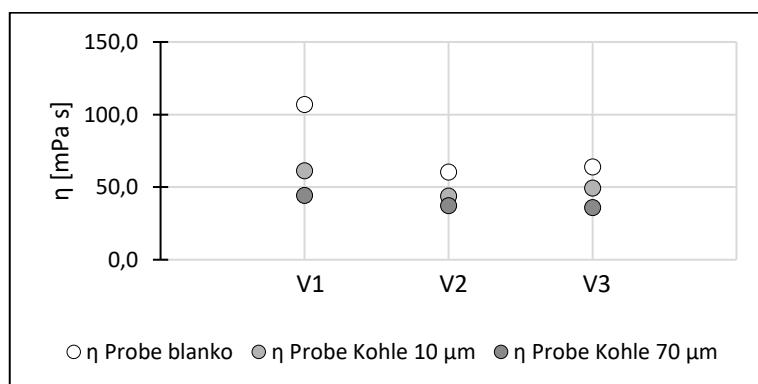


Abbildung 36: Vergleich der Versuchsreihen V1 bis V3 bei 36 °C

5.3.5 Einfluss der Lagerdauer

Wie bereits in Kapitel 5.3.2 zur Versuchsreihe 1 beschrieben, sollte die Probenlagerung zwischen den einzelnen Viskositätsmessungen nicht länger als 24 h andauern. Andernfalls setzen sich Partikel aus der homogenen Masse ab, die die Messergebnisse beeinflussen. Die eingetretene Phasentrennung ist dabei selbst mit abermaliger Homogenisierung nicht umkehrbar.

Es stellt sich somit die Frage, ob mehrere Messdurchgänge bei verschiedenen Temperaturen an nur einem Tag möglich und sinnvoll sind. Aus diesem Grund und mit Hinblick auf die Erarbeitung einer Versuchsanleitung, wurden in einem Experiment zwei Fermentermischproben bei vier verschiedenen Temperaturen an einem Tag gemessen. Die beiden untersuchten Mischproben aus V6 wurden einen Tag zuvor aus den Fermentern entnommen und homogenisiert, anschließend über Nacht in der Wärmekammer bei 38 °C gelagert.

Da die Probenmenge mit 500 ml ausreichend groß war, konnte direkt in den Weithalsdosen gemessen werden. Dadurch kam es nicht wie in den Versuchsreihen 1 bis 3 zu einer signifikanten Abkühlung während des Messvorganges.

Nach Abschluss des ersten Durchgangs wurden die Proben in der Kältekammer bei 6 °C gelagert, um sie schnell auf 22 °C abzukühlen. Dieser Vorgang dauerte etwa 45 Minuten. Mit Beendigung der zweiten Viskositätsbestimmung bei 22 °C wurden die Proben für 15 Minuten in die Gefrierkammer gestellt, um den Abkühlungsprozess zu beschleunigen, und anschließend nochmals für 15 Minuten in die Kältekammer. Ihre Temperatur sank dadurch auf 10 °C.

Nach weiteren 2 Stunden in der Kältekammer wurde die letzte Viskosität bei 8 °C ermittelt. Angestrebten waren 6 °C. Die Versuchsergebnisse sind in Abbildung 37 dargestellt:

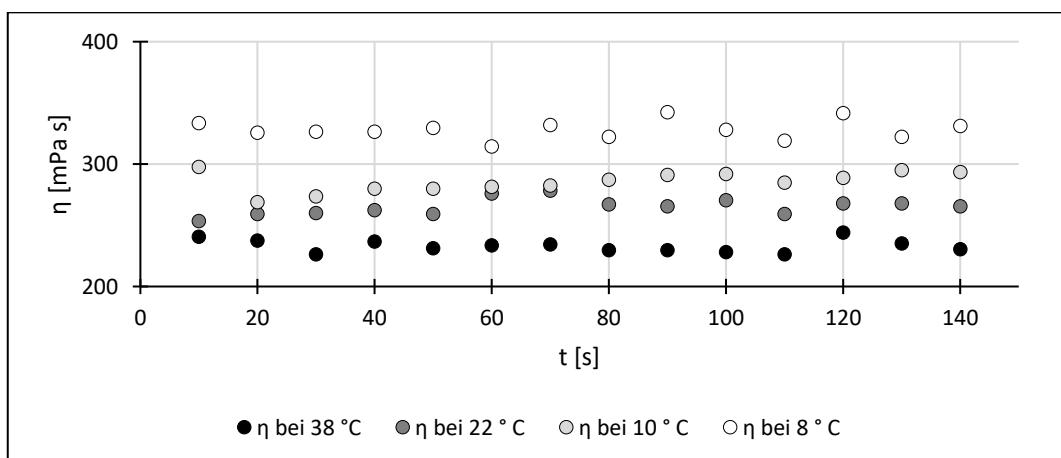


Abbildung 37: V5, Temperatureinfluss auf Mischprobe 3 bei vier Messungen an einem Tag

Zwar konnte der Temperatureinfluss wie erhofft nachgewiesen werden, allerdings erwies sich die gezielte Steuerung der Abkühlungsprozesse als schwierig. Die Proben mussten zur Kontrolle ihrer Temperaturen zwischendurch immer wieder aus der Kälte- bzw. Gefrierkammer entnommen werden, wodurch sie sich kurzzeitig erwärmtten. Eine eindeutige Anleitung dazu, wie lange eine Probe in der jeweiligen Kammer zu verbleiben hat, konnte nicht formuliert werden, da sich die beiden Mischproben – trotz gleichem Ausgangssubstrat und gleicher Fütterung – unterschiedlich schnell abkühlten.

Zusammenfassend ist es dennoch möglich, mehrere Messungen an einem Tag durchzuführen. Es setzt nur eine stetige Kontrolle der aktuellen Probentemperatur voraus und geht mit einem größeren Aufwand einher. Der Vorteil hingegen liegt eindeutig in der zeitlichen Unabhängigkeit der Messergebnisse.

5.3.6 Einfluss des Wirtschaftsdüngers

Der in Kapitel 3.2.2 beschriebene schäumende Effekt des Wirtschaftsdüngers Hühnertröckenkot konnte auch bei den Messungen in V6 nachgewiesen werden. Die untersuchten Mischproben entstammten zweier Fermentergruppen, die zusätzlich zur Maissilage mit diesem gefüttert wurde. Sowohl bei der Homogenisierung, als auch bei den Viskositätsmessungen bei verschiedenen Temperaturen zeichneten sich die Proben als die am stärksten schäumenden aus. Die am zweitstärksten Schaum generierenden waren jene, die Rinder Gülle aus der Biogasanlage enthielten. Allein die Mischproben aus den nur mit Mais bzw. Mais und Kohle versetzten Fermentern wiesen das geringste Schaumverhalten auf.

5.4 Zusammenfassung und Versuchsbeurteilung

Die Beeinflussung, die Pyrolysekohle auf den Biogasprozess ausübt, konnte anhand der Untersuchung von Viskosität und Schaumbildung über vier Versuchsreihen nachgewiesen werden. Sie erwies sich, wie von Beckmann in Neumann (2019) und dem Kohlehersteller Moola (2023) beschrieben, als viskositätsenkend und somit die Prozessbedingungen optimierend. Der Effekt wurde dabei am stärksten bei der Applikation von ca. 70 µm großen Nadelholzkohlepartikeln beobachtet. Des Weiteren zeigte der Einsatz von Pyrolysekohle eine entschäumende Wirkung bei der Durchführung von Viskositätsmessungen, wie sie auch von einigen Kohleherstellern wie der Beiselen GmbH (2022) oder der EGoS GmbH (2023) beschrieben wird.

Durch die abwechselnde Änderung der Parameter Gefrieren, Homogenisieren, Temperatur und Lagerdauer über insgesamt 30 Teilversuche konnten die Vor- und Nachteile der einzelnen Vorgehensweisen dokumentiert und anschließend folgende Versuchsanleitung für die Bestimmung der Viskosität von Gärsubstraten aufgestellt werden:

Vorgehen bei der Ermittlung der Viskosität von Gärsubstraten

1. Probennahme von mindestens 500 ml
2. Homogenisierung mit einem Mixer für 120 s bzw. bis Faserlänge \leq 5 mm
3. Umfüllung in ein verschließbares Gefäß mit ausreichender Breite und Höhe für die Viskositätsbestimmung (z. B. 500 ml Weithalsdose)
4. 24 h Lagerung vor der ersten Messung bei gewünschter Messtemperatur
5. Kurzes Aufrühren der Probe vor der Messung für ca. 15 s
6. Messdurchführung ohne Umfüllen direkt im Probengefäß
7. Falls weitere Messungen bei anderem T erwünscht: Lagerfristen möglichst kurz halten

Das Prinzip der Probenvorbehandlung mittels Homogenisierung war Voraussetzung für eine fehlerfreie Viskositätsbestimmung ohne Sedimentation oder Sink- und Schwimmschichten. Sie wurde daher auch von Jobst und Lincke in „Messmethodensammlung Biogas“ (2015) empfohlen. Ferner ermöglichte sie eine bessere Vergleichbarkeit verschiedener Teilproben sowie eine übersichtlichere statistische Auswertung. Es ist allerdings zu beachten, dass eine mechanisch homogenisierte Probe in ihren Fließeigenschaften stets von denen einer unbehandelten abweicht (Schneider und Gerber 2020). Aus diesem Grund bedarf es noch weiterer Forschung zur Beeinträchtigung der Viskosität durch die Probenvorbehandlung und vor allem eines genormten Verfahrens, um standardisierte Messungen an Gärsubstraten durchführen und miteinander vergleichen zu können.

Um größere Probenmengen, wie bspw. aus Biogasanlagen, ohne fortlaufende mikrobielle Aktivität bis zur Bestimmung der Viskosität lagern zu können, bietet sich das Einfrieren als mögliche Methode an. Es muss dabei allerdings beachtet werden, dass diese durch den Gefrier- und Auftauprozess gegenüber der Frischprobe geringer ausfällt. Da jene Art der Probenlagerung genau wie die Homogenisierung in keiner Literatur eindeutig beschrieben ist (Schneider und Gerber 2020), lassen sich die im Rahmen dieser Bachelorarbeit aufgenommenen Daten vorerst nicht vergleichen.

Ob eine Probe vor oder nach dem Einfrieren homogenisiert wurde, ist nach den hierfür vorliegenden Beobachtungen für die Ermittlung der Viskosität unerheblich. Mit Hinblick auf die

Untersuchung des Schaumverhaltens sollte die Homogenisierung jedoch erst nach dem Auftauen erfolgen, da dieses im Rahmen der hier aufgeführten Experimente bei vorheriger Behandlung fast verschwunden war.

Da die Viskosität von Gärsubstraten stark temperaturabhängig ist, sollte sie bei Fermenter-temperatur durchgeführt werden. Dies empfiehlt auch Koll (2012). Sollten mehrere Messungen bei verschiedenen Temperaturen erwünscht sein, müssen diese so schnell wie möglich durchgeführt werden, um eventuelle Einflüsse durch eine zu lange Lagerzeit auszuschließen. Des Weiteren sollte die Reihenfolge der Messungen gestaffelt anhand der Temperaturen erfolgen, bspw. von der höchsten zur niedrigsten.

5.5 Realisierbarkeit im Praxismaßstab

Dass die im Labormaßstab ermittelte Viskosität an vorher behandelten und zerkleinerten Proben nicht derjenigen entspricht, die sich in einer Biogasanlage einstellt, ist absehbar. Dennoch bietet sie grundlegende Einblicke in das Fließverhalten von Biomasse unter dem Einfluss verschiedener Temperaturen und Kohlezugaben. Die Hersteller verschiedener Bio-kohlen haben sich auf deren Einsatz in Fermentern spezialisiert, in den letzten Jahren ihr Sortiment verfeinert und bieten je nach Anlagentyp und Eintragspfad spezifische Pyrolyse-kohlen an. Zertifikate und Herstellerversprechen garantieren die Reinheit der Kohlen sowie einen messbaren Erfolg in der Prozessführung. Auch wenn die Kohle selbst nicht zu einer Erhöhung der Methanausbeute beiträgt, so verbessert sie dennoch die Umweltbedingungen für die Mikroorganismen und den verfahrenstechnischen Ablauf (Zimmermann u. a. 2021).

6. Fazit

Zur Beurteilung der Wirkung von Kohleapplikation im Biogasprozess liegen bereits mehrere Studien vor, wenngleich der genaue Mechanismus bisher unbekannt ist (Zimmermann u. a. 2021). In dieser Bachelorarbeit konnte eine Verflüssigung von Gärgemischen durch die Zugebung von Holzkohle nachgewiesen werden. Ferner wurde bei der Probendurchmischung ein abnehmendes Schaumverhalten im Vergleich zu herkömmlicher Biomasse beobachtet.

Die Viskosität ist folglich ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Fließverhaltens von Biomasse im Fermenter und hinsichtlich der Bildung von schadhaftem Schaum von großer Relevanz für Anlagenbetreiber.

Es existiert jedoch bisher nur wenig Fachliteratur, die sich ausführlich mit der Bestimmung der Viskosität von Gärsubstraten auseinandersetzt (Schneider und Gerber 2020). Des Weiteren gibt es noch keine genormten Vorgaben zur Versuchsdurchführung und zur Vorbehandlung von Biomasse im Labor (Koll 2012). Die im Rahmen dieser Arbeit aufgestellte Anleitung wurde nach dem Ausscheidungsprinzip erstellt und vereint jene Arbeitsschritte in sich, die bei den Experimenten am leichtesten durchführbar waren. Es bedarf aber weiterer Forschung zur Beeinflussung der Viskosität durch den Gefrierprozess und die mechanische Homogenisierung.

Bei der Betrachtung der verschiedenen Substrate zeigte sich insbesondere bei dem Wirtschaftsdünger Hühnertrockenkot eine starke Tendenz zur Schaumbildung. Der Beitrag von Protein- und TM-Gehalt zum Schäumen ist bereits in anderen Studien wie von Kliche und Lebuhn (2023) untersucht worden, ebenso die Ammoniumstickstoffbindung durch Pyrolysekohle.

Für zukünftige Forschungsprojekte wäre es daher interessant, die genauen Reaktionsmechanismen der Pyrolysekohle zu betrachten, bspw. in Gegenwart hoch proteinhaltiger Substrate oder im sauren Milieu.

Dass der weltweite Ausbau der Biogasanlagen und -kapazitäten sinnvoll ist, ist vor dem Hintergrund der aktuellen klimatischen, ressourcetechnischen und politischen Gegebenheiten auch nach den Vereinten Nationen (2023) offensichtlich. Die vermehrte Nutzung von Wirtschaftsdünger und weiteren biogenen Reststoffen ist ein wichtiger Schritt in eine nachhaltigere und effizientere Zukunft mit geschlossenen Nährstoffkreisläufen, in der keine Ackerfläche allein für den Anbau von Energiepflanzen genutzt werden muss.

VII. Literaturverzeichnis

ATB Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. 2014. „Kohle-Doping für Biogasanlagen: Mit Biokohle zu höheren Gaserträgen“. *Forschung für Nachhaltigkeit | FONA*. <https://www.fona.de/de/kohle-doping-fuer-biogasanlagen> (10. Mai 2023).

Beiselen GmbH. 2022. „Pflanzenkohle Beratung 2022“. https://oeko-logisch.beiselen.de/wp-content/uploads/sites/25/Beiselen_Eigenmarkenflyer_Pflanzenkohle_Wickelfalz_0222_RZ_INT.pdf.

BMEL Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. 2022. „Biogas“. *BMEL*. <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/bioekonomie-nachwachsende-rohstoffe/biogas.html> (2. Juni 2023).

Bundesregierung Deutschland. 2022. „Gesetzentwurf der Bundesregierung - Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor“. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/04_EEG_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (21. Juni 2023).

Carbuna AG. 2023a. „CARBUNA Pflanzenkohle“. CARBUNA. <https://carbuna.com/> (10. Mai 2023).

———. 2023b. „Pflanzenkohle und zertifizierte Kohlenstoffsenken“. CARBUNA. <https://carbuna.com/pages/zertifizierte-kohlenstoffsenken> (10. Mai 2023).

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum u. a. 2015. „Messmethodensammlung Biogas - Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich“. 7. https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/4_AGs_Methoden/07_Messmethodensamm_Biogas_web.pdf (4. April 2023).

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2003a. „DIN 1342-1: 2003-11 Viskosität - Teil 1: Rheologische Begriffe“.

———. 2003b. „DIN 1342-2: 2003-11 Viskosität - Teil 2: Newtonsche Flüssigkeiten“.

———. 2003c. „DIN 1342-3: 2003-11 Viskosität - Teil 3: Nicht-newtonsche Flüssigkeiten“.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2001. „DIN 53019-2: 2001-02: Viskosimetrie - Messung von Viskositäten und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern - Teil 2: Viskosimeterkalibrierung und Ermittlung der Messunsicherheit“.

———. 2008a. „DIN 53019-1: 2008-09: Viskosimetrie - Messung von Viskositäten und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern - Teil 1: Grundlagen und Messgeometrie“.

———. 2008b. „DIN 53019-3: 2008-09: Viskosimetrie - Messung von Viskositäten und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern - Teil 3: Messabweichungen und Korrekturen“.

Dudek, Marta u. a. 2019. „The Effect of Biochar Addition on the Biogas Production Kinetics from the Anaerobic Digestion of Brewers' Spent Grain“. (12). <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/8/1518> (21. Juni 2023).

EGoS GmbH. 2023. „Pflanzenkohle und Zeolith in Biogasanlagen – mehr Methan, weniger Kosten“. <https://www.pflanzenkohle24.de/Pflanzenkohle-Landwirtschaft/Biogas-Pflanzenkohle/> (5. Juli 2023).

Fetzer Rohstoffe + Recycling GmbH. 2023. „Pflanzenkohle für Biogas“. <https://www.moola-pflanzenkohle.de/produkte/pflanzenkohle-fuer-biogas> (9. Mai 2023).

FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2022. „Substrateinsatz in Biogasanlagen“. *FNR: Mediathek*. <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/biogas/substrateinsatz-in-biogasanlagen.html> (26. Juni 2023).

- . 2023a. „Biogas: EEG 2021- Neuer Rahmen für Biogasanlagen“. *Biogas: Rahmenbedingungen*. <https://biogas.fnr.de/rahmenbedingungen/eeg-2021> (26. Juni 2023).
- . 2023b. „Wirtschaftsdünger: Hintergrund“. *Biogas aus Wirtschaftsdüngern*. <https://wirtschaftsduenger.fnr.de/hintergrund> (26. Juni 2023).

Friedrich-Schiller-Universität Jena. 1994. „Versuchsanleitung: Viskosimetrie“. <https://www.chemgeo.uni-jena.de/chegemedia/ituc/praktikum/viskosimetrie.pdf> (17. Mai 2023).

- IKA-Werke GmbH & Co. KG. 2023a. „Betriebsanleitung O-DINS-1“. <https://www.ika.com/de/Produkte-LabEq/Viskosimeter-pg279/O-DIN-S-1-25000326/Downloads-cpdl.html> (22. April 2023).
- . 2023b. „Betriebsanleitung Rotastand“. <https://www.ika.com/de/Produkte-LabEq/Viskosimeter-pg279/IKA-ROTAVISC-SBS-me-vi-Complete-10007714/Downloads-cpdl.html> (22. April 2023).
- . 2023c. „Betriebsanleitung ROTAVISC“. <https://www.ika.com/de/Produkte-LabEq/Viskosimeter-pg279/IKA-ROTAVISC-SBS-me-vi-Complete-10007714/Downloads-cpdl.html> (22. April 2023).
- . 2023d. „Datenblatt O-DINS-1“. <https://www.ika.com/de/Produkte-LabEq/Viskosimeter-pg279/O-DIN-S-1-25000326/Downloads-cpdl.html> (22. April 2023).
- . 2023e. „Datenblatt ROTAVISC me-vi“. <https://www.ika.com/de/Produkte-LabEq/Viskosimeter-pg279/IKA-ROTAVISC-SBS-me-vi-Complete-10007714/Downloads-cpdl.html> (22. April 2023).
- . 2023f. „Datenblatt SP set-2“. <https://www.ika.com/de/Produkte-LabEq/Viskosimeter-pg279/SP-set-2-25000329/Downloads-cpdl.html> (22. April 2023).
- . 2023g. „Technische Informationen O-DINS-1“. <https://www.ika.com/de/Produkte-LabEq/Viskosimeter-pg279/O-DIN-S-1-25000326/Downloads-cpdl.html> (22. April 2023).
- . 2023h. „Technische Informationen SP set-2“. <https://www.ika.com/de/Produkte-LabEq/Viskosimeter-pg279/SP-set-2-25000329/Downloads-cpdl.html> (22. April 2023).

Kaltschmitt, Martin, Hans Hartmann, und Hermann Hofbauer, hrsg. 2016. *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://link.springer.com/10.1007/978-3-662-47438-9> (5. April 2023).

- Kliche, Robert, und Michael Lebuhn. 2023. „Schaum in Biogasanlagen“. *Biogas Forum Bayern* 3(19). https://www.biogas-forum-bayern.de/De/Fachinformationen/Prozessbiologie/ursachen-folgen-massnahmen_SchauminBiogasanlagen.html (3. April 2023).
- Koll, Christian. 2012. „Aufnahme, Auswertung und Beurteilung rheologischer Parameter zur Auslegung und Simulation von Fördereinheiten sowie Rühraggregaten in Biogasanlagen“. <https://serwiss.bib.hs-hannover.de/frontdoor/deliver/index/docId/386/file/ma-koll-2012.pdf> (15. Mai 2023).
- Krzack, Steffen, Heiner Gutte, und Bernd Meyer. 2018. *Stoffliche Nutzung von Braunkohle*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kumar, Manish u. a. 2021. „A Critical Review on Biochar for Enhancing Biogas Production from Anaerobic Digestion of Food Waste and Sludge“. *Journal of Cleaner Production* 305: 127143.
- Meyer-Kohlstock, Daniel u. a. 2016. „Biochar as Additive in Biogas-Production from Bio-Waste“. *Energies* 9(4): 247.
- Mezger, Thomas G. 2016. *Das Rheologie Handbuch*. 5. Aufl. Hannover: Vincentz Network.
- Moeller, Lucie, Andreas Zehnsdorf, Daniela Thrän, und Diana Pfeiffer. 2015. „Schaumbildung in Biogasanlagen“. https://www.openagrар.de/receive/dim-port_mods_00001713 (5. April 2023).
- Neumann, Hinrich. 2019. „So wirkt Pflanzenkohle im Fermenter“. *top agrar online*. <https://www.topagrар.com/heftplus/so-wirkt-pflanzenkohle-im-fermenter-10574455.html> (19. April 2023).
- PHK – Polymertechnik GmbH. 2019. „Technisches Datenblatt Nerolit ® 100 HT 10 µm Absorberkohle“.
- Postma, Nils. 2023. „Hof Postma - Marktschwärmer“. *Hof Postma - Marktschwärmer*. <https://marktschwaeamer.de/de-DE/producers/49332> (22. April 2023).
- Radusch, Hans-Joachim. 2022. „Rotationsrheometer – Lexikon der Kunststoffprüfung“. *Polymer Service GmbH Merseburg*. <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Rotationsrheometer#SEARLE-Messprinzip> (16. Mai 2023).
- Schneider, Nico, und Mandy Gerber. 2020. „Rheological Properties of Digestate from Agricultural Biogas Plants: An Overview of Measurement Techniques and Influencing Factors“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 121: 109709.
- Thiering, Jochen, und Enno Bahrs. 2011. „Biogasproduktion in Deutschland – Sollte die energetische Nutzung von Wirtschaftsdünger explizit gefördert werden?“ (4). <https://www.gjae-online.de/de/articles/biogasproduktion-in-deutschland-sollte-die-energetische-nutzung-von-wirtschaftsdunger-explizit-gefördert-werden/> (1. April 2023).
- Türk, M., und R. Deckert. 1990. „Rheologische Eigenschaften von Faulschlamm nach anaeroben Fermentation von Gülle im Biogasreaktor“. *agrartechnik* 40(10). //440ejournals.uni-hohenheim.de/index.php/agrartechnik/article/view/3413 (3. April 2023).

Umweltbundesamt. 2023. „Wirtschaftsdünger“. *Umweltthesaurus UMTHES*. https://sns.uba.de/umthes/en/concepts/_00048201.html (29. Juni 2023).

Vereinte Nationen. 2023. „SDG 7“. *Vereinte Nationen - Regionales Informationszentrum für Westeuropa*. <https://unric.org/de/17ziele/sdg-7/> (16. Mai 2023).

Zimmermann, Benedikt u. a. 2021. „Pflanzenkohle zur Steigerung des Methanertrags in Biogasanlagen: Abschlussbericht“. https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-34932_01-Hauptbericht.pdf (20. Januar 2023).

VIII. Anhang

Tabelle 7: Untersuchung der Auswirkungen der Kohleadaptions: V1, Viskositätsmessung bei 21 °C

Probe blanko	Probe Kohle 10 µm	Probe Kohle 70 µm
Geöffnete Probe 1 Tag nach der Homogenisierung		
		
Nach dem Aufrühren		
		
Nach der Messung		
		

Tabelle 8: Untersuchung der Auswirkungen der Kohleadaptation: V1, Viskositätsmessung bei 36 °C

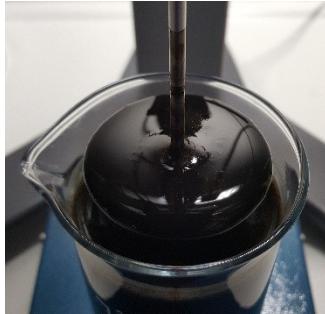
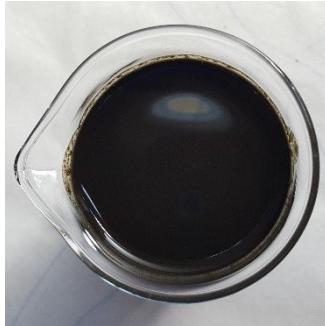
Probe blanko	Probe Kohle 10 µm	Probe Kohle 70 µm
Geöffnete Probe 1 Tag nach der Messung bei 21 °C		
		
Nach dem Aufrühren		
		
Nach der Messung		
		

Tabelle 9: Untersuchung der Auswirkungen der Kohleadaptation: V1, Viskositätsmessung bei 7 °C

Probe blanko	Probe Kohle 10 µm	Probe Kohle 70 µm
Geöffnete Probe 4 Tage nach der Messung bei 36 °C		
		
Nach dem Aufrühren		
		
Nach der Messung		
		

7. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Rostock, 21.07.2023

Elisa Deuß