



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Jan Hendrik Koch

Untersuchung der rheologischen Eigenschaften nicht-newtonscher Medien mittels eines dafür auszulegenden Apparates mit Ausblick auf die Optimierung eines Wärmeüberträgers einer Biogasanlage

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Jan Hendrik Koch

**Untersuchung der rheologischen
Eigenschaften nicht-newtonscher Medien
mittels eines dafür auszulegenden Apparates
mit Ausblick auf die Optimierung eines
Wärmeüberträgers einer Biogasanlage**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelor-/Masterprüfung

im Studiengang Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

FFE Solutions GmbH
Abteilung Biogas
Kolberger Straße 13
24589 Nortorf

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Erik Kuhn
Zweitprüfer/in: Dr. Ing. Thomas Flower

Abgabedatum: 04.10.2016

Zusammenfassung

Jan Hendrik Koch

Thema der Bachelorthesis

Untersuchung der rheologischen Eigenschaften nicht-newtonscher Medien mittels eines dafür auszulegenden Apparates mit Ausblick auf die Optimierung eines Wärmeübertragers einer Biogasanlage

Stichworte

Rheologie, Viskosität, Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeübertrager, spezifische Wärmekapazität

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die Auslegung mehrere Apparate für die Bestimmung von Stoffgrößen, die für die Auslegung eines Wärmeübertragers einer Biogasanlage relevant sind. Die ermittelten Werte werden beurteilt und als Grundlage für die Berechnung eines Wärmeübertragers genutzt.

Des Weiteren werden die bei den Messungen, aufgetretenen Komplikationen erläutert und Lösungen vorgeschlagen.

Title of the paper

Study of the rheological properties of non-Newtonian medium with a designed and built apparatus with outlook to the optimization of a heat exchanger of a biogas plant

Keywords

Rheology, viscosity, density, thermal conductivity, heat exchangers, specific heat capacity

Abstract

This work includes the design of several devices for the determination of material quantities that are relevant to the design of a heat exchanger of a biogas plant. The measured values are evaluated and used as a basis for the calculation of a heat exchanger.

Furthermore, the, during the measurements encountered complications are discussed and solutions proposed.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Einheiten	iv
Nomenklatur	vi
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung	2
2 Grundlagen	3
2.1 Biogastechnik	3
2.1.1 Allgemein	3
2.1.2 Wärmeübertrager	6
2.1.3 Rührwerke	7
2.1.4 Pumpen	9
2.2 Rheologie	10
2.2.1 Thixotropie	13
2.3 Verfahrenstechnische Größen	13
2.3.1 Trockenrückstand	13
2.3.2 Dichte	14
2.3.3 Spezifische Wärmekapazität	14
2.3.4 Wärmeleitfähigkeit	15
2.3.5 Viskosität	15
3 Material und Methoden	16
3.1 Probenherkunft	16
3.1.1 Biogasanlage Gnutz	16
3.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	17
3.2.1 Bestimmung des Trockenrückstands	18
3.2.2 Bestimmung der Dichte	19

3.2.3	Bestimmung der spezifische Wärmekapazität	21
3.2.4	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	24
3.2.5	Bestimmung der Viskosität	29
4	Ergebnisse und Diskussion	35
4.1	Trockenrückstand	35
4.1.1	TR-Gehalt von Maissilage/Gülle Suspension	35
4.1.2	TR-Gehalt von Rezirkulat	37
4.1.3	TR-Gehalt von Rindergülle	38
4.2	Dichte	38
4.2.1	Dichte von Maissilage/Rindergülle Suspension	38
4.2.2	Dichte von Rezirkulat	40
4.2.3	Dichte von Rindergülle	41
4.3	Spezifische Wärmekapazitätsmessung	43
4.3.1	Spezifische Wärmekapazität von Wasser	43
4.3.2	Spezifische Wärmekapazität von Rindergülle	45
4.3.3	Spezifische Wärmekapazität von Maissilage gemischt mit Rindergülle . . .	47
4.3.4	Spezifische Wärmekapazität von Rezirkulat	49
4.4	Wärmeleitfähigkeit	52
4.4.1	Wärmeleitfähigkeit von Rezirkulat	52
4.5	Viskosität	53
4.5.1	Viskosität von Rindergülle	54
4.5.2	Viskosität von Maissilage gemischt mit Rindergülle	57
4.5.3	Viskosität von Rezirkulat	59
5	Auslegung eines Wärmeübertragers	61
5.1	Berechnung Doppelrohrwärmeübertrager mit Erfahrungswerten	62
5.2	Berechnung Doppelrohrwärmeübertrager mit ermittelten Werten	69
6	Zusammenfassung	71

7	Ausblick	73
A	Anhang	78
B	Eidesstattliche Erklärung	96

Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	SI-Einheit	Bezeichnung
a	$m^2 s^{-1}$	Fläche
A	m^2	Fläche
c_p	$J kg^{-1} K^{-1}$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
C_k	$J K^{-1}$	Kalorimeterkonstante
C	–	Anlagenkonstante
d	mm	Durchmesser
D	m	Durchmesser
f	–	Umrechnungsfaktor
F	N	Kraft
H	m	Höhe
h	m	Höhe
I	A	Strom
l	mm	Länge
m	kg	Masse
n	$1 min^{-1}$	Umdrehung
oTR	%	organischer Trockenrückstandgehalt
P	W	Leistung
Q	J	Wärme
R	–	Bestimmtheitsmaß
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
TR	%	Trockenrückstandgehalt
U	V	Sapnnung
v	$m s^{-1}$	Geschwindigkeit
V	m^3	Volumen
W	J	Wärmeenergie
X	m	charakteristische Länge

Symbole	SI-Einheit	Bezeichnung
α	$m^2 s$	Wärmeleitfähigkeit
$\dot{\gamma}$	s^{-1}	Schergeschwindigkeit
η	$m Pa s$	dynamische Viskosität
ϑ	$^{\circ}C$	Temperatur
λ	$W m^{-1} K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
ρ	$kg m^{-3}$	Dichte
Θ	–	kalorische Mitteltemperatur

Indizes		
0	–	Unendlich
1	–	Anfang/Eintritt
2	–	Ende/Austritt
<i>a</i>	–	Außen, Wirkzeit, Medium a
<i>b</i>	–	Medium b
<i>el</i>	–	elektrisch
<i>Fl</i>	-	Fluid
<i>i</i>	–	Innen
<i>m</i>	–	Mittel
<i>M</i>	-	vermischt
<i>R</i>	–	Rand
<i>red</i>	–	Reduzierung (Abnahme)
<i>u</i>	–	Umgebung
<i>w</i>	–	Wasser
<i>Z</i>	-	Zentrum
τ	–	Ruhephase

Nomenklatur

BGA	Biogasanlage: Eine Anlage in der aus einem organischem Material Biogas gewonnen wird.
BHKW	Blockheizkraftwerk: Ein BHKW ist eine Anlage zur Gewinnung Elektrischer- und Wärmeenergie (Kraft-Wärme-Kopplung)
FU	Frequenzumrichter: Ein Frequenzumrichter ist ein Elektronisches Bauteil, welches die vom Versorgungsnetz eingespeiste Frequenz in eind andere umwandelt. Dies hat eine sich ändernde Drehzahl zur folge.
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe: Z.B. Mais oder Stroh
oTS	organische Trockenrückstand: Der organische Trockenrückstand ist der Teil einer Substans der nach dem Verbrannen der Substans übrig bleibt.
TR	Trockenrückstand: Der Trockenrückstand ist der Teil einer Substans, der nach vollständiger Verdampfung des Wassers, übrig bleibt.
Wü	Wärmeübertrager

Abbildungsverzeichnis

2.1	Regeneratives Energieangebot in der Erdatmosphäre, links primäre Energieströme und rechts sekundäre Energieströme (grau hinterlegt ist der Pfad der Biomasse) [20, S. 32]	4
2.2	Schema des kombinierten Durchfluss-Speicher-Verfahren [13, S. 24]	5
2.3	Zentralrührwerk mit Antrieb [27]	9
2.4	links Exzentrerschneckenpumpen des Herstellers Wangen [26], rechts Kreiselpumpe des Herstellers KSB [22]	10
2.5	Zwei-Platten-Modell [24, S. 19]	11
2.6	Einflussgrößen auf das Fließverhalten [21, S.12]	12
2.7	Thixotropes Verhalten eines Fluids, mit Definition der Wirkzeit t_a und der Ruhephase t_r [4, S. 31]	13
3.1	BGA Gnutz [14]	17
3.2	Fließschema BGA Gnutz	17
3.3	Tiegel mit Trockenrückstand (links vor, in der Mitte während und rechts nach der Trocknung (andere Probe))	19
3.4	Messkolben zum bestimmen der Dichte	20
3.5	Schematischer Versuchsaufbau Kalorimeter	21
3.6	Kalorimeter (1: Spannungsversorgung, 2: Multimeter, 3: Behälter mit Probe, 4: Rührer, 5: Thermometer	22
3.7	Schematischer Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	25
3.8	Versuchsaufbau mit Probe	26
3.9	Graphische Darstellung der Abhängigkeit $Ne = f(Re)$	30
3.10	Blatt-Rührrheometer mit Motor, Getriebe und Drehzahlmesser	31
3.11	Viskosimeter Behälter im Schnitt	32
3.12	Maissilage und Rindergülle im Viskosimeter	33
4.1	relative Abweichung je Probe der Maissilage/Gülle Suspension	37
4.2	Abweichungen gemessener Dichten von Maissilage gemischt mit Rindergülle	39

4.3	Zusammenhang zwischen Dichte und TR-Gehalt	42
4.4	Zerkleinerte Rindergülle im Kalorimeter	46
4.5	Maissilage gemischt mit Rindergülle	48
4.6	Temperaturunterschied im Kalorimeter nach Beendigung des Versuches (Links: Position des Tauchsieders, Mitte: unmittelbar unterhalb des Tauchsieders, Rechts: 4cm neben dem Tauchsieder	49
4.7	Temperaturverlauf von Rezirkulat mit deutlichen Temperatursprung (rote Mess- punkte)	50
4.8	Kalorimeter mit Rezirkulat	51
4.9	Tauchsieder mit angebranntem Rezirkulat	51
5.1	Größen am Doppelrohrwärmeübertrager	62
A.1	Diagramme Instationären Wärmeleitung Zylinder	95

Tabellenverzeichnis

3.1	Substrate und Behälter	17
3.2	Technische Daten Messkolben	20
4.1	Versuchswerte TR-Gehalt Maissilage/Gülle	36
4.2	Versuchswerte TR-Gehalt Rezirkulat aus Gnutz	37
4.3	Versuchswerte TR-Gehalt reine Rindergülle	38
4.4	Versuchswerte Dichtemessung von Maissilage gemischt mit Rindergülle	39
4.5	Versuchswerte Dichtemessung von Rezirkulat	40
4.6	Versuchswerte Dichtemessung von Rezirkulat Gnutz/Sønderjysk	41
4.7	Versuchswerte $c_{p,w,1}$	43
4.8	Ergebnisse für die Bestimmung der Viskosität von Rindergülle	56
4.9	Ergebnisse für die Bestimmung der Viskosität von Maissilage gemischt mit Rindergülle	58
4.10	Ergebnisse für die Bestimmung der Viskosität von Rezirkulat	60
5.1	Stoffwerte zur Wärmeübertragerauslegung	61
5.2	Werte Wärmeübertragerauslegung	63
5.3	Wert aus der Rechnung für den konzentrischen Ringspalt	67
5.4	Iterationsschritte zur Berechnung der Doppelrohrlänge mit „Erfahrungswerten“	68
5.5	Werte Wärmeübertragerauslegung	69
5.6	Iterationsschritte zur Berechnung der Doppelrohrlänge mit Messwerten	71
A.1	Messwerte Kalorimeter (Wasser) Versuch 1	78
A.2	Messwerte Kalorimeter (Wasser) Versuch 2	79
A.3	Messwerte Kalorimeter (Wasser) Versuch 3	80
A.4	Messwerte Kalorimeter Gülle (nicht zerkleinert) Versuch 1	81
A.5	Messwerte Kalorimeter Gülle (nicht zerkleinert) Versuch 2	82
A.6	Messwerte Kalorimeter Gülle (nicht zerkleinert) Versuch 3	83
A.7	Messwerte Kalorimeter Gülle (zerkleinert) Versuch 1	84
A.8	Messwerte Kalorimeter Gülle (zerkleinert) Versuch 1	85

A.9 Messwerte Kalorimeter Gülle (zerkleinert) Versuch 1	86
A.10 Messwerte Kalorimeter Maissilage gemischt mit Rindergülle	87
A.11 Messwerte Kalorimeter Rezirkulat	88
A.12 Reynolds- und Newton-Zahl Werte nach Zlokarnik	89
A.13 Messwerte Wärmeleitfähigkeit Rezirkulat Versuch 1	90
A.14	90
A.15 Messwerte Wärmeleitfähigkeit Rezirkulat Versuch 3	90
A.16 Messwerte Viskosimeter Hydraulik Öl	91
A.17 Messwerte Viskosimeter Maissilage-Gülle-Gemisch Versuch 1	91
A.18 Messwerte Viskosimeter Maissilage-Gülle-Gemisch Versuch 2	91
A.19 Messwerte Viskosimeter Maissilage-Gülle-Gemisch Versuch 3	92
A.20 Messwerte Viskosimeter Rindergülle Versuch 1	92
A.21 Messwerte Viskosimeter Rindergülle Versuch 2	92
A.22 Messwerte Viskosimeter Rindergülle Versuch 3	93
A.23 Messwerte Viskosimeter Rezirkulat Versuch 1	93
A.24 Messwerte Viskosimeter Rezirkulat Versuch 2	93
A.25 Messwerte Viskosimeter Rezirkulat Versuch 3	94

1 Einleitung

Der Bedarf an elektrischer Energie wird in der heutigen Zeit immer größer. Hierdurch bedingt und durch den immer kritischeren Blick auf den Emissionsausstoß werden die regenerativen Energien stets attraktiver. Die Biogastechnik spielt in dieser Entwicklung eine große Rolle.

Daher ist in der heutigen Zeit eine bestmögliche Auslegung der in einer Biogasanlage vorhandenen Apparate und Komponenten aufgrund der steigenden Kosten zunehmend bedeutsam. Vornehmlich im Ausland werden weiterhin neue Anlagen gebaut und die Anlagenbauer benötigen valide Stoffdaten [1]. Die für eine Auslegung von z. B. Wärmeübertrager relevanten Stoffwerte, wie die Dichte, die spezifische Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit und die Viskosität der in einer Biogasanlage vorkommenden Substrate sind bislang nur unzureichend genau oder gar nicht bekannt [16]. Grund hierfür ist, dass es sich nicht um Reinstoffe handelt, die einfach zu untersuchen sind, oder vielfach in der Industrie untersuchte Gemische, sondern um Gemische, die in Ihren einzelnen Komponenten bisher nicht häufig untersucht worden sind. Es sind bisher nur sehr wenige und mit sehr aufwendigen Versuchsaufbauten gemessene rheologische Werte für Biogas-Substrate verfügbar [21]. Dies kann zu einer fehlerhaften Dimensionierung der Komponenten und somit zu erhöhten Investitions- und Betriebskosten führen. Einfach zu messen ist hingegen der Trockenrückstand. Es werden im Rahmen dieser Arbeit Methoden vorgestellt, die es erlauben Werte für die gesuchten Stoffdaten über einen Zusammenhang mit dem Trockenrückstand zu ermitteln. Hierfür wurde in der Literatur nach geeigneten Messverfahren gesucht. Für die Umsetzung dieser Messverfahren wurden diverse Versuchsaufbauten angefertigt für die unter anderem Apparate angefertigt werden mussten.

Der Trockenrückstand wird nach der DIN EN 12880 in einem Wärmeofen bestimmt. Für die Bestimmung der Dichte ist die Wägemethode gewählt worden. Die spezifische Wärmekapazität wird mithilfe eines dafür gefertigten Kalorimeters bestimmt. Um die Wärmeleitfähigkeit eines Substrats zu bestimmen, wird die Theorie der instationären Wärmeleitung und ein entsprechender Versuchsaufbau verwendet. Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass die Bestimmung der Viskosität nicht mit am Markt vorhandener Messtechnik möglich ist. Grund hierfür sind die mit Fasern und Stückchen behafteten Substrate. Es ist daher in der Literatur nach einem geeigneten

und dennoch einfachen Messverfahren gesucht worden. Zur Anwendung ist ein hochskaliertes Rührrheometer gekommen. Im Einzelnen werden die Versuche in Kapitel 3.2 beschrieben.

Um den Einfluss der Stoffwerte auf die Investitionskosten darzulegen, ist im Anschluss eine beispielhafte Auslegung eines Wärmeübertragers mit verschiedenen Stoffwerten durchgeführt worden.

1.1 Aufgabenstellung

Im Umfang dieser Arbeit gilt es die rheologischen Eigenschaften von Biogas fähigen Substraten zu untersuchen. Ferner soll die Auswirkung der verschiedenen Stoffwerte auf die Auslegung eines Wärmeübertragers dargestellt werden. Hierzu werden diese mit geeigneten Messverfahren bestimmt und bewertet. Anschließend wird der erhebliche Einfluss der Viskosität auf die Dimensionierung eines Wärmeübertragers anhand der Materialkosten aufgezeigt werden.

Die bestehende Aufgabenstellung kann im Laufe der Arbeit erweitert oder eingekürzt werden.

2 Grundlagen

2.1 Biogastechnik

Im folgenden Kapitel ist die Herkunft des Biogases zusammenfassend erläutert. Des Weiteren sind einige der auf einer Biogasanlage vorhandenen Komponenten erwähnt.

2.1.1 Allgemein

Es gibt drei grundsätzliche primäre Energieströme auf der Erde. Diese setzen sich aus der Plattengravitation und -bewegung, aus denen resultiert die Gezeitenenergie, der Erdwärme und der Sonnenenergie zusammen [20, S. 32]. Die von der Sonne eingestrahelte Energie hat dabei den größten Anteil [20]. Aus diesen drei Quellen werden innerhalb der Erdatmosphäre viele verschiedene Energieströme hervorgerufen wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist. So ist die Biomasse eine umgewandelte Form der Sonnenenergie [20]. Hier wird der Prozess der Photosynthese genutzt, bei dem die Sonnenenergie in organisches Material umgewandelt wird. Das organische Material wird wiederum in einer Biogasanlage (BGA) fermentiert und so Biogas erzeugt. Ein entscheidender Vorteil der Nutzung des organischen Materials zur Gewinnung von Biogas als Energieträger ist es, dass keine direkte Kopplung an vorherrschenden Umweltbedingungen vorhanden ist. Bei der Windkraft kann nur Energie erzeugt werden, wenn lokal Windenergie vorhanden ist. Die solarthermische Energiegewinnung ist ebenso an die lokale Sonneneinstrahlung gebunden [20].

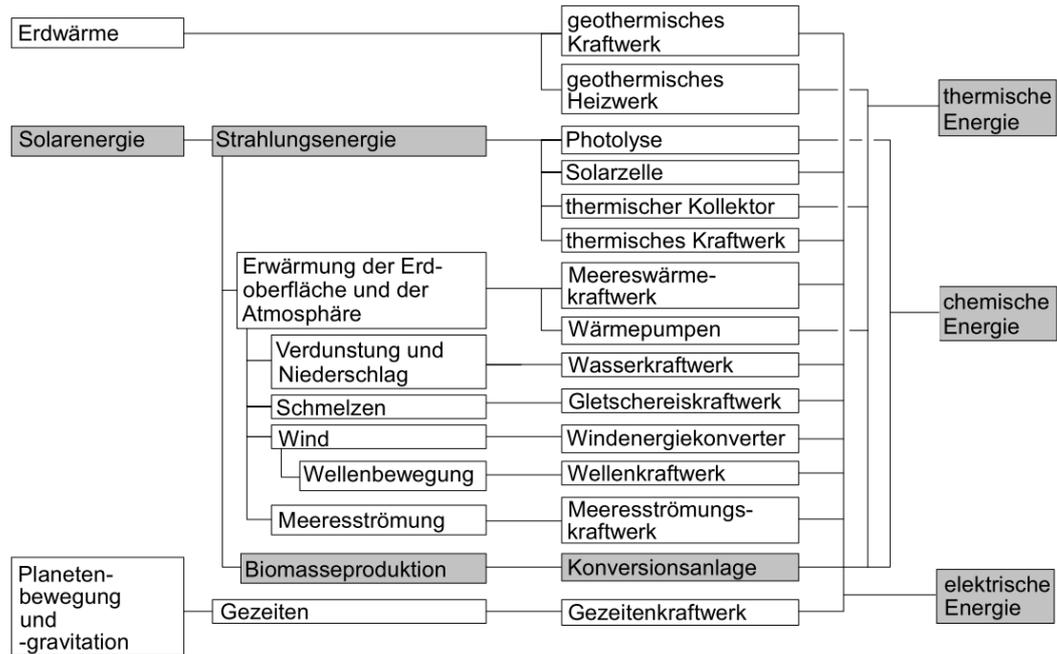


Abbildung 2.1: Regeneratives Energieangebot in der Erdatmosphäre, links primäre Energieströme und rechts sekundäre Energieströme (grau hinterlegt ist der Pfad der Biomasse) [20, S. 32].

Das organische Material wird je nach Beschaffenheit des Materials über verschiedene Eintragungssysteme in die BGA gefördert. Die Grundkomponenten einer BGA sind bei der quasikontinuierlichen Beschickung und dem kombinierten Durchfluss-Speicher-Verfahren eine Vorgrube, ein Fermenter und ein Gärrückstandslager. Unter der quasikontinuierlichen Beschickung wird verstanden, dass mindestens ein einmal am Arbeitstag eine unvergorene Menge organischem Material in die BGA eingebracht wird. Des Weiteren gibt es die diskontinuierliche und die kontinuierliche Beschickung. Bei der diskontinuierlichen Beschickung wird der Fermenter einmal vollständig mit frischem organischem Material für die Vergärung gefüllt. Dieses verbleibt für die gewählte Verweilzeit¹ im Fermenter. Anschließend wird dieser geleert und mit neuem Material gefüllt. Bei der kontinuierlichen Beschickung wird in die BGA kontinuierlich Material eingebracht und folglich kontinuierlich wieder entnommen [13]. Abbildung 2.2 zeigt das Schema einer BGA mit dem kombinierten Durchfluss-Speicher-Verfahren. Dieses Verfahren entspricht dem Stand der Technik. Der Gasspeicher ist nicht zwingend erforderlich, die höheren Investitionskosten für den Gasspeicher auf dem Gärrückstandslager lassen sich aber durch den höheren Gasertrag refinanzieren [13].

¹ Die Verweilzeit ist die Zeit, die das Substrat im Fermenter verbleibt.

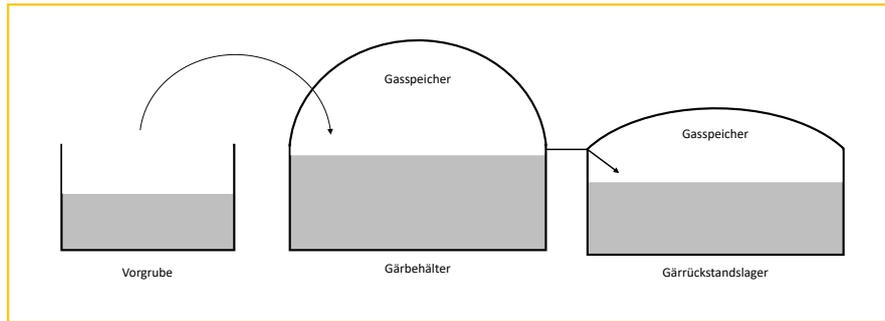


Abbildung 2.2: Schema des kombinierten Durchfluss-Speicher-Verfahrens [13, S. 24]

Unabhängig von der Art der Anlage, wird das organische Material in einer BGA fermentiert und so Biogas erzeugt. In den zuvor erwähnten Anlagentypen kommt es zu einem anaeroben Gärungs- und Fäulnisprozess [20]. Es bauen ausschließlich Bakterien das organische Material in einem sauerstofffreiem Milieu ab und setzen dabei das Biogas frei [20]. Wie schnell Biogas entstehen kann, ist vornehmlich von den verwendeten organischen Materialien abhängig. Des Weiteren nimmt der gewählte Temperaturbereich in dem die methanbildenden Mikroorganismen, die in den Substraten in einer BGA vorhanden sind, Einfluss auf die gasproduktions Geschwindigkeit. Es wird hier zwischen einer psychophilen-, mesophilen, und thermophilen Fahrweise unterschieden [3]. Die optimale Temperatur für psychrophile Mikroorganismen ist unterhalb 25°C , aber mit einer sehr geringen Gasausbeute verbunden und daher meist unwirtschaftlich [13]. Der Temperaturbereich der mesophilen Mikroorganismen liegt zwischen 37°C und 42°C . Diese Prozessführung ist durch die relativ hohe Gasausbeute und gute Prozessstabilität weit verbreitet [13]. Der thermophile Bereich findet häufig Anwendung, wenn dem Fermenter ein Hygienisierungbehälter vorangestellt ist. Eine Hygienisierung wird vorgenommen, wenn hygienisch bedenkliche Stoffe in die BGA eingebracht werden sollen². Der Temperaturbereich liegt zwischen 50°C und 60°C . Es wird durch die höhere Prozesstemperatur eine höhere Abbaugeschwindigkeit und eine niedrigere Viskosität erreicht [20]. Dies impliziert jedoch einen höheren Energiebedarf und einen empfindlicheren Gärprozess [13].

Das erzeugte Biogas wird in nachgeschalteten Prozessen in andere Energiearten umgewandelt.

² In Deutschland ist entweder der bedenkliche Teilstrom oder der Vollstrom, der in die BGA gefördert wird, für eine Stunde auf 70°C zu erwärmen, um die vorhandenen gesundheitsschädlichen Keime oder Bakterien abzutöten.

Diese können wie in Abbildung 2.1 zu erkennen ist, thermische, chemische oder elektrische Prozesse sein. Neben dem erzeugten Biogas bleibt ausgefaultes Material übrig, welches aus der Anlage entfernt werden muss, um einen quasi konstanten Füllstand in den Behältern zu gewährleisten. In der Biogastechnik wird das ausgefaulte Material Gärrest genannt. Diese Gärreste werden auf die Substrat liefernden Ackerflächen zurückgeführt und schließen so den Nährstoffkreis. Gärreste werden als organische Dünger genutzt und stehen den Wirtschaftsdüngern in keinem nach. Es müssen die Richtlinien der Düngemittelverordnung beachtet werden [13]. Je nach verwendeten Eingangsmaterial variieren die Möglichkeiten der Verarbeitung der Gärreste [13].

Pumpen, Zerkleinerer, Rührwerke, Feststoffdosierer, Wärmeübertrager, Ventile und Messtechnik gehören neben den Behältern zu den Komponenten, die in einer BGA verwendet werden [13]. Die Auslegung der Wärmeübertrager, Rührwerke und Pumpen ist nicht trivial, da sie stark von den Eigenschaften des vorhandenen Substrats abhängen. Diese Eigenschaften sind vorrangig die Viskosität η , die spezifische Wärmekapazität c_p , die Wärmeleitfähigkeit λ und die Dichte ρ . Speziell der Wärmeübertragungsprozess hängt stark von diesen Stoffwerten ab. In Kapitel 5 wird eine Kostenanalyse eines Wärmeübertrages bei verschiedenen Stoffwerten diskutiert. Die Bestimmung dieser Werte ist aufgrund der schwierigen Gemische aus zum Beispiel Gülle und anderen Kofermenten³ nicht einfach. Solche Gemische haben ein thixotropes Verhalten und sind somit nichtnewtonsche Flüssigkeiten [29].

Die rheologischen Eigenschaften beschreiben das Verhalten von nichtnewtonschen Flüssigkeiten [24]. Im Zusammenhang mit den in der Biogasanlagentechnik verwendeten Komponenten ist die für die Auslegung relevante Viskosität bislang nur unzureichend bekannt [29]. Um einen Überblick der Wichtigkeit einer genauen Bestimmung der Viskosität zu bekommen, werden im Nachfolgenden die drei Komponenten vorgestellt, bei denen die Viskosität einen großen Einfluss in der Dimensionierung und somit in der Wirtschaftlichkeit hat [7].

2.1.2 Wärmeübertrager

Wärmeübertrager sind Apparate in denen thermische Energie von einem Medium in ein Zweites übertragen wird. Sie unterscheiden sich in der Art der Wärmeübertragung zwischen, direkter

³ Kofermente sind Stoffe, fest oder flüssig, die unter Bestimmen Voraussetzungen in einer Biogasanlage Biogas (Methan) produzieren können [13].

oder indirekter aber ferner in der halbindirekten⁴ Wärmeübertragung. Zusätzlich wird die Strömungsart zwischen Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom unterschieden [17].

Wärmeübertrager haben in einer BGA verschiedene Aufgaben. Grundsätzlich ist ihnen die Aufgabe der Wärmeeinbringung zugeschrieben. Sie können außerdem zum Zweck der Wärmerückgewinnung genutzt werden. Unabhängig vom Temperaturbereich der jeweiligen Anlage, muss die Temperatur des Substrats in den Fermentern in dem jeweiligen Temperaturbereich gehalten werden, um einen stabilen Prozess zu gewährleisten. Hier zu wird das Rezirkulat⁵ durch die Wärmeübertrager gepumpt. Des Weiteren gilt es, die Wärmeverluste der Behälter und Rohrleitungen zu decken, ebenso wie das Aufheizen von frisch eingebrachtem Substrat oder das Aufheizen des Substrats einer Hygienisierung.

Es gibt eine Reihe verschiedener Möglichkeiten den Wärmeübertrager auszuführen. Es kann entweder ein Wärmeübertrager in Form eines Doppelrohres, Doppelhelix oder Rohrbündelwärmeübertragers verwendet werden. In landwirtschaftlichen Anlagen kommen ebenso mit Rohrschlangen beheizte Behälter zum Einsatz. Die Rohrschlangen sind dann meist an der Behälterinnenwand montiert [20]. Plattenwärmeübertrager sind im Bereich der Substraterwärmung nicht einsetzbar, da sie typischerweise sehr geringe Abstände, sowie viele enge Umlenkungen zwischen den einzelnen Platten haben. Laut *Holger Martin* sind 4 mm als Spaltweite zwischen den Platten ein gängiges Maß[23]. Diese würden sich mit den im Substrat vorhandenen Fasern und Stückchen schnell zusetzen und eine zuverlässige Einbringung der Wärme durch eine Reduzierung des Massenstroms verhindern. Abbildung des in Sonderjysk verwendeten Rohrbündelwärmeübertragers sind einige Wärmeübertrager zu sehen.

2.1.3 Rührwerke

Die Aufgaben eines Rührwerks werden in fünf Grundoperationen unterteilt [33]:

- Homogenisieren
- Suspendieren

⁴ Das zu erwärmende bzw. abkühlende Medium wird Zeitversetzt mit einem Wärmespeicher in Kontakt gebracht.

⁵ Als Rezirkulat wird das Substrat einer BGA bezeichnet, wenn es z. B. für die Wärmeeinbringung durch einen Wärmeübertrager gepumpt wird.

- Dispergieren
- Begasen
- Wärmeübertragung

Rührwerke sind in einer BGA ein wichtiger Bestandteil, da eine Durchmischung im Fermenter zwingend erforderlich ist. Es würde ansonsten zu der Bildung von Schwimm- oder Sinkschichten kommen [20]. Die Rührwerke übernehmen insbesondere folgende Aufgabe [32]:

- Vermischung des biologisch aktiven Materials mit dem frisch in den Behälter geförderten Material
- das gleichmäßige Einbringen des durch die Rezirkulation aufgewärmten Substrats
- Vermeidung der Ausbildung von Schwimmschichten bzw. das Zerstören gebildeter Schwimmschichten
- ein gutes Ausgasen des Biogases aus dem Substrat

Neben der mechanischen Rührtechnik gibt es die hydraulische Vermischung mittels Pumpen und die pneumatische Vermischung. Bei der pneumatischen Vermischung wird Biogas in das im Fermenter vorhandene Substrat eingeblasen. Die beiden Letzten werden nicht weiter erwähnt, da in Deutschland ca. 85 % bis 90 % der Anlagen mechanisch durchmischt werden [13].

Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen mechanischen Rührwerken. Abbildung 2.3 zeigt beispielhaft ein Zentralrührwerk, welches in Hochfermentern der Firma FFE Soloutins GmbH verwendet wird.



Abbildung 2.4: links Exzentrerschneckenpumpen des Herstellers Wangen [26], rechts Kreiselpumpe des Herstellers KSB [22]

2.2 Rheologie

Mezger beschreibt die Rheologie als die Lehre von der Deformation und Fließen der Substanzen [24]. Sie wird erst seit dem 20. Jahrhundert als eine eigenständige Wissenschaft angesehen [24]. Das Fließen eines Körpers oder einer Flüssigkeit, ebenso wie die Deformation dieser Beiden, resultiert aus Kräften, Auslenkungen und Geschwindigkeiten [24]. Diese sind alles Größen der Mechanik, daher ist die Rheologie ein Teilgebiet der Physik [vgl. 24].

Ein Viskoser sowie ein elastischer Anteil ist in allen realen Substanzen vorhanden. Dieses Verhalten wird viskoelastisch genannt [24]. Tapetenkleister zum Beispiel ist eine viskoelastische Flüssigkeit und ein Radiergummi ist ein viskoelastischer Festkörper [24]. Wenn die durch Kräfte und Auslenkungen verursachten Scherkräfte groß genug sind, führen diese bei vielen Substanzen zum Fließen oder zur Deformation [24]. Deformationen sind jedoch nur bei Festkörpern zu finden. Festkörper spielen in dieser Arbeit keine Rolle und werden daher nicht weiter betrachtet.

Es lassen sich die grundlegenden rheologischen Parameter am Zwei-Platten-Modell (Abbildung 2.5) veranschaulichen.

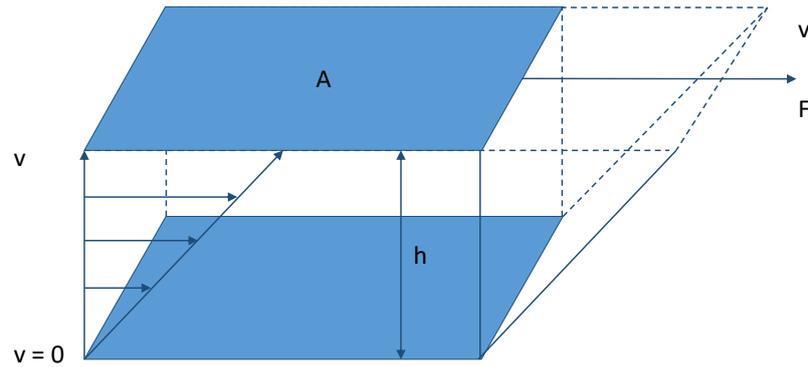


Abbildung 2.5: Zwei-Platten-Modell [24, S. 19]

Die untere Platte ist nicht beweglich, wobei sich die obere Platte mit der Fläche A und dem Abstand h zur unteren Platte mit der Kraft F parallel verschieben lässt. Die für die Bewegung benötigte Kraft wird Scherkraft genannt [24]. Zusätzlich wird unter den folgenden Bedingungen die Geschwindigkeit v der Platte gemessen:

- Es besteht Wandhaftung zwischen der Probe und den beiden Platten
- Es herrscht eine laminare Strömung (die einzelnen Fluidebenen bewegen sich parallel zu einander und Verwirbeln nicht) und keine turbulente Strömung

Die beschriebenen Bedingungen sind nur in einem engen Messspalt zu finden und lassen dann wie folgt die Beschreibung der rheologischen Parameter zu [24].

Die Schubspannung τ ist die Beziehung zwischen der Kraft F und der Fläche A auf die die Kraft wirkt Gl. 2.1.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Die Schubspannung hat die SI-Einheit Pascal [Pa] [24].

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ ist der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit v und dem Plattenabstand h . Siehe Gl.2.2.

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad (2.2)$$

Die SI-Einheit der Scherrate ist $[\frac{1}{s}]$ [24].

Aus den Größen der Schubspannung und der Scherrate lässt sich die Scherviskosität oder die dynamische Viskosität bestimmen [24]. Sie ist nach Gl. 2.3 definiert.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.3)$$

Die Viskosität hat die SI-Einheit $[mPas]$ [24]. Es wird der in einer Flüssigkeit durch die Reibungskräfte der einzelnen Fluidschichten auftretenden Fließwiderstand beschrieben [24]. Sie kann durch Division mit der Dichte in die kinematische Viskosität umgerechnet werden. Die kinematische Viskosität wird anders als die dynamische Viskosität, welche häufig mit Rotations- oder Oszillation Viskosimetern bestimmt wird, mit Auslaufbechern, Kapillar-Viskosimetern und Kugelfall-Viskosimetern bestimmt [24].

Abbildung 2.6 zeigt einige der Faktoren, die das Fließverhalten, der in einer BGA verwendeten Substrate, beeinflussen.

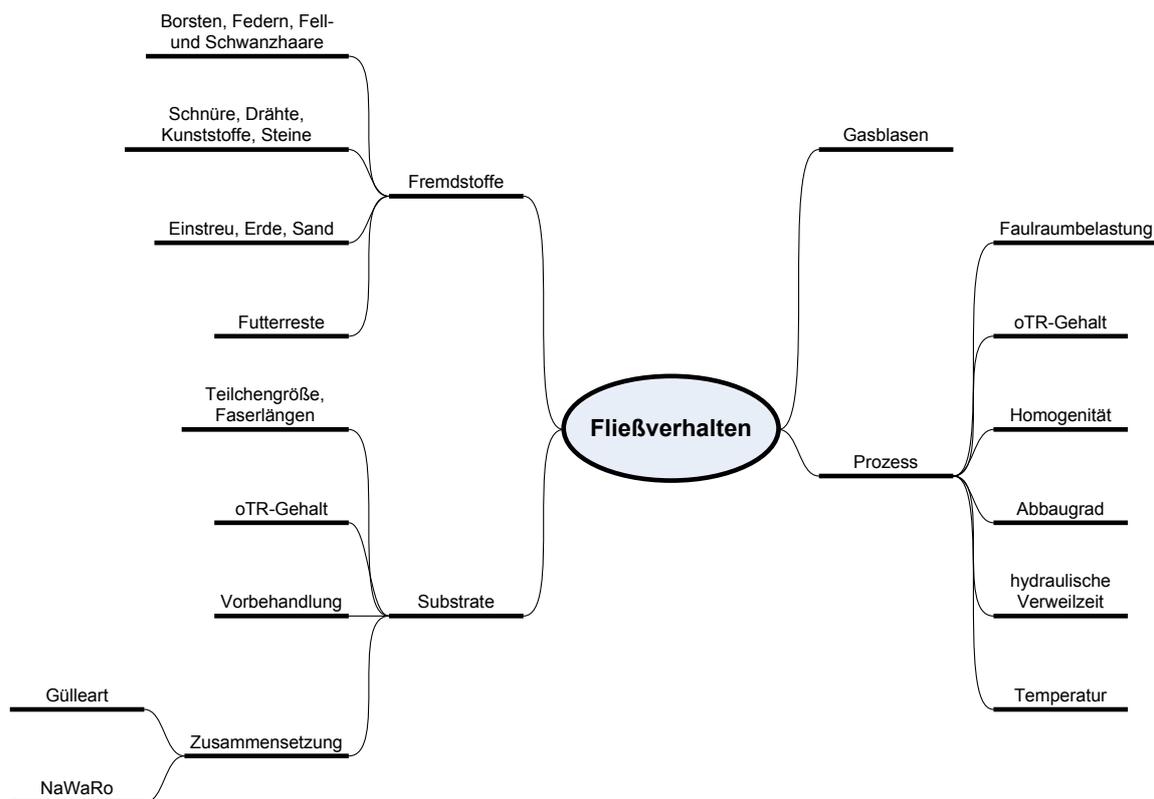


Abbildung 2.6: Einflussgrößen auf das Fließverhalten [21, S.12]

In verschiedenen Werken wie [8] und [31] wird angegeben, dass Rindergülle ein thixotropes Verhalten aufweist. In Abschnitt 2.2.1 wird das thixotrope Verhalten erläutert.

2.2.1 Thixotropie

Ein Fluid hat ein thixotropes Verhalten, wenn die Viskosität während einer Scherbelastungsphase bei einer konstanten Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ in der Einwirkzeit t_a sinkt und nach einer nachfolgenden Ruhephase t_r wieder seine ursprüngliche Viskosität annimmt [24]. In Abbildung 2.7 ist dieses Verhalten eines thixotropen Fluides dargestellt. „Dieser Abbau-/Wiederaufbau-Zyklus ist ein vollständig reversibler Vorgang“ [24, S. 63]. Von *Mezger* werden unter anderem Suspensionen als Beispiele für thixotrope Substanzen genannt [24].

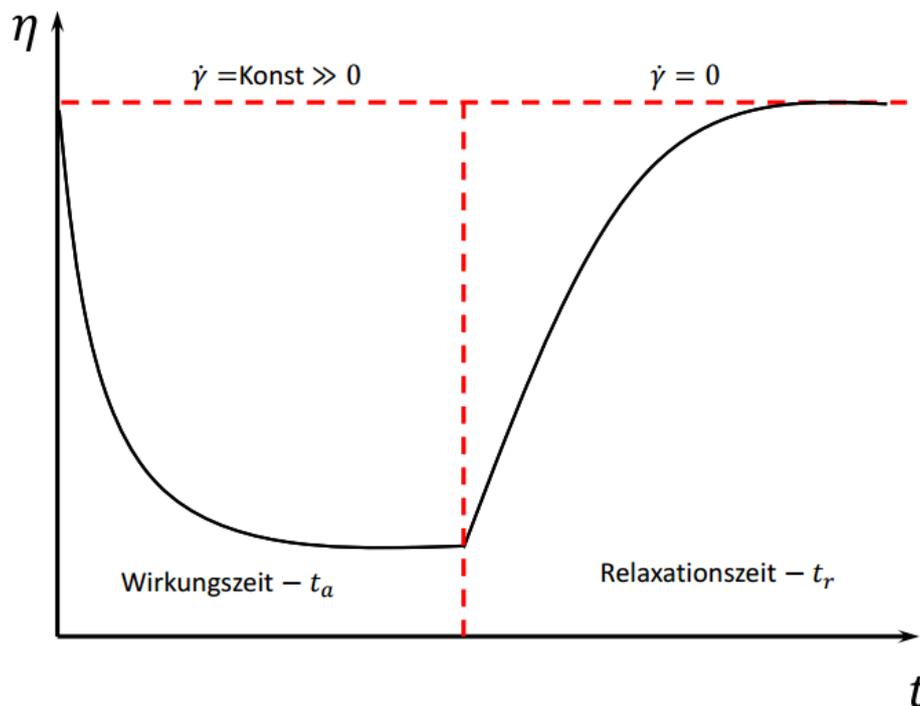


Abbildung 2.7: Thixotropes Verhalten eines Fluids, mit Definition der Wirkzeit t_a und der Ruhephase t_r [4, S. 31]

2.3 Verfahrenstechnische Größen

Im Folgenden sind die für diese Arbeit verfahrenstechnisch relevante Größen genannt und ihr Einfluss ist beschrieben.

2.3.1 Trockenrückstand

Der Trockenrückstand (TR) eines Stoffes ist die enthaltene Masse an fester Substanz, die nach einem festgelegten Trocknungsverfahren übrig bleibt. Der TR-Gehalt wird in der Biogastechnik

zur Charakterisierung der verschiedenen Substrate verwendet. Über den TR-Gehalt kann unter anderem eine Aussage über die Pumpfähigkeit des Substrates getroffen werden. Je nach Art des Substrats gilt als Faustregel, dass ein Substrat pumpfähig ist, so lange der TR-Gehalt $< 15\%$ ist [13]. Bei Substraten mit einer sehr feinen Partikelverteilung kann die Pumpfähigkeit noch bei 20% TR-Gehalt vorliegen. Dahingegen sind Substraten wie Obst und Gemüseschalen bei einem TR-Gehalt von $10\% - 12\%$ bereits stapelbar [13]. Da der TR-Gehalt eine einfach zu bestimmende Größe ist, wird dieser genutzt um die Eigenschaften der in einer BGA genutzten Suspensionen als Funktion des Trockenrückstands darzustellen. Neben dem TR-Gehalt kann der organische Trockensubstanz Gehalt (oTR-Gehalt) bestimmt werden. Dieser wird durch Verbrennung der getrockneten Probe bestimmt und dient als Grundlage zur Bestimmung der Gasausbeute [2].

2.3.2 Dichte

Die Dichte ρ ist der Quotient aus der Masse m und dem Volumen V einer Stoffportion [9, S. 1]. Sie wird in SI-Einheit als $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ angegeben [25].

2.3.3 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität c nach Gleichung 2.4 ist der Proportionalitätsfaktor, der beschreibt wie viel Energie einem Stoff pro Kilogramm zugeführt werden muss, um diesen um ein Kelvin zu erwärmen [12].

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta \vartheta} \quad (2.4)$$

Die zugehörige SI-Einheit lautet $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$ [10].

Die spezifische Wärmekapazität kann entweder auf konstanten Druck oder auf das konstante Volumen bezogen werden [10]. Für die wirtschaftliche und effiziente Auslegung aller wärmetechnischen Prozesse ist eine ausreichend genaue bestimmte spezifische Wärmekapazität des jeweiligen Substrats maßgebend.

2.3.4 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes wird durch den Proportionalitätsfaktor λ beschrieben und beschreibt wie gut dieser Wärme leitet. Die Wärmeleitfähigkeit findet Anwendung in der Berechnung der Wärmeleitung, sowie in der Berechnung dimensionslosen Kennzahlen. Diese werden für die Auslegung verfahrenstechnischer Apparate und Wärmeübertrager benötigt. Die Wärmeleitfähigkeit ist eine Stoffkonstante und kann für viele Stoffe in der Literatur nachgeschlagen werden. Die in einer BGA vorkommenden Substrate sind in der Literatur nur unzureichend oder gar nicht beschrieben [29].

Die SI-Einheit der Wärmeleitfähigkeit lautet $[\frac{W}{m \cdot K}]$ [25].

2.3.5 Viskosität

Die zwischen den Fluidschichten auftretenden Reibungskräfte und der daraus resultierende Fließwiderstand kann als Viskosität η beschrieben werden [24]. Je größer die Viskosität ist, umso „dickflüssiger“ ist ein Fluid, umgekehrt ist ein Fluid bei einer geringen Viskosität „dünnflüssig“. Die Viskosität hat großen Einfluss auf den Druckverlust in Rohrleitungen. Dies wird in einer beispielhaften Wärmeübertrager Auslegung verdeutlicht.

Die SI-Einheit für die Viskosität lautet $[mPas]$ [30].

3 Material und Methoden

Im Folgenden werden die einzelnen Versuche dieser Arbeit vorgestellt. Ferner wird erläutert wie sie durchgeführt werden und welche Materialien für den Versuchsaufbau verwendet worden sind. Des Weiteren ist zu Beginn erwähnt aus welcher BGA die Proben für die einzelnen Versuche beschafft worden sind.

3.1 Probenherkunft

Die Proben stammen aus einer der Firma FFE Solutions GmbH nahegelegenen BGA. Es ist reine Rindergülle, Maissilage und Rezirkulat entnommen worden. Die Anlage wird im Folgenden erläutert.

3.1.1 Biogasanlage Gnutz

Die BGA Gnutz ist eine große landwirtschaftliche Anlage, in der Gülle und nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) wie Maissilage oder Grassilage vergärt werden und eine Trocknung der Gärreste vorgenommen wird. In Abbildung 3.1 sind zwei der Behälter und der Gärresttrockner zu sehen. Die Anlage ist im Jahr 2006 durch die Firma FFE Solutions GmbH geplant und erbaut worden. In der Tabelle 3.1 ist ein Überblick über die gefütterten Substrate und Behälter gegeben. Wie in Abbildung 3.2 gezeigt ist, wird aus dem produzierten Biogas, in einem Verbrennungsprozess in einem BHKW thermische und elektrische Energie gewonnen. Die elektrische Energie wird in das kommunale Stromnetz eingespeist. Die thermische Energie hingegen wird für die Heizsysteme und die Trocknung der Gärreste genutzt.

Komponente	Wert	Einheit
Rindergülle	7.300	t/a
Maissilage	10.300	t/a
Substrat	Σ 17.600	t/a
Behälter		
Fermenter	3.200	m ³
Nachgärer	3.000	m ³
Gärrestelager	5.600	m ³
Installierte Leistung	800	kW _{el.}



Abbildung 3.1: BGA Gnutz [14]

Tabelle 3.1: Substrate und Behälter

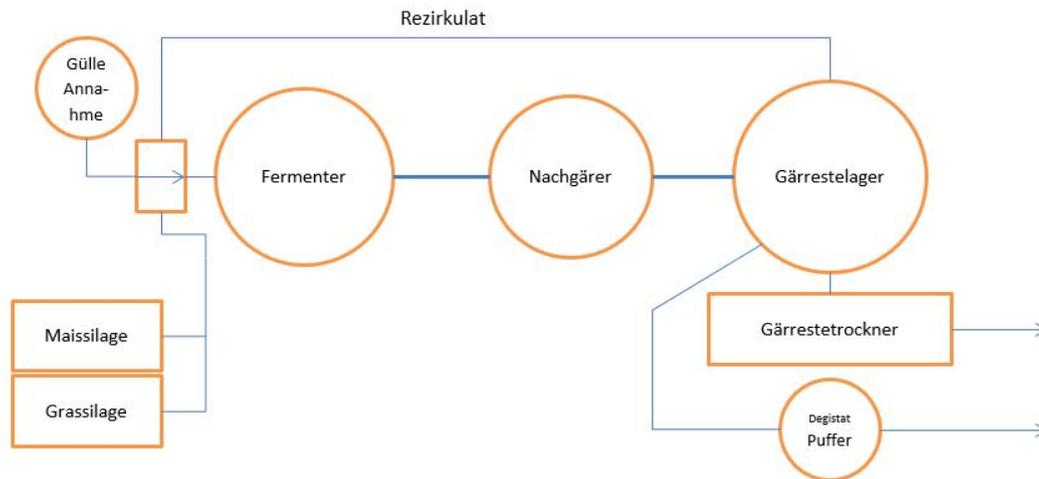


Abbildung 3.2: Fließschema BGA Gnutz

3.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Im Nachfolgenden ist beschrieben, wie die einzelnen relevanten Größen bestimmt worden sind. Hierzu werden die jeweiligen Verfahren beschrieben und das zur Hilfe genommene Equipment erläutert. Für die Versuche der Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität, der Wärmeleitfähigkeit und der Viskosität sind Apparate gefertigt worden. Der jeweilige Aufbau wird ebenfalls erwähnt.

3.2.1 Bestimmung des Trockenrückstands

Nach der DIN EN 12880 wird der TR-Gehalt wie folgt bestimmt: Es wird ein leerer Tiegel mit einem Glasstab für mindestens 30 *min* bei 105 °C in einen Wärmeschrank (Typ: Memmert, UM 100) gestellt und erwärmt. Ein anschließendes wie in der DIN beschriebenes Abkühlen in einem Exsikkator konnte nicht durchgeführt werden, da kein Exsikkator vorhanden ist. Der aufgrund des nicht verwendeten Exsikkators hervorgerufenen Messfehlern, kann nicht beurteilt werden. Die Abkühlung wäre notwendig, da durch die aufsteigende Wärme des Tiegels das Messergebnis verfälscht wird. Die Abkühlung in einem Exsikkator soll ein erneutes Anlagern von Feuchtigkeit verhindern. Nach 30 Minuten wird der Tiegel (m_a) auf 1 *mg* gewogen. Nun muss in Abhängigkeit des erwarteten TR-Gehalts so viel Substrat in den Tiegel eingewogen werden, so das die enthaltene Trockenmasse mindestens 0,5 *g* beträgt [11]. Anders ist es bei inhomogenen Substanzen, wie Gülle/Maissilage Suspensionen. Hier empfiehlt *Martin Apelt* 200 *g* bis 250 *g* in den Tiegel einzuwiegen [2]. Nach DIN EN 12880 wird empfohlen mit dem eingewogenen Glasstab die Oberfläche, wenn ein Verbacken während der Trocknung einsetzt aufzubrechen, um eine einwandfreie Verdampfung des Wassers und somit eine komplette Trocknung sicherzustellen [11]. Die DIN besagt, dass der Tiegel so lange im Wärmeschrank verbleibt, bis die Probe trocken erscheint und Massenkonstanz erreicht ist. Wenn die Masse des Tiegels, vor und nach einem Wiegen, um nicht mehr als 0,5 % oder 2 *mg* vom vorhergehenden Wert abweicht wird die Masse des Trockenrückstandes als konstant angesehen [11]. Andernfalls wird die Trocknung wiederholt, bis Massenkonstanz erreicht ist [11]. Der Trockenrückstand wird in $\left[\frac{kg}{kg}\right]$, $\left[\frac{g}{g}\right]$ oder in [%] angegeben und nach Gleichung (3.1) berechnet [11].

Dabei ist:

- w_{dr} der Trockenrückstand der Schlammprobe, in Prozent oder in Gramm je Kilogramm
- m_a die Masse der leeren Schale oder des Tiegels, in Gramm
- m_b die Masse der Schale oder des Tiegels mit der Schlammprobe, in Gramm
- m_c die Masse der Schale oder des Tiegels mit der Trockenmasse des Schlammes, in Gramm
- f der Umrechnungsfaktor, $f = 100$ für die Angabe der Ergebnisse in % [vgl. 11, S. 4]

$$w_{dr} = \frac{(m_c - m_a)}{(m_b - m_a)} \cdot f \text{ [%]} \quad (3.1)$$

Der TR-Gehalt der verschiedenen Proben wird nach Gl. 3.1 bestimmt. Abbildung (3.3) zeigt exemplarisch eine Probe vor, während und nach dem Versuch. Diese ist, um das Verdunsten des Wassers ermöglichen zu können aufgebrochen worden und anschließend zur weiteren Trocknung wieder in der Wärmeschrank gestellt worden. Proben mit einem hohem TR-Gehalt tendieren zu einem Verbacken. Grund sind die vielen Stückchen und Fasern in der Suspensionen, die leicht eine Schicht bilden können, die die noch nasse Suspension abdeckt.



Abbildung 3.3: Tiegel mit Trockenrückstand (links vor, in der Mitte während und rechts nach der Trocknung (andere Probe))

3.2.2 Bestimmung der Dichte

Um die Dichte eines Stoffes bestimmen zu können, gibt es nach *Hoffmann* mehrere Möglichkeiten, welche sich für Gase, Feststoffe und Flüssigkeiten unterscheiden [vgl. 18].

Bei der in dieser Arbeit verwendeten Methode, handelt es sich nach *Hoffmann* um die Wägemethode [vgl. 18]. Bei der Wägemethode werden die Masse und das Volumen eines Stoffes bestimmt. Die Masse der Probe kann mit einer Feinwaage (Sartorius LC6200 Waage MasterClass Serie - Laboratory Scale) bestimmt werden. Um das Volumen von Fluiden zu bestimmen, werden diese in ein Messbehälter gefüllt [vgl. 18]. Bei dem für die Bestimmung des Volumens verwendeten Messkolben, handelt es sich um einen Standard Messkolben. Die Technischen Daten des verwendeten Messkolbens sind in Tabelle (3.2) niedergeschrieben.

<i>Merkmal</i>	<i>Größe</i>
V	250 ml ($\vartheta = 25^\circ C$)
m_{Kolben}	86,41 g
<i>Toleranz</i>	$0,15 \pm \text{ml}$

Tabelle 3.2: Technische Daten Messkolben

Berechnet wird die Dichte nach der Gl. 3.2.

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (3.2)$$

Die in einer BGA vorkommenden Substrate lassen sich, da sie sehr Stückchen und Fasern behaftet sind, nicht oder nur sehr schlecht in einen Messkolben einfüllen. Daher sind sie mit einem Fleischwolf zerkleinert worden. Ob dies einen Einfluss auf das Messergebnis des Volumens bzw. der Dichte hat kann nicht beurteilt werden, da ein genaues Ablesen des Füllstandes wie in Abbildung 3.4 zu sehen ist, nicht möglich gewesen ist. Der verwendete Messkolben hat ca. 7 cm unterhalb der Einfüllöffnung eine Markierung die zum Ablesen des Füllstandes dient, diese ist aufgrund der Verschmutzung im Einfüllhals des Messkolbens nicht erkennbar gewesen.



Abbildung 3.4: Messkolben zum bestimmen der Dichte

Um trotzdem eine Einschätzung der Dichte abgeben zu können ist ein Zylindrischer Behälter zur Bestimmung der Dichte genutzt worden. Dieser ist komplett mit der jeweiligen Probe gefüllt worden. Das Volumen ist aufgrund der geometrischen Abmessungen zu $V = 0,00134 \text{ m}^3$

bestimmt worden. Die auf diese Art bestimmte Dichte wird als Schüttgutdichte bezeichnet⁶.

3.2.3 Bestimmung der spezifische Wärmekapazität

Die Wärmekapazität ist anhand einer Versuchsbeschreibung des Karlsruher Institut für Technologie durchgeführt worden [vgl. 19]. Analog zu dem in der Versuchsbeschreibung verwendeten Dewargefäß ist ein Behälter gefertigt worden der mit einer 10 cm dicken Isolierung versehen wurde. Des Weiteren ist ein Tauchsieder (12 Volt, 120 Watt) als Energiequelle und ein Laborthermometer um die Temperatur zu messen, genutzt worden. Um ein gleichmäßiges Einbringen der Wärme durch den Tauchsieder zu gewährleisten, wurde ein Rührer verwendet. Die Leistungsaufnahme des Tauchsieders ist über die Messung der Spannung und des Stroms nach Gleichung 3.3 durchgeführt worden.

$$P_{el} = U \cdot I [W] \quad (3.3)$$

Der schematische Versuchsaufbau ist in Abbildung (3.5) zu sehen. Abbildung (3.6) zeigt den gefertigten Apparat nach einem Versuch.

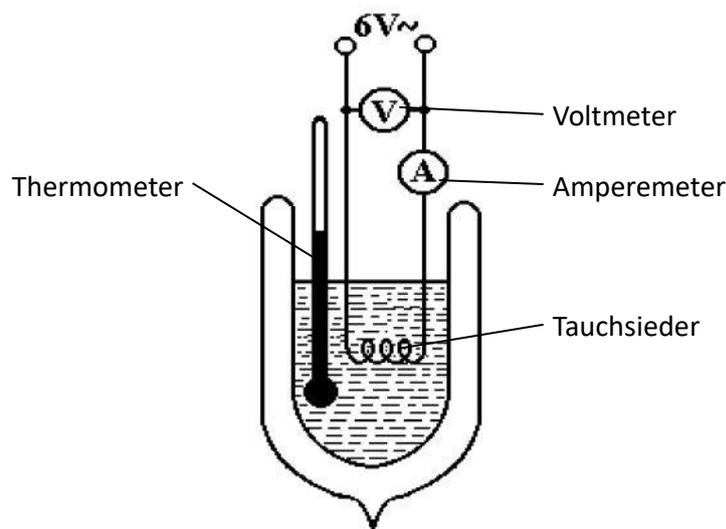


Abbildung 3.5: Schematischer Versuchsaufbau Kalorimeter

⁶ Die auf das Gesamtvolumen bezogene Masse eines Systems heißt Schüttgutdichte. Sie setzt sich aus der Dichte des Feststoffes und der Dichte des Hohlraum ausfüllenden Fluids zusammen [vgl. 28]. Das Fluid kann auch Luft sein [vgl. 28].



Abbildung 3.6: Kalorimeter (1: Spannungsversorgung, 2: Multimeter, 3: Behälter mit Probe, 4: Rührer, 5: Thermometer)

Der Behälter für die Probe ist aus einem 140mm langen Stück Edelstahlrohr (1.4404) und einem Stück rundem Blech gefertigt worden. Die Isolierung besteht aus Polystyrolplatten, welche miteinander verklebt worden sind. Der Deckel des Kalorimeters besteht ebenfalls aus Polystyrolplatten. Um den Apparat einfach zu halten, ist der Rührer aus einem Rundstahl und einem Stück Blech gefertigt worden. Für die Messung des Stroms ist ein Shunt verwendet worden. Dies ist ein sehr niederohmiger Leiter für den der Spannungsabfall bei einem bestimmten Strom bekannt ist. Bei dem hier verwendeten Shunt liegt der Spannungsabfall bei 75 mV bei einem Strom von 50 A . Somit kann mit dem Faktor $f = 2/3$ die gemessene Spannung in ein Wert für den momentanen Strom umgerechnet werden.

Um eine Aussage über die Genauigkeit der zu sammelnden Daten treffen zu können, ist vorab die Wärmekapazität von Wasser, als Vergleichsmedium, mit dem gefertigten Kalorimeter bestimmt worden. Analog zu der Versuchsbeschreibung des KIT Labors Karlsruhe ist die Ermittlung der Messwerte wie folgt durchgeführt worden [vgl. 19]: Zu dem Zeitpunkt $t = 0$ ist Wasser mit der Temperatur ϑ_a und der Masse m_a in den Behälter gefüllt worden und die Zeitmessung gestartet worden. Die Temperatur ist über die Zeit von 10 Minuten beobachtet und notiert worden. Alle Messungen sind in einem Intervall von 60 Sekunden aufgenommen worden. Wasser der Temperatur ϑ_b und der Masse m_b wird mit in das Gefäß gegeben und der Deckel wird wieder verschlossen, wobei die Masse $m_b > m_a$ sein sollte. Die sich einstellende Mischtemperatur ist zu

notieren. Die Temperatur wird erneut für 10 Minuten beobachtet und notiert. Zum Zeitpunkt einer erneuten Messung wird der Tauchsieder eingeschaltet und die Temperatur, Spannung und der Strom notiert. Sobald die Temperatur nahezu $\vartheta = 70^\circ\text{C}$ erreicht hat, wird der Tauchsieder wieder ausgeschaltet. Die Temperatur wird weiterhin für 10 Minuten beobachtet und notiert. Im folgenden werden die Gleichungen für die Bestimmung der Wärmekapazität erläutert.

Entsprechend des Energiesatzes (3.4), wird die Wärmekapazität des Kalorimeters bestimmt.

$$\Delta W_A = \Delta W_B \quad (3.4)$$

Nach dem Energiesatz kann angenommen werden, dass die vom Warmwasser beinhaltenet Energie, welches in das Kalorimeter gegeben wird, komplett von dem im Kalorimeter vorhandenem Wasser und dem Kalorimeter selbst aufgenommen wird. Hierzu ist die Annahme getroffen worden, dass das System „Kalorimeter“ adiabatisch ist. Nach der Gl. (3.6) entspricht ΔW_B der, vom zugegebenen Wasser, abgegebene Energie. Analog hierzu ist nach der Gl. 3.5 ist ΔW_A die vom Wasser mit der Masse m_a und dem Kalorimeter mit der Masse m_K aufgenommene Energie.

$$\Delta W_A = (m_w \cdot c_w + m_K \cdot c_K) \cdot (\vartheta_M - \vartheta_a) \quad (3.5)$$

$$\Delta W_B = m_B \cdot c_w \cdot (\vartheta_b - \vartheta_M) \quad (3.6)$$

Nach [19] ist $m_K \cdot c_K = C_K$ und heißt Kalorimeterkonstante. Die Kalorimeterkonstante beschreibt wie viel Energie von dem Kalorimeter aufgenommen wird. Mit der Gl. (3.4) kann mit den Gl. ((3.5)) und((3.6)) die Gl. (3.7) hergeleitet werden.

$$\frac{C_K}{c_w} = m_B \cdot \frac{\vartheta_b - \vartheta_M}{\vartheta_M - \vartheta_a} - m_A \quad (3.7)$$

Wenn die Gl. 3.8 und die Gl. 3.5 gleich gesetzt werden, ergibt sich die Gl. 3.9 mit der sich die Wärmekapazität des jeweiligen untersuchten Mediums bestimmen lässt.

$$\Delta W = P_{el} \cdot t \quad (3.8)$$

$$c_w = \frac{\Delta W}{\left(m_w + \frac{C_K}{c_w}\right) \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)} \quad (3.9)$$

Analog zu der Versuchsdurchführung von Wasser, wie zuvor beschrieben, kann die spezifischen Wärmekapazität von anderen Suspensionen, wie Gülle oder Gemische aus Maissilage und Gülle bestimmt werden.

Rindergülle ist in der Form wie sie in eine BGA eingebracht wird, verwendet worden. Hier haben sich Ergebnisse mit großen Abweichungen ergeben. Diese sind in Kapitel (4) vorgestellt. Um eine Suspension zu erhalten, die sich mit dem verwendeten Blattrührer rühren lässt, sollte die Gülle zuvor mit einem Fleischwolf zerkleinert werden. Grund ist, dass in Vorversuchen sich gezeigt hat, dass der Versuchsaufbau nicht für Faserige oder stark Stückchen behaftete Suspension geeignet ist. Der zur Verfügung stehende Fleischwolf ist trotz einer Leistung von 1 kW nicht leistungsstark genug um das Maissilage Rindergülle Gemisch zu zerkleinern. Das Substrat ist so dickflüssig und mit Stücken und Faser versetzt, das eine Einbringung der Wärme mittels Tauchsieder aufgrund der mangelnden Durchmischung nicht möglich ist. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4.3 präsentiert.

3.2.4 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Ebenso wie die vorherigen Eigenschaften der Substratgemische wie ρ , c_p und η ist der Wert der Wärmeleitfähigkeit stark von Interesse. Vor alle deshalb, weil er für die Bestimmung der Wärmeübergangszahl aus der Nusselt-Zahl von wesentlicher Bedeutung ist. Es könnten auch die Werte für Wasser genutzt werden, da die in Biogasanlagen vorkommenden Suspension zu einem großen Teil aus Wasser bestehen. Jedoch würden die Wärmeübertrager mit einer zu geringen Übertragungsfläche ausgelegt werden. In der Praxis wird bisher stillschweigend in Kauf genommen, dass durch die zu geringe Übertragungsfläche die Wärmetausch-Zyklen länger als geplant andauern und die Wärmestromdichte geringer ist als angenommen.

Die Wärmeleitfähigkeit wird auf Grundlage der Theorie der instationären Wärmeleitung bestimmt.

Nachfolgend wird der Versuchsaufbau und die Durchführung des Versuchs beschrieben. Anschließend wird die mathematische Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erläutert.

Wie das Wort Wärmeleitung vermuten lässt, wird eine Wärmequelle und eine Wärmesenke benötigt. Als Wärmequelle wird ein Wasserbad genutzt, in welches der Probenbehälter eingestellt wird. Um eine Wärmeleitung hervorzurufen, muss die Wasserbadtemperatur größer als die Temperatur der Probe sein. Das Wasserbad wird mit einer Kochplatte und einer externen Temperaturregelung (Typ: Inkbird 220V ITC-1000) auf ca. 55°C erwärmt und gehalten. Der Probenbehälter ist ein dünnwandiger Blechbehälter, der mit zwei Temperatursensoren ausgestattet ist. Einer ist direkt an der Innenseite des Behälters befestigt, der zweite in der Behältermitte. In dem Wasserbad befindet sich ein Abstandshalter um eine Entkopplung zwischen Kochplatte und Probenbehälter sicherzustellen. In Abbildung 3.7 ist der schematische Versuchsaufbau dargestellt. Abbildung 3.8 zeigt den fertigen Versuchsaufbau mit einer eingestellten Probe.

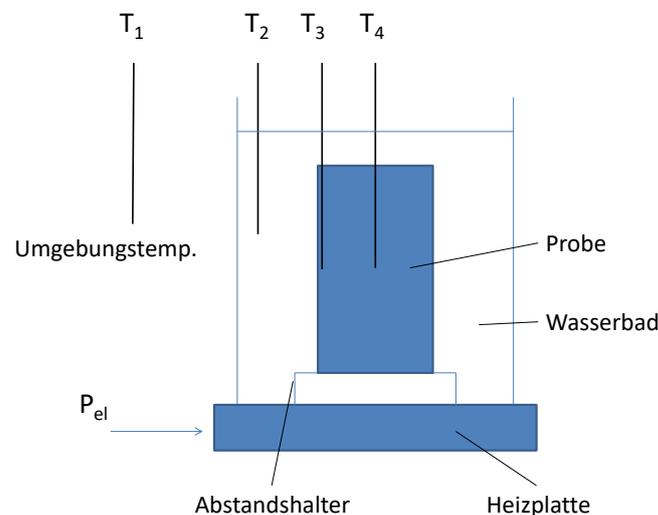


Abbildung 3.7: Schematischer Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit



Abbildung 3.8: Versuchsaufbau mit Probe

Die Probe wird in den Messbehälter gefüllt und verschlossen. Der Behälter wird vorsichtig aber schnell in das Wasserbad eingestellt, da der Zeitpunkt des vollständigen Eintauchens der Zeitpunkt $t = 0$ ist, zu dem die Messung gestartet wird. Es werden alle 2 Minuten die Temperaturen $\vartheta_0, \vartheta_{FL}, \vartheta_R, \vartheta_Z$ aufgenommen. Je nach Probe variiert die Versuchszeit zwischen 20 und 40 Minuten.

Nachfolgend wird die Theorie bezüglich der Nutzung der erfassten Werte, um den Wert der Wärmeleitfähigkeit für die jeweilige Probe zu erhalten, erläutert.

Es ist vorab zu erwähnen, dass die Durchführung gewisse Mängel aufweist: dies gilt insbesondere für das nicht Laborstandards entsprechenden Gefäß und die Messinstrumente. Zusätzlich ist die Probe stets inhomogen, was auch Fehler zur Folge haben kann.

Wird ein geometrisch exakter Körper gewählt, so existieren für den Zylinder, die Kugel und die ebene Platte ausreichend genaue Untersuchungen darüber, wie sich diese Körper erwärmen und welche Gesetzmäßigkeiten hierbei eine Rolle spielen. Bekanntermaßen sind die wesentlichen dimensionslosen Größen in diesem Bereich der Wärmeübertragung die dimensionslose Zeit, ausgedrückt durch die dimensionslose Fourier-Zahl nach Gl. 3.10

$$Fo = \frac{at}{X^2} \quad (3.10)$$

und die dimensionslose Biot-Zahl nach Gl. 3.11

$$Bi = \frac{\alpha_a X}{\lambda} \quad (3.11)$$

als Verhältnis des inneren Wärmeleitwiderstands. In beiden dimensionslosen Kenngrößen ist die Wärmeleitfähigkeit vorhanden, in der Biot-Zahl direkt, in der Fourier-Zahl als Temperaturleitfähigkeit Gl. 3.12.

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (3.12)$$

Durch die Wahl des in der Literatur häufig untersuchten Körpers, ein Zylinder, kann nun über die normierte Temperatur nach Gl. 3.14 und die Berechnung der Fourier-Zahl unter Annahme einer bestimmten (sinnvollen) Wärmeleitfähigkeit aus normierten Diagrammen der Wert der Biot-Zahl für die errechnete Fourier-Zahl und der normierten Temperatur bestimmt werden. Aus der abgelesenen Biot-Zahl kann dann die entsprechende zugehörige Wärmeleitfähigkeit errechnet werden. Durch mühevoller Variation der Ausgangswärmeleitfähigkeit in der Fourier-Zahl und dem Vergleich mit der zugehörigen Wärmeleitfähigkeit aus der Biot-Zahl gelangt man zum Ergebnis. Beim beschriebenen Vorgehen besteht ein gewisses Risiko der Ungenauigkeit, die an dieser Stelle nicht ausgeschlossen werden kann.

Allgemein gültig ist der Ausdruck $Q = m c_p \Delta\vartheta$ mit $m = \rho V$ und $\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$ für die Größe der übertragenen Wärmeenergie. Die Wärmeleistung im Zeitraum τ wird dann nach Gl. 3.13 berechnet.

$$\dot{Q} = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta}{t} = \frac{\rho \cdot V \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta}{t} \quad (3.13)$$

Für die kalorische Mitteltemperatur des Zylinders gilt mit Θ_Z des Zylinders und Θ_P der Platte (Deckel und Boden) die Gl. 3.14.

$$\bar{\Theta} = \bar{\Theta}_Z \cdot \bar{\Theta}_P = \frac{\vartheta_m - \vartheta_{Fl}}{\vartheta_0 - \vartheta_{Fl}} \quad (3.14)$$

Da der betrachtete Temperaturbereich sehr klein ist, kann man ohne einen größeren Fehler zu

erhalten $\vartheta_m \approx \frac{\vartheta_R + \vartheta_Z}{2}$ setzen, da es nur durch umfangreiche Untersuchungen und Berechnungen möglich ist, ϑ_Z aus Θ zu entwickeln. Damit wird die Wärmeleistung mit D als Zylinderdurchmesser und H als Zylinderhöhe nach Gl. 3.15 bestimmt.

$$\dot{Q} = \frac{\rho \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H \cdot c_p \cdot (\vartheta_{Fl} - \vartheta_Z)}{t} \quad (3.15)$$

Der mittlere angenäherten Wärmeübergangskoeffizienten wird durch die Gl. 3.16 mit $\Delta\vartheta = \vartheta_{Fl} - \vartheta_R$ und $A = (2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 + \pi \cdot D \cdot H)$

$$\alpha_a = \frac{\dot{Q}}{A \Delta\vartheta} \quad (3.16)$$

bestimmt.

Für die weitere Rechnung muss eine Wärmeleitfähigkeit angenommen werden. Mit dem Wert der angenommenen Wärmeleitfähigkeit wird die Temperaturleitfähigkeit a errechnet. Im Anschluss wird mit der Temperaturleitfähigkeit a , der Zeit τ und der halben Mantelfläche X als charakteristische Größe nach Gl. 3.10 die Fourier-Zahl errechnet. Mit Hilfe der Fourier-Zahl Fo und der thermodynamischen kalorischen Mitteltemperatur $\bar{\Theta}$ kann aus dem Diagramm E2, Abb. 3 aus dem VDI Wärmetlas die Biot-Zahl abgelesen werden [30]. Das Diagramm ist im Anhang A.1 abgebildet.

Wird nun die Gl. 3.11 für die Biot-Zahl entsprechend der Wärmeleitfähigkeit aufgelöst (Gl. 3.17) und α_a , X und die Biot-Zahl eingesetzt, ist das Ergebnis die Wärmeleitfähigkeit nach erster Näherung.

$$\lambda = \frac{\alpha_a \cdot X}{Bi} \quad (3.17)$$

Die Annahme für die Wärmeleitfähigkeit muss gegebenenfalls angepasst werden, bis die angenommene und die errechnete Wärmeleitfähigkeit übereinstimmen.

3.2.5 Bestimmung der Viskosität

Die zu untersuchenden Flüssigkeiten, hier Rindergülle oder Gemische aus Rindergülle und anderen Substraten wie zum Beispiel Maissilage sind keine newtonschen Flüssigkeiten [29]. Auch ist es schwierig, dass in einer BGA genutzte Medium in einer der drei Hauptgruppen der nicht-newtonschen Flüssigkeiten einzuordnen. Dementsprechend ist es auch kaum möglich, wesentliche verfahrenstechnische Eigenschaften für die Auslegung von Wärmeübertrager- und Apparatechnik inklusive Rührer für solche Stoffgemische in der Literatur aufzufinden. Deshalb, wie bereits in Kapitel 2.3 aufgeführt, sollen Basiswerte in Abhängigkeit vom TR-Gehalt durch Versuche gewonnen werden. Für die Feststellung der Viskosität der in der BGA genutzten Substrate werden Versuche mit einem Rührwerk durchgeführt. Folgendes liegt dieser Idee zugrunde:

Magnusson [QUELLE] schlug vor, die Leistungsaufnahme von Rührwerken, charakterisierend durch die Reynolds-Zahl mit d_R als Rührerdurchmesser

$$Re = \frac{n \cdot d_R^2 \cdot \rho}{\eta_S}$$

und die Newton-Zahl mit ebenfalls d_R als Rührerdurchmesser

$$Ne = \frac{P}{n^2 \cdot d_R^5 \cdot \rho}$$

zu nutzen. Hierbei ist die Viskosität η_S die scheinbare Viskosität, die nicht durch Viskosimeter, sondern nur durch Kontrollmessungen von Leistungsparametern an realen Rührwerken bestimmt wird. Des Weiteren gelten nach *Horst Chmiel* „normale“ Rheometeranordnung als nicht für suspendierende Biomassen geeignet. Grund ist das diese oft schnell sedimentieren und außerdem die Stückchen und Fasern für die Spaltgeometrien zu groß sind, daher kann der innere Teil des Rheometers durch einen Blattrührer ersetzt werden [Bongenaar et. al. 1973],[vgl. 6].

Ein vorhandenes Rührgefäß, bestückt mit einem definierten Rührorgan, wird mit unterschiedlichen Mischungen, die in einer BGA typischerweise vorhanden sind, befüllt und in Betrieb genommen. Es werden die Drehzahl des Rührers, die Stromaufnahme und der Spannungsabfall gemessen. Da in der einschlägigen Fachliteratur für den Betrieb von Rührbehältern, deren Auslegung

und der vorab zu bestimmenden zu installierenden Leistung eine Vielzahl von Dimensionslosen Kennzahlen der Art $Ne = f(Re; G1; G2; \dots)$ publiziert sind, liegt der Gedanke nahe, unter Nutzung der existierenden Gleichungen entsprechende Stoffwerte zu gewinnen.

Ebenso ist bekannt, dass einfache Blattrührer zu den ältesten Rührern gehören. Zu den bekanntesten Abhängigkeiten zählt die von Zlokarnik erarbeitete in Abbildung 3.9 gezeigte graphische Darstellung $Ne = f(Re)$ über das gesamte Spektrum von $1 < Re < 10^6$.

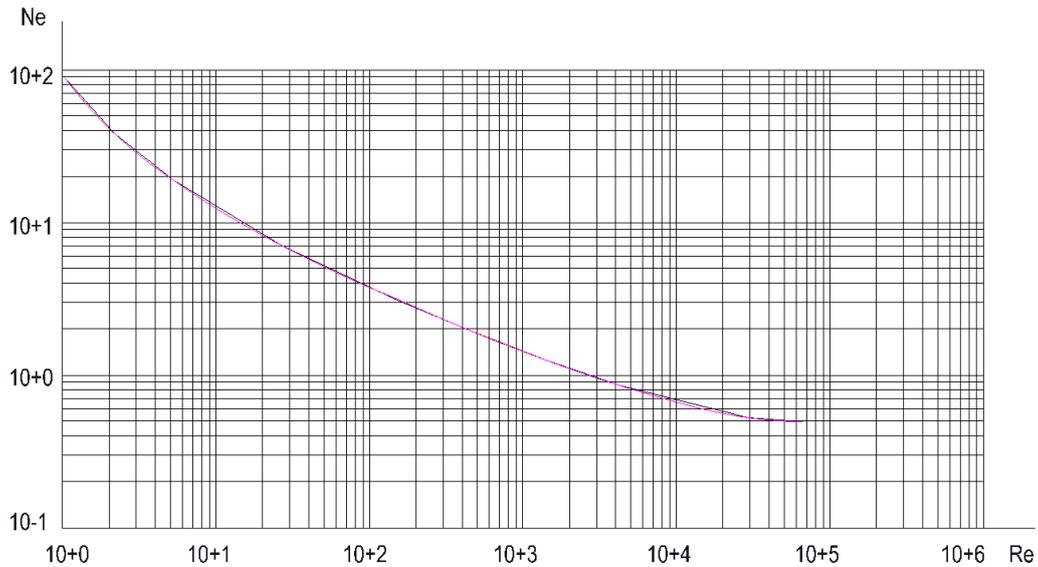


Abbildung 3.9: Graphische Darstellung der Abhängigkeit $Ne = f(Re)$

Es ist zu diesem Zweck ein vorhandener Behälter, der Bestandteil einer Mobilen Versuchsanlage der Firma FFE Solutions GmbH ist, umgebaut worden. In Abbildung 3.10 ist der Behälter mit dem Rührwerk abgebildet.



Abbildung 3.10: Blatt-Rührrheometer mit Motor, Getriebe und Drehzahlmesser

Die zu rührende Masse aus Substrat ist im Verhältnis zur Masse des Rührwerks, bestehend aus Motor, Getriebe, Rührwelle und Rührblatt, gering. Diese These lässt das in Abbildung 3.10 zu erkennende Größenverhältnis zwischen Behälter und Rührwerk zu. Der Behälter ist ca. zu einem Drittel mit der Probe gefüllt. Deshalb besteht die Vermutung, dass ein großer Anteil der aufgewendeten Energie für die Überwindung der Trägheit, der am Versuchsaufbau beteiligten Bauteile, in Anspruch genommen wird. Zur Bestimmung dieses Anteils wird eine Flüssigkeit mit bekannten Eigenschaften verwendet. Die Ergebnisse erlaube nach entsprechender mathematischer Bearbeitung eine Aussage über die Anteile vom Energieeintrag in die Flüssigkeit und dem Aufwand für die Trägheit des Rührwerkes, der Reibung usw. treffen zu können.

Leider ist es nicht möglich, einen analytischen Ausdruck über den gesamten Bereich von $1 < Re < 10^6$ mit genügender Genauigkeit zu generieren. Für die Bestimmung der „Anlagenkonstante“ C wird deshalb entsprechend den errechneten Reynolds-Zahlen der Bereich zwischen $100 < Re < 1000$ gefunden: $Ne = f(Re) = 26 \cdot Re^{-0,421}$ mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,994$. In der Tabelle A.12 im Anhang sind die Werte für Re und Ne der Grafik niedergeschrieben.

So wie bereits angedeutet, wird über die experimentelle Bestimmung von Leistungsparametern

die Newton-Zahl ermittelt und mit Hilfe von bekannten Dimensionslosen Kennzahlen in die Reynolds-Zahl überführt. Daraus errechnet sich dann bei bekannter Geometrie des Versuchsaufbaus, die Viskosität des untersuchten Stoffes.

Da das vorhandene Rührwerk (Motor, Getriebe und Rührorgan) (Typ: STMIX SK 0F-63 S/4) mit drei verschiedenen Rührblättern ursprünglich ausgestattet ist, ist folgende Änderung vorgenommen worden. Die vorhandenen Propellerrührer sind durch ein einzelnen quadratischen Blattrührer ersetzt worden. Dieser ist aus einem 3 mm starken Blech gefertigt worden. Siehe Abbildung 3.11 für die Abmessungen des Apparats.

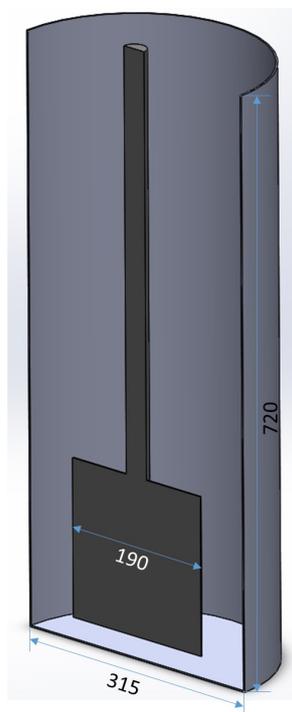


Abbildung 3.11: Viskosimeter Behälter im Schnitt

Für die Steuerung des Rührwerks wird ein Frequenzumrichter (FU) (Typ: FRN0,4C1E-7E) verwendet. Der FU regelt über das variieren der Ausgangsfrequenz die Drehzahl des Motors. Es ist nur mit aufwendiger Messtechnik möglich den Strom und den Spannungsabfall eines Asynchronmotors zu messen [15]. Daher sind die von dem FU auslesbaren Daten zu diesem Zweck verwendet worden. Das Auslesen der Daten (Strom $[A]$, Spannung $[V]$ und Frequenz $[Hz]$) ist über die RS-485 Schnittstelle des FU's und einem Laptop mit der Software des Herstellers (Fuji Electric) realisiert worden. Die Drehzahl wird mittels eines Laser Drehzahlmessgeräts (TYP:

Digital Tachometer HS2234) aufgenommen. Für die zuvor beschriebene Versuchsanlage werden nun nach Feststellung der „Eigenparameter“ Substrate beprobt. Im Wesentlichen werden hier die Maissilage-Gülle-Gemische, die zum Teil selbst hergestellt wurden, untersucht. Außerdem soll Rezirkulat und Rindergülle aus einer Biogasanlage betrachtet werden.

Vor Beginn des Versuches wird die zu untersuchende Probe mit dem Volumen von ca. $V_{Probe} = 0,002 m^3 = 20 Liter$ in den Behälter gefüllt. Abbildung 3.12 zeigt die Mischung aus Maissilage und Rindergülle im Viskosimeter.



Abbildung 3.12: Maissilage und Rindergülle im Viskosimeter

Für die Messung werden verschiedenen Drehzahlen abgefahren. Hierzu wird die Frequenz von $10 Hz$ auf $50 Hz$ in $5 Hz$ Schritten erhöht. Zu jedem Messpunkt wird der Strom, die Spannung und die Drehzahl notiert. Nach jeder Messung wird die Probe für die Zeit der Messung ruhen gelassen, um die durch das Rühren hervorgerufene Scherverdünnung weitestgehend rückgängig zu machen. Um aus den aufgenommenen Messwerten die Viskosität bestimmen zu können, wird folgendermaßen vorgegangen:

Spannungsabfall und Strom werden linearisiert $U = f(n)$ und $I = f(n)$. Daraus folgt, die Gesamtleistung als eine Funktion der Drehzahl $P_L = f(n)$. Die Anlagenkonstante C wurde mit Hilfe der Probenflüssigkeit (Hydraulik ÖL ARAL Viram DE 46) bestimmt zu:

$$C = \zeta(n) = -5 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 - 8 \cdot 10^{-5} + 0,9994$$

Wie zuvor bereits erwähnt, ist es aufgrund der im Verhältnis zur Probe großen Antriebsanlagenmasse nicht erstaunlich, dass die Anlagenkonstante nahe 1 ist.

Der Leistungsanteil für die Überwindung der Viskosität beim Rühren kann somit nach Gl. 3.18 berechnet werden.

$$P_Z = P_{(L)} \cdot (1 - \zeta(n)) \quad (3.18)$$

Anschließend wird mit der für das Rühren errechnete benötigte Leistung P_Z die Newton-Zahl nach Gl. 3.19 ermittelt.

$$Ne = \frac{P_Z}{\rho \cdot n^3 \cdot d_R^5} \quad (3.19)$$

Aus der ermittelten Newton-Zahl wird dann wiederum mit der für den Bereich von $2 < Re < 3000$ erhalten Gl. 3.20 die Reynolds-Zahl errechnet.

$$Re = 1707,2 \cdot Ne^{-1,987} \quad (3.20)$$

Abschließend wird, mit der nach der Viskosität η umgestellten Gleichung für die Reynolds-Zahl (Gl. 3.21), diese errechnet.

$$\eta_S = \frac{(n/60) \cdot d_R^2 \cdot \rho}{Re} \quad (3.21)$$

In der (vorläufigen) Annahme, dass die Strömung Turbulenz aufweist.

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die gewonnen Werte dargestellt und diskutiert. Des Weiteren wird erläutert, welche Schwierigkeiten beim Erheben der Daten aufgetreten sind und welche Gründe dies gehabt haben könnte. Die entsprechenden Versuche sind in Kapitel 3 beschrieben. Der als erstes erwähnte Trockenrückstandgehalt dient als abhängige Größe. Es werden die gewonnen Werte der Dichte, der spezifische Wärmekapazität, der Wärmeleitfähigkeit und der Viskosität jeweils auf den TR-Gehalt der untersuchten Probe bezogen.

4.1 Trockenrückstand

Alle nachfolgend beschriebenen Werte sind analog zu dem in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Versuch durchgeführt worden. Je Probe ist eine Dreifachbestimmung des TR-Gehalts durchgeführt worden, um den Fehler, der durch eine inhomogenität der Proben hervorgerufen werden kann, zu minimieren.

4.1.1 TR-Gehalt von Maissilage/Gülle Suspension

Es sind fünf verschiedene Mischungen von Maissilage und Gülle erstellt worden und es wurde der jeweilige TR-Gehalt bestimmt. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 4.1 niedergeschrieben.

	Tiegel	m_a	m_b	$m_c(\text{nach } 15 \text{ h})$	$m_c(\text{nach } 17 \text{ h})$	m_{red}	TR [%]	Mittelwert
		g	g	g	g	%	%	%
Probe 1	1	9,38	16,6	10,93	10,92	0,09	21,3	21,5
	2	9,46	17,5	11,23	11,21	0,18	21,8	
	3	9,35	16,31	10,87	10,85	0,18	21,6	
Probe 2	1	9,04	19,37	11,68	11,67	0,09	25,5	25,4
	2	9,56	20,86	12,47	12,45	0,16	25,6	
	3	9,24	20,25	12,05	12,02	0,25	25,2	
Probe 3	1	11,63	31,62	15,66	15,65	0,06	20,1	20,2
	2	12,02	31,82	16,02	15,98	0,25	20,0	
	3	9,86	32,85	14,60	14,54	0,41	20,4	
Probe 4	1	9,5	32,55	13,01	13,00	0,08	15,2	15,3
	2	10,65	33,45	14,21	14,18	0,21	15,5	
	3	9,84	31,45	13,20	13,14	0,45	15,3	
Probe 5	1	11,72	49,55	16,17	16,16	0,06	11,7	11,7
	2	11,54	50,21	16,11	16,09	0,12	11,8	
	3	11,05	49,24	15,51	15,48	0,19	11,6	
Probe 6	1	73,85	163,61	84,46	84,2	0,31	11,5	11,6
	2	82,59	126,00	87,67	87,56	0,13	11,4	
	3	83,46	136,45	89,86	89,65	0,23	11,7	

Tabelle 4.1: Versuchswerte TR-Gehalt Maissilage/Gülle

Die Gewichtsabnahme ist in keinem Fall größer als 0,5% gewesen. Es ist somit bei jeder Probe die Forderung bezüglich der Massenkonstanz eingehalten worden [vgl. 11]. Die in Tabelle 4.1 rot markierten Werte, sind jeweils die minimal beziehungsweise maximal ermittelten Werte des TR-Gehalts der Probe 1 bis Probe 6. Die relativen Abweichungen sind in Abbildung 4.1 über dem TR-Gehalt aufgetragen.

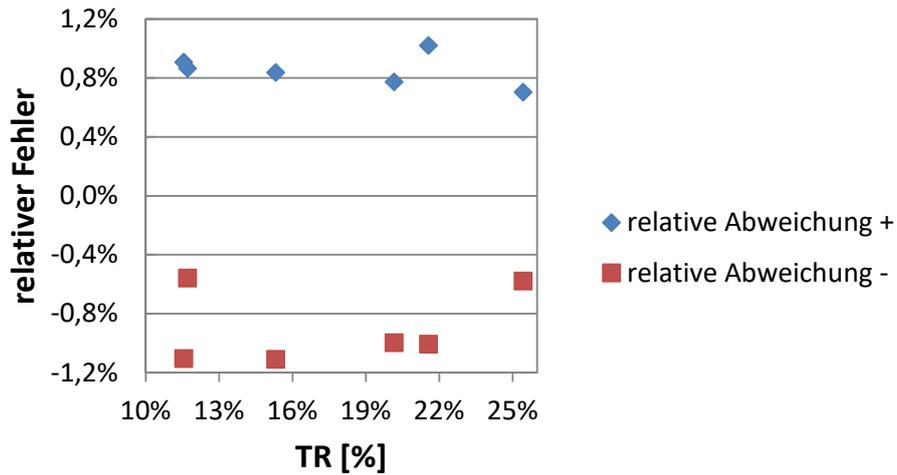


Abbildung 4.1: relative Abweichung je Probe der Maissilage/Gülle Suspension

Mit einer relativer Abweichung von *ca.* $\pm 1\%$ zwischen dem Mittelwert des TR-Gehalts und den minimal und maximal gemessenen Werten, werden die ermittelten TR-Gehalte der jeweiligen Probe als ausreichend genau angenommen.

4.1.2 TR-Gehalt von Rezirkulat

Analog zum vorherigen Kapitel ist der TR-Gehalt für Rezirkulat der BGA Gnutz bestimmt worden. In Tabelle 4.2 sind die ermittelten Versuchswerte niedergeschrieben.

	Tiegel	m_a	m_b	$m_c(\text{nach } 15h)$	$m_c(\text{nach } 17h)$	m_{red}	TR [%]	Mittelwert
		g	g	g	g	%	%	%
Probe 1	1	10,15	48,64	13,49	13,45	0,30	8,57	8,6
	2	11,54	49,54	14,81	14,78	0,20	8,52	
	3	9,84	48,45	13,21	13,15	0,45	8,57	

Tabelle 4.2: Versuchswerte TR-Gehalt Rezirkulat aus Gnutz

Die relative Abweichung zwischen den drei einzelnen Tiegeln der Probe und dem ermittelten mittleren TR-Gehalt ist $< 1\%$. Daher kann dieser Wert ebenfalls als ausreichend genau angenommen werden.

4.1.3 TR-Gehalt von Rindergülle

Der TR-Gehalt von reiner Rindergülle ist zu 8,6% bestimmt worden. Die relative Abweichung von $\pm 2\%$ ist im Verhältnis zu den vorherigen Ergebnissen größer. Dies liegt vermutlich an den in Rindergülle vermehrt vorkommenden langen Fasern. Die gewonnenen Werte sind in Tabelle 4.3 niedergeschrieben. Es kann hier kein Vergleich zwischen Literaturwerten und dem ermittelten Wert gezogen werden, da der TR-Gehalt je nach Fütterungsart der Rinder und Reinheit der Gülle variiert.

	Tiegel	m_a	m_b	$m_c(\text{nach } 20h)$	$m_c(\text{nach } 21h)$	m_{red}	TR [%]	Mittelwert
		g	g	g	g	%	%	%
Probe 1	1	73,81	162,84	81,65	81,59	0,07	8,7	8,6
	2	82,29	172,12	89,98	89,95	0,03	8,4	
	3	86,17	174,94	93,7	93,66	0,04	8,4	

Tabelle 4.3: Versuchswerte TR-Gehalt reine Rindergülle

4.2 Dichte

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Dichte der einzelnen untersuchten Proben vorgestellt und diskutiert. Alle Messungen sind bei ca. 20°C durchgeführt worden.

4.2.1 Dichte von Maissilage/Rindergülle Suspension

Es ist nicht möglich gewesen wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben die Dichte mit einem Messkolben zu bestimmen. Beim Einfüllen der Probe ist der Hals des Messkolbens immer verschmutzt, so dass ein Ablesen des Füllstandes nicht möglich gewesen ist. Bei dem Versuch einen Überlaufkolben für die Bestimmung der Dichte zu nutzen hat sich ebenfalls gezeigt, dass dies nicht praktikabel ist. Die verschiedenen Substrate lassen sich aufgrund der großen Anzahl an Stückchen und Fasern kaum in den Überlaufkolben einfüllen. Es ist nicht möglich eine Aussage über den Zustand der Probe in dem Kolben zu treffen. Es könnten sich beim Einfüllen zum Beispiel Luftblasen oder Hohlräume gebildet haben. Zusätzlich hat sich im Hals des Überlaufkolbens immer eine kleine Schaumschicht gebildet. Dies hatte zu Folge, dass das Volumen nicht komplett ausgefüllt wurde. Es ist stark anzunehmen, dass die zuvor beschriebenen Probleme zu einem Messfehler führen.

Daher ist aus voran gestellten Gründen ein Behälter wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben verwendet worden. Dieser ist komplett mit der jeweiligen Probe gefüllt worden. Der Behälter hat ein Volumen von $V = 0,00135 \text{ m}^3$ und eine leer Masse von $m = 0,957 \text{ kg}$.

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der Dichte von einer Mischung aus Maissilage und Rindergülle vorgestellt und diskutiert:

Je Probe sind drei Messungen durchgeführt worden (siehe Tabelle 4.4). Aus der berechneten Dichte je Probe, ist der Mittelwert bestimmt worden.

Durchführung	Größe	Einheit	Probe					
			1	2	3	4	5	6
	TR-Gehalt	[%]	21,5	25,4	20,2	15,3	11,7	11,6
1	Masse	[g]	1683,30	1710,35	1867,40	2134,00	2229,00	2244,00
	Dichte	[kg/m ³]	538,03	558,07	674,41	871,90	942,27	953,39
2	Masse	[g]	1768,40	1688,20	1943,70	2102,80	2318,00	2278,00
	Dichte	[kg/m ³]	601,07	541,66	730,93	848,79	1008,20	978,57
3	Masse	[g]	1765,30	1654,00	1897,40	2196,60	2290,50	2268,50
	Dichte	[kg/m ³]	598,77	516,32	696,63	918,27	987,83	971,53
Mittelwert Dichte		[kg/m ³]	579,29	538,68	700,66	879,65	979,44	967,83

Tabelle 4.4: Versuchswerte Dichtemessung von Maissilage gemischt mit Rindergülle

In Abbildung 4.2 sind die relativen Abweichungen, je Probe, in Abhängigkeit des TR-Gehalts dargestellt. Es sind relative Abweichungen von -4% bis 7% aufgetreten.

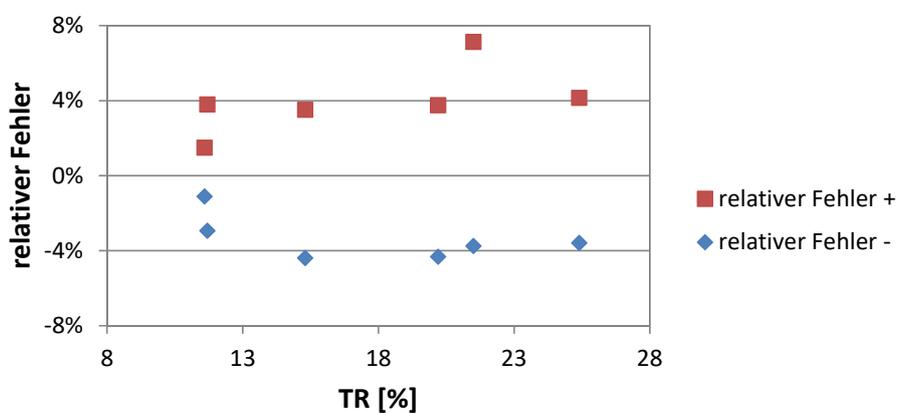


Abbildung 4.2: Abweichungen gemessener Dichten von Maissilage gemischt mit Rindergülle

Aufgrund der Abweichungen zwischen den einzelnen gemessenen Werten ist anzunehmen, dass es nicht trivial ist die Probe immer gleich in den Behälter einzufüllen. Es ist großer Wert auf das gleichmäßige Einfüllen der Proben gelegt worden. Jedoch sind die untersuchten Proben kompressibel und somit ist die Dichte abhängig von der Art des Einfüllens, beziehungsweise wie stark die Probe beim Einfüllen zusammengedrückt wird. Um ein konstantes Zusammendrücken der Proben sicher zu stellen, könnte die Probe zum Beispiel mit einer Kreisplatte, die in dem zylindrischen Behälter frei beweglich ist, mit immer dem gleichen Gewicht beschwert werden. So wäre die jeweilige Probe immer gleich verdichtet.

4.2.2 Dichte von Rezirkulat

Die Dichte von Rezirkulat aus der BGA Gnutz ist analog wie zuvor beschrieben mit dem selben zylindrischen Behälter bestimmt worden. Grund sind die selben Schwierigkeiten beim Einfüllen in den Messkolben. Die Dichte für das Rezirkulat ist zu $\rho = 867,68 \frac{kg}{m^3}$ bestimmt worden. In der Tabelle 4.5 sind die aufgenommenen Messwerte niedergeschrieben.

Größe	Einheit	Wert
TR-Gehalt	[%]	8,2
Masse	[g]	2123,80
Dichte	[kg/m ³]	864,34
Masse	[g]	2084,64
Dichte	[kg/m ³]	835,33
Masse	[g]	3276,46
Dichte	[kg/m ³]	903,35
Mittelwert Dichte	[kg/m ³]	867,68

Tabelle 4.5: Versuchswerte Dichtemessung von Rezirkulat

Die relative Abweichung der gemessenen Werte zum Mittelwert der Dichte liegt bei $\pm 4\%$. Die ermittelten Werte werden als hinreichend genau angenommen.

4.2.3 Dichte von Rindergülle

In Tabelle 4.6 sind die Messwerte für die Bestimmung der Dichte von Rindergülle niedergeschrieben.

Größe	Einheit	Wert
TR-Gehalt	[%]	8,6
Masse	[g]	2359,60
Dichte	[kg/m ³]	1039,02
Masse	[g]	2361,15
Dichte	[kg/m ³]	1040,17
Masse	[g]	2358,64
Dichte	[kg/m ³]	1038,31
Mittelwert Dichte	[kg/m ³]	1039,17

Tabelle 4.6: Versuchswerte Dichtemessung von Rezirkulat Gnutz/Sønderjysk

Die relative Abweichung der gemessenen Werte zum Mittelwert der Dichte liegt bei $\pm 0,1\%$. Die ermittelten Werte werden somit als hinreichend genau angenommen.

Nach *M. Türk* kann die Dichte von Gülle nach folgender Gleichung bestimmt werden [vgl. 29]:

$$\rho = A_r + B_r TS \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (4.1)$$

$$TS < 3\% : A_r = 1000 / B_r = 4$$

$$TS \geq 3\% : A_r = 1000,6 / B_r = 3,67$$

Die im Zuge dieser Arbeit untersuchte Rindergülle hat einen TR-Gehalt von $TR = 8,6\%$. Mit Gl. 4.1 lässt sich eine Dichte von $\rho = 1032,16 \frac{kg}{m^3}$ berechnen. Die gemessene Dichte der Rindergülle ist $\rho = 1039,17 \frac{kg}{m^3}$. Der relative Fehler liegt unter 1% . Der gemessene Wert für Rindergülle wird daher als ausreichend genau angenommen und kann für alle weiteren Berechnungen verwendet werden.

Anschließend sind alle ermittelten Werte für die Dichte der Substrate mit verschiedenem TR-Gehalt in einem Diagramm über dem TR-Gehalt aufgetragen worden. Es ist eine Regression durchgeführt worden.

In Abbildung 4.3 ist der Zusammenhang zwischen der Dichte und dem TR-Gehalt dargestellt. Die durchgeführte Regression lässt auf einen linearen Zusammenhang zwischen der Dichte und dem TR-Gehalt der untersuchten Substrate schließen.

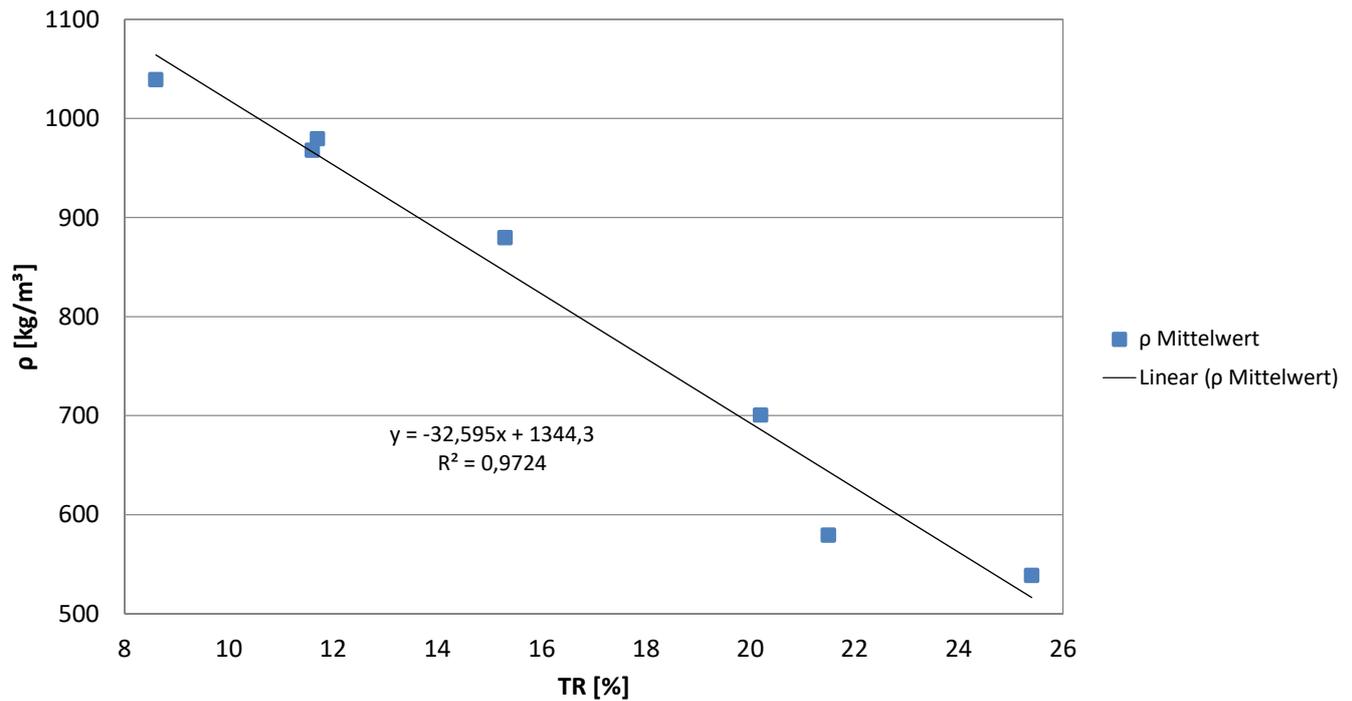


Abbildung 4.3: Zusammenhang zwischen Dichte und TR-Gehalt

Die Gl. 4.2 beschreibt das für den Zusammenhang gefundene lineare Modell.

$$\rho = -27,867 \cdot TR [\%] + 1247,2 \quad (4.2)$$

Dieses weist ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,864$ auf, was bedeutet das ca. 86 % der Abweichungen des Modells von der Realität durch das Modell beschrieben werden können. Auffällig ist, dass die Dichte von Rezirkulat $\rho = 867,68 \frac{kg}{m^3}$ eine große Abweichung aufweist. Dies liegt eventuell an den durch die Vergärung veränderten Stoffeigenschaften. Eine ohne den erwähnten Messwert durchgeführte Regression ergibt ebenfalls ein lineares Modell, jedoch mit einem Bestimmtheitsmaß von ca. 97 %. Gl. 4.3 beschreibt das gefundene Modell.

$$\rho = -32,595 \cdot TR [\%] + 1344,3 \quad (4.3)$$

Die in der Literatur gefundene Gleichung wird als zuverlässiger eingeschätzt, da sie auf mehr Messwerten basiert. Jedoch ist das verwendete Substratgemisch nicht bekannt. Es sollte daher, die im Zuge dieser Arbeit gefundene Gleichung, mit weiteren Messwerten validiert werden.

4.3 Spezifische Wärmekapazitätsmessung

Im weiteren Verlauf, werden die Ergebnisse des in Kapitel 3.2.3 vorgestellten Versuchs dargestellt und diskutiert. In 4.3.1 werden die Ergebnisse für den Versuch mit Wasser als Referenzwert beschrieben. In 4.3.2 bis 4.3.4 sind die Ergebnisse der Versuche die spezifische Wärmekapazität von verschiedenen Substraten zu bestimmen, dargestellt und erläutert.

4.3.1 Spezifische Wärmekapazität von Wasser

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Versuchsdurchführung nach Kapitel 3.2.3 zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser als Vergleichswert beschrieben. In Tabelle 4.7 sind exemplarisch für $c_{w,1}$ die Werte niedergeschrieben. Jene sind der Tabelle A.1 im Anhang entnommen worden. Die Werte für $c_{w,2}$ und $c_{w,3}$ sind in den Tabellen A.2 und A.3 im Anhang niedergeschrieben.

Größe	Wert
m_A	392 g
m_B	571 g
ϑ_A	20,6 °C
ϑ_B	41 °C
ϑ_M	31,6 °C
ϑ_1	31 °C
ϑ_2	70,6 °C

Tabelle 4.7: Versuchswerte $c_{p,w,1}$

Nach der Gl. 4.5 haben sich mit der Gl. 4.4

$$\frac{C_K}{c_{p,w}} = m_B \cdot \frac{\vartheta_B - \vartheta_A}{\vartheta_M - \vartheta_A} - m_A \quad (4.4)$$

$$c_{p,w} = \frac{\Delta W}{\left(m_w + \frac{C_K}{c_w}\right) \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)} \quad (4.5)$$

folgende Werte für die drei Versuchsdurchführung ergeben:

$$c_{p,w,1} = 4,556 \frac{kJ}{kg K}$$

$$c_{p,w,2} = 4,603 \frac{kJ}{kg K}$$

$$c_{p,w,3} = 4,536 \frac{kJ}{kg K}$$

Aus den Werten $c_{w,1}$, $c_{w,2}$ und $c_{w,3}$ ist der Mittelwert $c_{p,w} = 4,564 \frac{kJ}{kg K}$ gebildet worden.

Der Literaturwert für die spezifische Wärmekapazität von Wasser ist $c_{p,w,L} = 4,182 \frac{kJ}{kg K}$ [vgl. 12].

Wird der ermittelte Wert $c_{p,w}$ durch den in der Literatur gefundenen Wert $c_{p,w,L}$ dividiert, folgt:

$$\frac{c_{p,w}}{c_{p,w,L}} - 1 = 0,0913$$

Daraus ergibt sich, dass der gemessene Wert um 9,13% größer ist als der in der Literatur bestätigte Wert. Diese Abweichung kann auf die Verluste der Messanordnung zurückzuführen werden. Diese setzen sich aus Wärmeverlusten der Isolierung des Kalorimeters und dem Wirkungsgrad des Tauchsieders zusammen. Dazu kommen noch Verluste in den Anschlusskabeln des Tauchsieders. Wie groß die einzelnen Verluste sind wird aus zeitlichen Gründen nicht weiter aufgeschlüsselt. Für alle folgenden ermittelten Werte wird der Korrekturfaktor $f_K = 0,0913$ für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität berücksichtigt.

4.3.2 Spezifische Wärmekapazität von Rindergülle

Im Folgenden werden die Ergebnisse für nicht zerkleinerte Rindergülle vorgestellt.

Analog zu der Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser ist der Versuch für Rindergülle durchgeführt worden. Es haben sich folgende Werte ergeben.

$$c_{p,G,1} = 4,736 \frac{kJ}{kg K}$$

$$c_{p,G,2} = 4,136 \frac{kJ}{kg K}$$

$$c_{p,G,3} = 3,687 \frac{kJ}{kg K}$$

Die bestimmten Werte haben zu einem Mittelwert von $c_{p,G,M} = 4,187 \frac{kJ}{kg K}$ und eine relative Abweichung von etwa $\pm 14\%$. Wie zuvor in 3.2.3 erwähnt, ist anzunehmen, dass es mit der verwendeten Rührtechnik nicht möglich ist die Wärme gleichmäßig in die Probe einzubringen und die Abweichungen daher resultieren. Es ist anzunehmen, dass die mit Stückchen und Fasern behaftete Rindergülle und die geringe Mischleistung des Handblattrührers Grund für die Abweichungen sind. Die aufgenommenen Messwerte sind in den Tabellen (A.4), (A.5) und (A.6) im Anhang dokumentiert.

Um ein homogenes Medium zu erhalten sind mehrere Möglichkeiten in Betracht gezogen worden:

- Zerkleinern der Fasern und Stückchen mit einem Messer (sehr aufwendig und schmutzig)
- Zerkleinern mit einem Küchenpürierstab (sehr Wahrscheinlich, dass sich die Fasern aus der Gülle um das kleine Messer wickeln)
- Zerkleinern in einem Fleischwolf (Möglichkeit des Verstopfens)

Die Zerkleinerung der Rindergülle mit einem Fleischwolf hat funktioniert und wurde für die folgenden Versuche als Vorbehandlung verwendet. Die anderen zwei Anwendungen sind nicht erprobt worden, da der größte Erfolg mit dem Fleischwolf erwartet wurde. Abbildung 4.4 zeigt die mit dem Fleischwolf zerkleinerte Rindergülle im Kalorimeter.

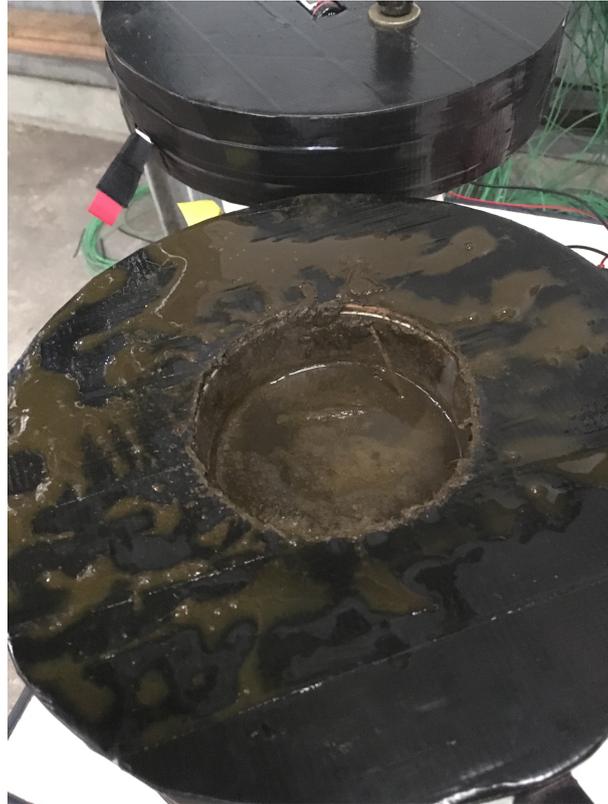


Abbildung 4.4: Zerkleinerte Rindergülle im Kalorimeter

Die folgenden Werte sind mit der zerkleinerten Rindergülle ermittelt worden und in den Tabellen (A.7), (A.8) und (A.9) im Anhang dokumentiert.

$$c_{p,G,1} = 4,376 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$c_{p,G,2} = 4,399 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$c_{p,G,3} = 4,230 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Aus den berechneten Werten lässt sich eine mittlere spezifische Wärmekapazität von zerkleinerten Rindergülle von $c_{p,G} = 4,335 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ berechnen. Durch die Homogenisierung der Rindergülle mit dem Fleischwolf ergibt sich eine relative Abweichung von $\pm 2\%$. Mit dem zuvor in Kapitel 4.3.1 bestimmtem Korrekturfaktor $f_K = 0,913$ ergibt sich für zerkleinerte Rindergülle eine $c_{p,G} = 3,973 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$.

Y. R. Chen hat für Rindergülle die spezifische Wärmekapazität mit einem TR-Gehalt von 0,94 % bis 99,4 % bestimmt [vgl. 5]. Aus diesen Werten lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem TR-Gehalt und der spezifischen Wärmekapazität ableiten. Siehe Gl. 4.6.

$$c_{p,G,L}(TR) = -0,0267 \cdot TR + 4,1433 \quad (4.6)$$

Das Bestimmtheitsmaß für diese lineare Regression ist zu $R^2 = 0,97$ berechnet worden. Die in dieser Arbeit untersuchte Rindergülle hat ein TR-Gehalt von 8,6 % (siehe Tabelle 4.1.3). Aus Gl. 4.6 und ergibt sich für den TR-Gehalt von 8,6 % eine spezifischen Wärmekapazität von $c_{p,G,L} = 3,913 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$. Der bestimmte Wert für Rindergülle weicht um 1,5 % von dem in der Literatur gefundenen Wert ab.

Es wird daher angenommen, dass die verwendete Versuchsanordnung für ausreichend homogenisierte Proben, ausreichend genaue Werte liefert.

4.3.3 Spezifische Wärmekapazität von Maissilage gemischt mit Rindergülle

Die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Maissilage gemischt mit Rindergülle bei einem TR-Gehalt von 12,2 % hat sich als problematisch erwiesen.

In Abbildung 4.5 ist erkennbar, dass diese Probe sehr viel mehr Stückchen und Fasern beinhaltet als Rindergülle.



Abbildung 4.5: Maissilage gemischt mit Rindergülle

Ein großer Teil der Fasern kommt aus der Maissilage. Es war nicht möglich die Probe zuvor mit dem Fleischwolf zu zerkleinern, da dieser immer wieder verstopft und blockiert ist. Daher wurde der Versuch analog zu den vorangegangenen Versuchen, aber mit der nicht veränderten Probe, wie in Abbildung 4.5 zu sehen ist, durchgeführt. Die Probe ist bevor das Kalorimeter verschlossen wurde, mit einem in einen Akkuschauber eingespannten Wendelrührer vermischt worden.

Mit dem vorhandenen Equipment kann die spezifische Wärmekapazität von Maissilage gemischt mit Rindergülle nicht bestimmt werden. Dies liegt an den in größerer Menge vorhandenen Fasern und Stückchen. Die Messwerte sind in Tabelle (A.10) niedergeschrieben.

Wie in Abbildung (4.6) zu erkennen ist, konnte trotz eines verstärkten Rührens die Wärme nicht im Kalorimeter verteilt werden.

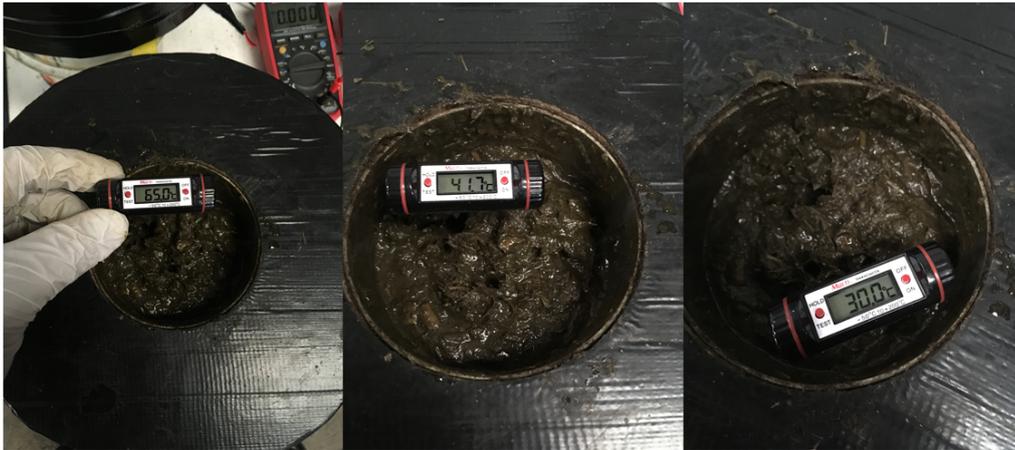


Abbildung 4.6: Temperaturunterschied im Kalorimeter nach Beendigung des Versuches (Links: Position des Tauchsieders, Mitte: unmittelbar unterhalb des Tauchsieders, Rechts: 4cm neben dem Tauchsieder

Um die Wärme des Tauchsieders dennoch gleichmäßig in eine so faserige und Stückchen-behaftete Probe einzubringen, wird Folgendes empfohlen: Die Verwendung eines leistungstärkeren Zerkleinerungsmechanismus und den Handblattrührer durch einen elektrisch angetriebenen Propellerührer, für eine bessere Durchmischung (zusätzlich in der vertikalen Ebene), zu ersetzen.

4.3.4 Spezifische Wärmekapazität von Rezirkulat

Das Rezirkulat ist ebenso wie die Mischung aus Maissilage und Gülle nicht zerkleinert worden, da die Leistung des Fleischwolfs nicht ausreichend gewesen ist. Wie im zuvor beschriebenen Versuch ist das gleichmäßige Einbringen der Energie in die Probe nicht möglich. In Abbildung 4.7 ist der Temperaturverlauf über der Zeit dargestellt. Bei $t = 780 \text{ s}$ ist der Tauchsieder eingeschaltet worden, trotzdem fällt die Temperatur weiter ab. Die Temperatur hat sich trotz der starken Vermischung noch nicht homogen in der Probe verteilt. Bei $t = 1320 \text{ s}$ ist ein deutlicher Sprung in der Temperatur zu erkennen. In Abbildung 4.7 ist der Temperaturverlauf des Versuches über der Zeit dargestellt.

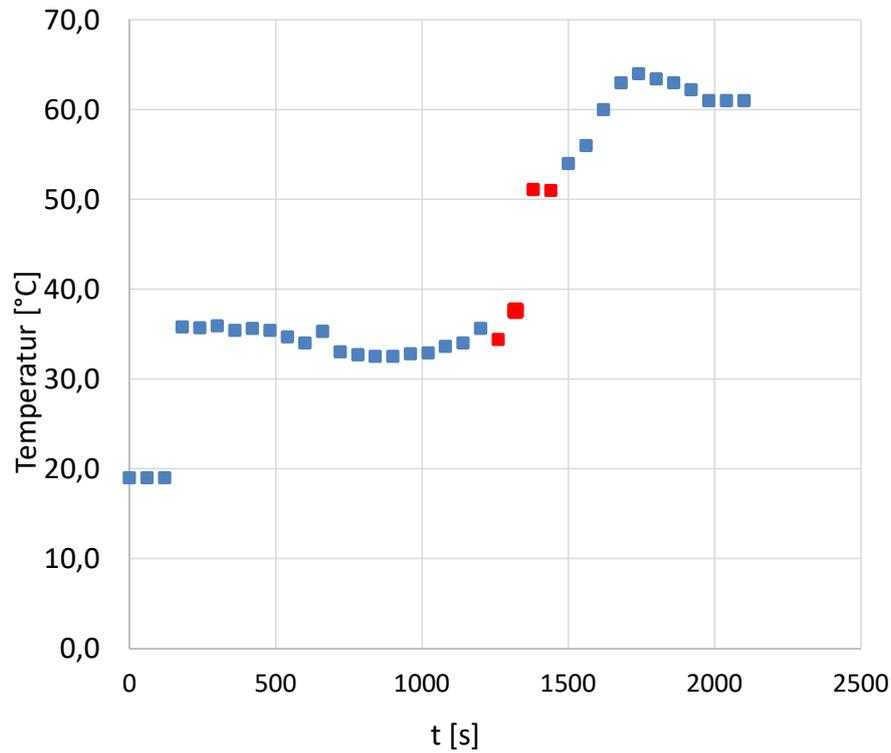


Abbildung 4.7: Temperaturverlauf von Rezirkulat mit deutlichen Temperatursprung (rote Messpunkte)

Trotz eines konstanten Rührens muss sich ein Klumpen innerhalb der Probe vom Tauchsieder in Richtung Thermometer gelöst haben und den Temperaturanstieg verursacht haben. (Siehe rote markierte Datenpunkte.) Anschließend ist weiterhin nur ein geringer Temperaturanstieg vorhanden. Bei $t = 2100 \text{ s}$ ist die Messung beendet worden. Die aufgenommenen Messwerte sind in der Tabelle (A.11) im Anhang dokumentiert. Die aufgenommenen Werte werden als nicht aussagekräftig (evtl. besseres Wort) eingestuft. Es ist keine spezifische Wärmekapazität aus den aufgenommenen Werten errechnet worden.

Des Weiteren ist in der Abbildung 4.8 zu erkennen, wie dick das Substrat ist und das eine Durchmischung mit einem Blattrührer sehr unwahrscheinlich ist.



Abbildung 4.8: Kalorimeter mit Rezirkulat

Die vom Tauchsieder erzeugte Wärme kann folglich nicht homogen in das Substrat eingebracht werden. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass auf Grund der geringen Durchmischung, wie in Abbildung 4.9 zu erkennen ist, es zu einem Anbrennen des Rezirkulat an dem Tauchsieder kommt.



Abbildung 4.9: Tauchsieder mit angebranntem Rezirkulat

Dies hat zusätzlich das zuverlässige einbringen der Energie verhindert. Es wird daher empfohlen, dass der Apparat um einen elektrischen Propellerrührer erweitert wird, um eine ausreichende Durchmischung in dem Behälter sicherzustellen.

Es kann an dieser Stelle keine Abhängigkeit zwischen der spezifischen Wärmekapazität und dem

TR-Gehalt hergeleitet werden. Grund ist der Mangel an gewonnenen Stoffwerten. Dies ist auf ein nicht für die Substrate richtig angepasster Versuchsaufbau zurückzuführen. In der Literatur sind gibt *Gerber* Werte von $3,9 - 4,1 \frac{kJ}{kgK}$ an[16].

4.4 Wärmeleitfähigkeit

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ist mit den in Kapitel 3.2.4 beschrieben mathematischen Gesetzmäßigkeiten durchgeführt worden. Es wird das beschriebene Equipment genutzt, um die Messwerte aufzunehmen.

Die Wärmeleitfähigkeit ist von Rindergülle, Maissilage gemischt mit Rindergülle und von Rezirkulat bestimmt worden. Alle Proben stammen aus der BGA Gnutz.

Mit dem verwendeten Versuchsaufbau war es nicht möglich Wasser als Vergleichsmedium, zu nutzen. Durch den Temperaturunterschied zwischen der Probe und dem Wasserbad ist es zu einer Verwirbelung des Probeninneren gekommen. Dies lässt sich durch die, von der Temperatur abhängige Dichte, des Wassers erklären. Aus zeitlichen Gründen ist es nicht möglich gewesen alle zuvor betrachteten Substrate, zu untersuchen. Es ist hier der Fokus auf das Rezirkulat gelegt worden.

4.4.1 Wärmeleitfähigkeit von Rezirkulat

Bei dem untersuchten Substrat handelt es sich um Rezirkulat aus der BGA Gnutz. Die Dichte des Rezirkulats ist zuvor zu $867,68 \frac{kg}{m^3}$ bestimmt worden. Nach *Gerber* liegt die spezifische Wärmekapazität von Rezirkulat zwischen $3,9$ und $4,1 \frac{kJ}{kgK}$ [16]. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wird eine spezifische Wärmekapazität von $3,9 \frac{kJ}{kgK}$ angenommen.

Die geometrischen Abmessungen des Probenbehälters sind:

- $D = 0,1 m$
- $H = 0,112 m$
- $X = 0,056 m$

Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ist der Zeitpunkt $\tau = 1080 s$ gewählt worden. Es haben sich zu diesem Zeitpunkt folgende Temperaturen in dem Probekörper eingestellt:

- $\vartheta_0 = 20,8^\circ\text{C}$
- $\vartheta_{Fl} = 57,7^\circ\text{C}$
- $\vartheta_R = 50,0^\circ\text{C}$
- $\vartheta_Z = 43,9^\circ\text{C}$

Die kalorische Mitteltemperatur berechnet sich nach Gl. 3.14 zu $\bar{\Theta} = 0,2824$. Die Wärmeleistung beträgt, bestimmt nach Gl. 3.15 $\dot{Q} = 42,74\text{ W}$. Der Wärmeübergangskoeffizient α_a wird wiederum mit Gl. 3.16 zu $\alpha_a = 109,54 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ bestimmt. Aus X der charakteristischen Längeneinheit und der Temperaturleitfähigkeit a , die nach Gl. 3.12 zu $a = 1,657 \cdot 10^{-7}$ bestimmt worden ist, wird die Fourier-Zahl nach Gl. 3.10 zu $Fo = 0,0570$ bestimmt. Für die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit ist eingangs eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,5 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ angenommen worden. Mit der Fourier-Zahl und der kalorischen Mitteltemperatur wird aus dem Diagramm E 2 Abb. 6 (siehe Abbildung A.1 im Anhang) die Biot-Zahl abgelesen. Für den beschriebenen Fall ist die Biot-Zahl $Bi = 8,4$ abgelesen worden. Mit der Gleichung für die Biot-Zahl, umgestellt nach Gl. 3.17, wird die Wärmeleitfähigkeit zu $\lambda = 0,652 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bestimmt.

Der bestimmte Wert der Wärmeleitfähigkeit ist nach einigen Iterationen mit einem angepassten Startwert für die Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,63 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bestimmt worden.

Nach *Gerber* ist für Rezirkulat ein Wert zwischen $0,578$ und $0,616 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ je nach TR-Gehalt und der Zusammensetzung des Substrat möglich [16]. Dieser Wert wird für eine spezifische Anlage angegeben. Daher hat das, in dieser Arbeit untersuchte Substrat, unter hoher Wahrscheinlichkeit eine andere Zusammensetzung. Daher wird der bestimmte Wert für die Wärmeleitfähigkeit von Rezirkulat als realistisch angenommen.

Es kann, aufgrund mangelnder Ergebnisse, an dieser Stelle keine Abhängigkeit zwischen dem TR-Gehalt und der Wärmeleitfähigkeit angegeben werden.

4.5 Viskosität

Die Bestimmung der Viskosität ist nach dem in Kapitel 3.2.5 beschriebenen Versuch und Equipment durchgeführt worden.

Die Viskosität ist zum Einen von Rezirkulat und Rindergülle aus der BGA Gnutz und zum Anderen von einer selbst hergestellten Suspension aus Maissilage und Rindergülle bestimmt worden. Ferner handelt es sich bei der Suspension um die bereits zuvor untersuchte Probe 6.

Die Rückrechnung der Viskosität von dem für die Bestimmung des Anlagenparameters genutzten Hydraulik Öl, hat bei einer Mittelung der Ergebnisse einen relativen Fehler von ca. 1,67% ergeben. Für die weiterführenden Berechnungen (Auslegung der erforderlichen Anlagenteile einer BGA) ist diese erreichte Genauigkeit ausreichend. Die Erfahrung besagt, dass eine Abweichung von $\pm 8\%$ immer noch ausreichend gute Ergebnisse erwarten lässt [7]. Als Maßgeblich ist jeweils der letzte Wert der Spalte η_S , der Tabelle zu betrachten, da dies der Zustand ist in dem das Rührwerk nominell läuft. Durch die nicht mehr steigenden Leistung wird eine konstante scheinbare Viskosität bestimmt.

4.5.1 Viskosität von Rindergülle

In der Tabelle 4.8 sind die Messreihen für die Bestimmung der Viskosität von Rindergülle erfasst. Die Messwerte der Drehzahl n , der Spannung U und des Stroms I sind Mittelwerte, die aus den Messwerten die in den Tabellen A.20, A.21 und A.22 im Anhang, gebildet worden sind. In den Spalten U_L und I_L sind die Drehzahl abhängigen und linearisierten Werte für Spannung und Strom aufgetragen. Es haben sich für die durchgeführten Regressionen, um die Spannung U und dem Strom I zu linearisieren, ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,999$ für die Spannung und $R^2 = 0,407$ für den Strom ergeben. Die große Ungenauigkeit der Messwerte für den Strom hängen vermutlich mit der einfach und ungenauen Messtechnik des FU's zusammen. Da zum Zeitpunkt des Versuchs keine andere Messtechnik zur Verfügung stand, kann diese These nicht bestätigt oder widerlegt werden. Alle weiteren Größen sind nach den Gleichungen aus Kapitel 3.2.5 berechnet worden.

Die untersuchte Suspension weist folgende Stoffwerte auf:

- $TR = 8,6\%$
- $\rho = 1039,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $c_p = 3,973 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

- $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Messpunkt	$n \left[\frac{1}{min} \right]$	$U[V]$	$I[A]$	$U_L = f(n)[V]$	$I_L = f(n)[A]$	$P_L[W]$	$(1 - C)$	$P_Z[W]$	Ne	Re	$\eta_S[Pa \cdot s]$
1	8,40	58,33	0,22	59,39	0,21	12,57	0,00131	0,01643	25,03	2,84	1,8926
2	12,53	80,00	0,21	79,22	0,21	16,63	0,00168	0,02797	12,83	10,73	0,7478
3	17,03	101,00	0,21	100,80	0,21	20,99	0,00211	0,04423	8,08	26,86	0,4059
4	21,43	122,00	0,20	121,91	0,21	25,16	0,00254	0,06403	5,87	50,68	0,2707
5	25,87	143,33	0,20	143,17	0,20	29,30	0,00300	0,08802	4,59	82,60	0,2005
6	30,30	164,67	0,20	164,44	0,20	33,36	0,00348	0,11620	3,77	122,13	0,1588
7	34,70	185,67	0,20	185,54	0,20	37,32	0,00398	0,14844	3,21	168,45	0,1319
8	39,17	206,67	0,21	206,96	0,20	41,26	0,00450	0,18566	2,79	222,28	0,1128
9	43,60	228,00	0,20	228,23	0,20	45,09	0,00504	0,22718	2,47	282,06	0,0990

Tabelle 4.8: Ergebnisse für die Bestimmung der Viskosität von Rindergülle

Die untersuchte Rindergülle weist eine scheinbare Viskosität von $\eta_S = 99 \text{ mPas}$ auf. Aufgrund mangelnder Literaturwerte ist es nicht möglich eine Aussage über die Richtigkeit dieses Wertes zu treffen.

4.5.2 Viskosität von Maissilage gemischt mit Rindergülle

Analog zu 4.5.1 sind in der Tabelle 4.9 die Messreihen für die Bestimmung der Viskosität der selbst hergestellter Mischung aus Maissilage und Rindergülle erfasst. Die Messwerte der Drehzahl n , der Spannung U und des Stroms I sind Mittelwerte, die aus den Messwerten die in den Tabellen A.17, A.18 und A.19 im Anhang, gebildet worden sind. Für die für Maissilage gemischt mit Rindergülle ebenfalls durchgeführten Regressionen, für die Spannung U_L und den Strom I_L , hat sich für die Spannung erneut ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,999$ ergeben. Das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,131$ für die Regression der Messwerte des Stroms ist wesentlich geringer, als bei dem vorherigen Versuch. Dies liegt vermutlich einerseits an der vorhandenen bzw. nicht vorhandenen Messtechnik und andererseits an der noch inhomogeneren Suspension als reiner Rindergülle. Alle weiteren Größen sind nach den Gleichungen aus Kapitel 3.2.5 berechnet worden.

Die Suspension weist folgende Stoffwerte auf:

- $TR = 11,6 \%$
- $\rho = 967,83 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $c_p = -$
- $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Messpunkt	$n \left[\frac{1}{min} \right]$	$U[V]$	$I[A]$	$U_L = f(n)[V]$	$I_L = f(n)[A]$	$P_L[W]$	$(1 - C)$	$P_Z[W]$	Ne	Re	$\eta[Pa\cdot s]$
1	7,90	59,00	0,22	61,39	0,22	13,33	0,00126	0,01684	30,84	1,88	2,4475
2	11,83	81,00	0,22	80,23	0,22	17,40	0,00162	0,02812	15,32	7,53	0,9133
3	15,93	102,33	0,22	99,88	0,22	21,62	0,00200	0,04327	9,66	18,85	0,4913
4	20,87	123,67	0,21	123,53	0,22	26,67	0,00249	0,06633	6,59	40,27	0,3012
5	25,27	144,67	0,21	144,61	0,22	31,16	0,00294	0,09163	5,13	66,30	0,2215
6	29,73	166,33	0,21	166,02	0,22	35,70	0,00342	0,12211	4,19	98,87	0,1748
7	34,17	185,33	0,21	187,26	0,21	40,18	0,00392	0,15740	3,56	136,72	0,1453
8	38,60	209,00	0,22	208,51	0,21	44,65	0,00443	0,19793	3,11	179,45	0,1250
9	43,07	230,00	0,22	229,91	0,21	49,13	0,00497	0,24431	2,76	226,84	0,1104

Tabelle 4.9: Ergebnisse für die Bestimmung der Viskosität von Maissilage gemischt mit Rindergülle

Die untersuchte Rindergülle weist eine scheinbare Viskosität von $\eta_S = 110 \text{ mPas}$ auf. Dies erscheint als sinnvoll, da die Rindergülle zusätzlich mit Maissialge gemischt worden ist. Die Probe hat einen höheren TR-Gehalt als reine Rindergülle, zudem erscheint sie als höher viskos, wenn sie mit einem Rührstab durchmischt wird. Aufgrund mangelnder Literaturwerte ist es auch hier nicht möglich eine Aussage über die Richtigkeit dieses Wertes zu treffen.

4.5.3 Viskosität von Rezirkulat

Die Probe des Rezirkulats aus der BGA Gnutz ist analog zu den vorherigen behandelt worden. Die in Tabelle 4.10 niedergeschriebenen Werte für die Drehzahl n , die Spannung U und den Strom I sind gebildete Mittelwerte aus den Tabellen A.23, A.24 und A.25. Die auch für Rezirkulat durchgeführte Linearisierung weist für die Regression durchgeführt für die Spannungswerte ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,998$ und für die Stromwerte von $R^2 = 0,443$. Die Abweichungen des Modells für die Strommesswerte sind erneut vermutlich durch die unzureichend genaue Messtechnik erklärbar. Alle weiteren Größen sind nach den Gleichungen aus Kapitel 3.2.5 berechnet worden.

Die Suspension weist folgende Stoffwerte auf:

- $TR = 8,6 \%$
- $\rho = 867,68 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $c_p = -$
- $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Messpunkt	$n \left[\frac{1}{min} \right]$	$U[V]$	$I[A]$	$U_L = f(n)[V]$	$I_L = f(n)[A]$	$P_L[W]$	$(1 - C)$	$P_Z[W]$	Ne	Re	$\eta [Pas]$
1	8,27	59,33	0,22	62,85	0,22	13,57	0,00130	0,01758	28,10	2,26	1,9110
2	11,57	80,67	0,22	78,61	0,21	16,90	0,00159	0,02690	15,70	7,18	0,8408
3	16,03	104,33	0,21	99,95	0,21	21,35	0,00201	0,04294	9,41	19,87	0,4212
4	21,37	123,67	0,21	125,42	0,21	26,59	0,00254	0,06747	6,24	44,83	0,2488
5	25,73	145,67	0,21	146,28	0,21	30,82	0,00299	0,09214	4,88	73,13	0,1837
6	30,17	166,67	0,21	167,46	0,21	35,06	0,00347	0,12159	4,00	108,70	0,1449
7	34,60	188,33	0,21	188,63	0,21	39,24	0,00397	0,15565	3,39	150,70	0,1199
8	39,03	210,00	0,21	209,81	0,21	43,37	0,00448	0,19447	2,95	198,63	0,1026
9	43,47	231,33	0,21	230,99	0,21	47,44	0,00502	0,23822	2,62	252,03	0,0900

Tabelle 4.10: Ergebnisse für die Bestimmung der Viskosität von Rezirkulat

Die scheinbare Viskosität für Rezirkulat ist zu $\eta_S = 90 \text{ mPas}$ bestimmt worden. Es kann auch hier keine Aussage über die Korrektheit des Werts getroffen werden, da auch für Rezirkulat aus BGA's keine Literaturwerte vorliegen. Die Größenordnung, im Vergleich zu Maissilage gemischt mit Rindergülle und reiner Rindergülle erscheint korrekt. Rezirkulat besteht zu einem Teil aus den gefütterten Substraten aber auch aus durch die Bakterien bereits abgebauten Gärrest. Es ist daher anzunehmen, dass der flüssigere Gärrest die Viskosität verringert.

5 Auslegung eines Wärmeübertragers

Im Anlagenbau der Biogastechnologie werden verschiedene Arten von Wärmeübertragern verwendet, wie zum Beispiel: Doppelrohrwärmeübertrager, Doppelhelixwärmeübertrager, Rohrbündelwärmeübertrager, Rührbehälter mit Außenmantel und einige Weitere. Plattenwärmeübertrager sind im Bereich der Substraterwärmung nicht einsetzbar, da sie typischerweise sehr geringe Abstände, sowie viele enge Umlenkungen zwischen den einzelnen Platten haben. Laut *Holger Martin* sind 4 mm als Spaltweite ein gängiges Maß [23]. Diese würden sich mit den im Substrat vorhandenen Fasern und Stückchen allerdings schnell zusetzen und eine zuverlässige Einbringung der Wärme durch eine Reduzierung des Massenstroms verhindern. Die benötigte Wärmeübertragungsfläche hängt von vielen Faktoren ab, wie zum Beispiel von denen welche im Umfang dieser Arbeit bestimmt worden sind. Des Weiteren wird die Auslegung eines Wärmeübertragers wird mit einer zu großen Sicherheit gerechnet. Dies wird am folgenden Beispiel gezeigt.

Zeichen	Bedeutung	Einheit
ρ	Dichte	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
c_p	Spezifische Wärmekapazität	$\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
η	dynamische Viskosität	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
λ	Wärmeübergangskoeffizient	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$

Tabelle 5.1: Stoffwerte zur Wärmeübertragerauslegung

Wie Eingangs bereits erwähnt sind in der Literatur kaum definierte Zahlenwerte für die in der Tabelle 5.1 genannten Stoffwerte vorhanden. Bislang ist die Auslegung eines Wärmeübertragers mit Erfahrungswerten ausgeführt worden [7]. Im Folgenden ist exemplarisch ein Doppelrohrwär-

meübertrager mit außenliegender Wärmedämmung, mit Erfahrungswerten und mit den in dieser Ausarbeitung bestimmten Werten, berechnet worden. Es soll sich um ein Wärmeübertrager zur Beheizung eines Fermenters mit einer Leistung von 300 kW handeln. Bei dem Sekundärstrom handelt es sich um Rezirkulat aus dem Fermenter. Für die Berechnung eines Doppelrohrwärmeübertragers sind zwei verschiedene Fälle der Wärmübertragung zu betrachten. Zum einen der Fall der „Durchströmten Rohre“ nach Kapitel G 1 und zum anderen der Fall des „konzentrischen Ringspalts“ nach Kapitel G 2 aus dem VDI Wärmeatlas [30]. Abbildung 5.1 zeigt den Aufbau eines Doppelrohrwärmeübertragers mit allen relevanten Größen.

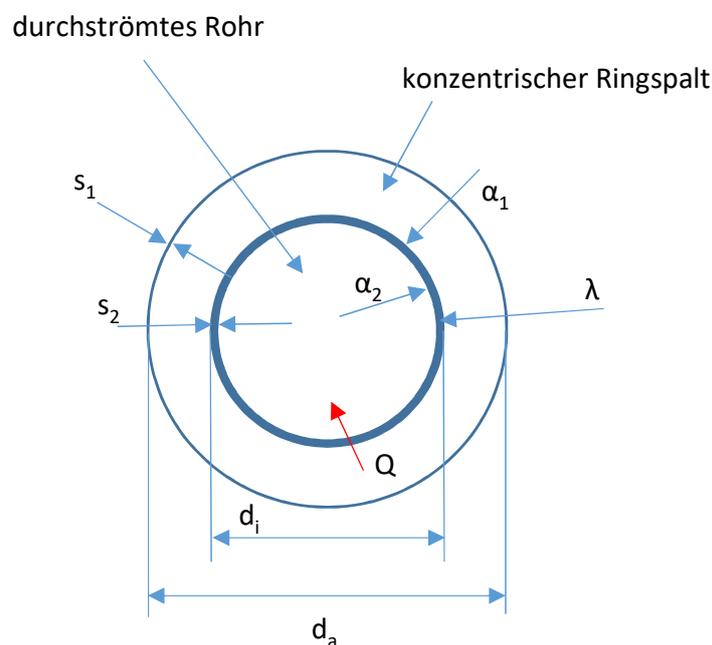


Abbildung 5.1: Größen am Doppelrohrwärmeübertrager

5.1 Berechnung Doppelrohrwärmeübertrager mit Erfahrungswerten

In Tabelle 5.2 sind alle für die Auslegung relevanten Werte niedergeschrieben. Die Abmessung des Wärmeübertragers entsprechen den typischerweise von der Firma FFE Solutions GmbH verwendeten Doppelrohrwärmeübertragern. Die Volumenströme sowie die Werte für Wasser entsprechen Werten aus der Literatur. Die Stoffwerte für das Substrat sind Erfahrungswerte die so zum Einsatz kommen.

Größe	Wert	Einheit
d_i	60,3	<i>mm</i>
d_a	114,3	<i>mm</i>
s	2,6	<i>mm</i>
l	200,0	<i>m</i>
$\lambda_{Material}$	21	<i>W/mK</i>
$\dot{V}_{1,S}$	40	<i>m³/h</i>
$\dot{V}_{2,W}$	30	<i>m³/h</i>
ϑ'_1	30,0	<i>°C</i>
ϑ'_2	80,0	<i>°C</i>
λ_{Wasser}	0,644	<i>W/mK</i>
$\lambda_{Substrat}$	0,67	<i>W/mK</i>
$c_{p,Wasser}$	4,18	<i>kJ/kgK</i>
$c_{p,Substrat}$	3,95	<i>kJ/kgK</i>
ρ_{Wasser}	985,23	<i>kg/m³</i>
$\rho_{Substrat}$	985	<i>kg/m³</i>
η_{Wasser}	0,33	<i>mPas</i>
$\eta_{Substrat}$	300	<i>mPas</i>
$P_{W\ddot{U}}$	300	<i>kW</i>

Tabelle 5.2: Werte Wärmeübertrageauslegung

Die Vorlauf Temperatur des Substrats auf der Sekundärseite ϑ'_1 des Wärmeübertragers ist ein typischer Werte aus dem Anlagenbau der Biogastechnik und ergibt sich aus dem für das Substrat gefahrenen Temperaturbereich. Die Temperatur ϑ''_1 am Austritt der Sekundärseite des Wärmeübertragers errechnet sich nach Gl. 5.1 aus den gegebenen Stoffwerten aus Tabelle 5.2.

$$\vartheta''_i = \frac{\dot{Q}}{\dot{V}_{1,n} \rho_n c_{p,n}} + \vartheta'_i \quad (5.1)$$

Die Austrittstemperatur auf der Wasserseite errechnet sich eben so nach Gl. 5.1.

Die für die Berechnung verwendeten Stoffwerte sind auf die mittlere Fluidtemperatur (Gl. 5.2) bezogen.

$$\vartheta_{m,i} = \frac{\vartheta'_i + \vartheta''_i}{2} \quad (5.2)$$

Die Berechnung für den jeweiligen Fall werden im Folgenden nacheinander erläutert.

Nachfolgend wird die Rechnung für das durchströmte Rohr ausgeführt.

Eingangs ist zu prüfen, welche Art von Strömung vorliegt. Es sind drei verschiedene Fälle möglich.

Die hydrodynamische laminare Strömung, der Übergang zwischen der laminaren und der voll turbulenten Strömung, sowie die voll turbulente Strömung. Diese wird anhand der Größenordnung der Reynolds-Zahl nach Gl. (5.3) geprüft. Die folgenden Bereiche gelten für die Reynolds-Zahlen:

- Laminare Strömung $Re \leq 2300$
- Übergangsbereich zwischen laminarer und voll ausgebildeter turbulenter Strömung $2300 < Re < 10^4$
- Übergangsbereich zwischen laminarer und voll ausgebildeter turbulenter Strömung $Re \geq 10^4$

$$Re = \frac{w d_i \rho}{\eta} \quad (5.3)$$

Mit den Werten aus der Tabelle 5.2 ergibt sich mit Gl. 5.3 eine Reynolds-Zahl von $Re = 737$. Es liegt somit laminare Strömung vor.

Die Rechnungen für den Fall des durchströmten Rohrs mit laminarer Strömung wird in folgenden Schritten durchgeführt:

Für die Wärmeübertragung bei laminarer Strömung ist die Gl. 5.4 mit $Nu_{m,q,1}^3$ nach Gl. 5.5 und $Nu_{m,q,2}$ nach Gl. 5.6 für die mittlere Nusselt-Zahl angegeben.

$$Nu_{m,\vartheta} = \left[Nu_{m,q,1}^3 + 0,6^3 + (Nu_{m,q,2} - 0,6)^3 \right]^{1/3} \quad (5.4)$$

$$Nu_{m,q,1} = 4,364 \quad (5.5)$$

$$Nu_{m,q,2} = 1,953 \left(Re Pr \frac{d_i}{l} \right)^{1/3} \quad (5.6)$$

Gl. 5.4 gilt mit Abweichungen $< 1\%$ im gesamten Bereich $0 < Re Pr d_i/l < \infty$

Die Prandtl-Zahl Pr errechnet sich nach Gl. 5.7 die Reynolds-Zahl Re nach Gl. 5.3.

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (5.7)$$

Für das Verhältnis von d_i/l wird die Eingangs angenommene Länge des Wärmeübertragers genutzt.

Die für das durchströmte Rohr mittlere Nusselt-Zahl aus Gl. 5.4, wird in die allgemeine Gl. 5.8 für die Nusselt-Zahl eingesetzt und nach α dem Wärmeübergangskoeffizienten (Gl. 5.9) umgestellt.

$$Nu_{m,T} = \frac{\alpha d_i}{\lambda} \quad (5.8)$$

$$\alpha = \frac{Nu_{m,T} \lambda}{d_i} \quad (5.9)$$

Im folgenden Teil ist die Rechnung für den Wärmeübergangskoeffizient des konzentrischen Ringspalts behandelt.

Anders als im durchströmten Rohr ist die charakteristische Abmessung beim konzentrischen Ringspalt der hydraulische Durchmesser und nach Gl. 5.10 zu berechnen.

$$d_h = d_a - d_i \quad (5.10)$$

Es gelten analog zum durchströmten Rohr die drei Fälle für die Strömungsprofile:

- Laminare Strömung $Re \leq 2300$
- Übergangsbereich zwischen laminarer und voll ausgebildeter turbulenter Strömung $2300 < Re < 10^4$
- Übergangsbereich zwischen laminarer und voll ausgebildeter turbulenter Strömung $Re \geq 10^4$

Nach Gl. 5.11 wird bestimmt, um welche Art von Strömung es sich handelt.

$$Re = \frac{w d_h \rho}{\eta} \quad (5.11)$$

Mit den Werten aus Tabelle 5.2 und Gl. 5.11 ergibt sich eine $Re = 181429$.

Mit $181429 > Re \geq 10^4$ liegt voll ausgebildete turbulente Strömung vor.

Für die voll ausgebildete turbulente Strömung im konzentrischen Ringspalt berechnet sich die Nusselt-Zahl nach Gl. 5.12.

$$Nu_{m,T} = \frac{(\zeta_{Rsp}/8) Re Pr}{k_1 + 12,7\sqrt{\zeta_{Rsp}/8}(Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d_h}{l} \right)^{2/3} \right] F_{Rsp} \quad (5.12)$$

Mit folgenden Kriterien ist der Gültigkeitsbereich der Gleichungen zu prüfen: $10^4 \leq Re \leq 10^6$; $0,6 \leq Pr \leq 1000$; $0 \leq (d_h/l) \leq 1$.

Die Prandtl-Zahl berechnet sich analog zum durchströmten Rohr nach Gl. 5.13.

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (5.13)$$

Der Faktor k_1 wird nach Gl. 5.14 berechnet.

$$k_1 = 1,07 + \frac{900}{Re} - \frac{0,63}{(1 + 10 Pr)} \quad (5.14)$$

Der Druckverlustbeiwert nach Gl. 5.15 im konzentrischen Ringspalt wird mit Re^* nach Gl. 5.16 berechnet und ist vom Durchmesser Verhältnis $a = d_i/d_a$ abhängig.

$$\zeta_{Rsp} = (1,8 \log_{10}(Re^*) - 1,5)^{-2} \quad (5.15)$$

$$Re^* = Re \frac{[1 + a^2] \ln a + [1 - a^2]}{[1 - a^2] \ln a} \quad (5.16)$$

$F_{Rsp,i}$ wird für den Fall, dass die Wärme an der Außenseite des Innenrohrs übertragen wird und das Außenrohr wärme gedämmt ist erneut mit dem Durchmesser Verhältnis $a = d_i/d_a$ nach Gl. 5.17 berechnet.

$$F_{Rsp,i} = 0,75 a^{-0,17} \quad (5.17)$$

Die nach Gl. 5.12 bestimmte Nusselt-Zahl wird in die allgemeine Gleichung der Nusselt-Zahl (Gl. 5.18) eingesetzt und nach α (Gl. 5.19) umgestellt.

$$Nu_{m,T} = \frac{\alpha d_h}{\lambda} \quad (5.18)$$

$$\alpha = \frac{Nu_{m,T}}{d_h \lambda} \quad (5.19)$$

In Tabelle 5.3 sind alle für den Fall der Wärmeübertragung am konzentrischen Ringspalt bestimmten Werte niedergeschrieben.

Größe	Wert	Einheit
d_h	54	<i>mm</i>
Re	181429,674	[–]
Pr	2,145	[–]
k_1	1,047	[–]
Re^*	121765,6401	[–]
ζ	0,017	[–]
$F_{Rsp,i}$	0,836	[–]

Tabelle 5.3: Wert aus der Rechnung für den konzentrischen Ringspalt

Nach Kapitel G 2 und Gl. 9 des VDI Wärmeatlas [vgl. 30] berechnet sich der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient, mit den zuvor bestimmten Wärmeübergangskoeffizienten α_1, α_2 , der Materialstärke des Rohres s mit der entsprechenden Wärmeleitfähigkeit λ , nach Gl. 5.20.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (5.20)$$

Mit dem mittleren Wärmeübergangskoeffizienten k , dem Wärmestrom \dot{Q} und der logarithmischen Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{ln}$ kann an Stelle von Gl. 5.21 auch Gl. 5.22 geschrieben werden.

$$\dot{Q} = c_p \dot{m} \Delta\vartheta \quad (5.21)$$

$$\dot{Q} = A k \Delta \vartheta_{ln} \quad (5.22)$$

Gl. 5.22 wird für die Berechnung der Wärmeübertragerfläche nach Gl. 5.23 umgestellt [vgl. 30, Kap. C1].

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \Delta \vartheta_{ln}} \quad (5.23)$$

Die logarithmische Temperaturdifferenz wird nach Gl. 5.24 berechnet.

$$\Delta \vartheta_{ln} = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}} \quad (5.24)$$

Mit der Gleichung für die Mantelfläche eines Zylinders kann, diese nach der Länge umgestellt, nach Gl. 5.25 die benötigte Rohrlänge des Wärmeübertragers errechnet werden.

$$l = \frac{A}{d_i \pi} \quad (5.25)$$

In Tabelle 5.4 sind die errechneten Werte aus fünf Iterationsschritten niedergeschrieben.

	Einheit	Iterationsschritt				
		1	2	3	4	5
Länge Doppelrohr	m	240,980	255,829	260,779	262,385	262,901
$Nu_{m,T}$ durchströmtes Rohr	–	13,639	12,811	12,557	12,476	12,451
α_1	$W/m^2 \cdot K$	165,845	155,775	152,685	151,709	151,398
$Nu_{m,T}$ konzentrischer Ringspalt	-	485,558	485,322	485,252	485,230	485,224
α_2	$W/m^2 \cdot K$	5781,737	5778,926	5778,096	5777,837	5777,755
k	$W/m^2 \cdot K$	158,065	148,890	146,064	145,170	144,885
$A_{Wü}$	m^2	45,651	48,464	49,401	49,706	49,803

Tabelle 5.4: Iterationsschritte zur Berechnung der Doppelrohrlänge mit „Erfahrungswerten“

Die Iteration ist nach dem fünften Iterationsschritt abgebrochen worden, da die einzelnen Rohr-

stücke für einen Doppelrohrwärmeübertrager diesen Typ haben typischerweise eine Länge von 6 m haben und sich nur noch eine Änderung um 1 m ergeben hat. Die benötigte Rohrlänge von $\approx 262\text{ m}$ ergibt, dass der Wärmeübertrager aus 44 Rohrstücken zu je 6 m gefertigt werden muss.

5.2 Berechnung Doppelrohrwärmeübertrager mit ermittelten Werten

In diesem Kapitel wird ein Doppelrohrwärmeübertrager analog zu der Rechnung aus Kapitel 5.1 berechnet.

In Tabelle 5.5 sind alle für die Rechnung relevanten Werte niedergeschrieben, diese unterscheiden sich in den Stoffwerten.

Größe	Wert	Einheit
d_i	60,3	mm
d_a	114,3	mm
s	2,6	mm
l	10,0	m
$\lambda_{Material}$	21	W/mK
$\dot{V}_{1,S}$	40	m^3/h
$\dot{V}_{2,W}$	30	m^3/h
ϑ'_1	30,0	$^{\circ}C$
ϑ'_2	80,0	$^{\circ}C$
λ_{Wasser}	0,644	W/mK
$\lambda_{Substrat}$	0,65	W/mK
$c_{p,Wasser}$	4,18	kJ/kgK
$c_{p,Substrat}$	3,9	kJ/kgK
ρ_{Wasser}	985,23	kg/m^3
$\rho_{Substrat}$	867,68	kg/m^3
η_{Wasser}	0,33	$mPas$
$\eta_{Substrat}$	90	$mPas$
$P_{W\ddot{U}}$	300	kW

Tabelle 5.5: Werte Wärmeübertrageauslegung

Die Substrat- und Wasseraustrittstemperatur errechnen sich analog zu den Gleichungen aus

Kapitel 5.1. Ebenfalls wird analog zu Kapitel 5.1 die vorliegende Strömungsart geprüft. Durch die geringer angenommene Viskosität von hier nur $\eta_{Substrat} = 90 \text{ mPas}$ ergibt sich eine andere Reynolds-Zahl und damit eine andere Strömungsart. Eine Reynolds-Zahl > 2300 , in diesem Fall $Re = 2458$ lässt auf eine Strömung im Übergangsbereich zwischen turbulent und laminar schließen. Im Nachfolgenden wird der Fall für das durchströmte Rohr betrachtet.

Die Nusselt-Zahl für den Fall des durchströmten Rohrs im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung wird nach Gl. 5.26 berechnet.

$$Nu_{m,T,10^4} = \frac{(0,0308/8) 10^4 Pr}{1 + 12,7 \sqrt{0,0308/8} (Pr^{2/3} - 1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{l} \right)^{2/3} \right] \quad (5.26)$$

Der Gültigkeitsbereich für Gl. 5.26 ist wie folgt definiert:

$$2300 \leq Re \leq 10^4; \quad 0,6 \leq Pr \leq 1000; \quad d_i/l \leq 1$$

Mit $Re = 2458$, $Pr = 585$ und $d_i/l = 0,003015$ ist die Gleichung gültig. Die Prandtl-Zahl berechnet sich nach Gl. 5.7. $Nu_{m,T,10^4}$ kann in Gl. 5.27 eingesetzt und nach α umgestellt werden.

$$Nu_m = \frac{\alpha d_i}{\lambda} \quad (5.27)$$

Für die Wasserseite des Wärmeübertragers hat sich an dem Berechnungsmodus nichts verändert. Der Wärmeübergangskoeffizient wird analog zu der Vorgehensweise wie in Kapitel 5.1 beschrieben bestimmt.

In Tabelle 5.6 sind die ermittelten Werte für zwei Iterationsschritten zur Bestimmung der Rohrlänge abgebildet.

	Einheit	Iterationsschritt	
		1	2
Länge Doppelrohr	m	19,286	19,147
$Nu_{m,T}$ durchströmtes Rohr	–	402,456	406,458
α_1	$W/m^2 \cdot K$	4747,664	4794,874
$Nu_{m,T}$ konzentrischer Ringspalt	-	488,628	493,146
α_2	$W/m^2 \cdot K$	5818,293	5872,088
k	$W/m^2 \cdot K$	1975,070	1989,405
$A_{Wü}$	m^2	3,653	3,627

Tabelle 5.6: Iterationsschritte zur Berechnung der Doppelrohrlänge mit Messwerten

Es ist zu erkennen, dass ein Wärmeübertrager der mit einer Viskosität von $\eta = 300 \text{ mPas}$ im Verhältnis zu einer Viskosität von $\eta = 90 \text{ mPas}$ ausgelegt wird, stark überdimensioniert wird. Die große Viskosität hat einen vermeintlich 13 Mal so langen Wärmeübertrager zur Folge. Bei einer geringeren Viskosität wird sich mit dem vorgegebenen Volumenstrom eine Strömung im Übergangsbereich zwischen der laminaren und turbulenten Strömung ausbilden. Dies bedeutet, dass keine reine laminare Strömung, wie sie bei einer Viskosität von $\eta = 300 \text{ mPas}$ vorliegt, vorhanden ist. Eine turbulente bzw. mit Wirbeln behaftete Strömung hat immer einen besseren Wärmeübergang als eine laminare Strömung.

6 Zusammenfassung

Für die, in dieser Arbeit untersuchten Substrate und Substratgemische, war es das Ziel, die für die Auslegung von Apparaten wichtigen Stoffwerte, zu ermitteln und in einen Zusammenhang mit dem jeweiligen TR-Gehalt zu bringen. Es wurde versucht die Versuchsaufbauten einfach zu halten, was teilweise nachteilige Folgen hatte. Der TR-Gehalt der untersuchten Proben ist mit dem vorgestellten Verfahren einfach und zuverlässig zu bestimmen gewesen. Bei der Messung der Dichte hat sich gezeigt, dass die einfache Messtechnik wie z.B. der Messkolben nicht geeignet ist. Ein Ablesen ist aufgrund der nicht lichtdurchlässigen, faserigen und Stückchen behafteten Probe nicht möglich. Mit einem zylindrischen Behälter können jedoch ausreichend gute Ergebnisse erzielt werden.

Das gefertigte Kalorimeter zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität ist geeignet um ausreichend dünnflüssige und nicht mit Fasern und Stückchen behaftete Medien zu untersuchen. Aufgrund des kleinen Handblattrührers kann keine homogene Durchmischung in dem Behälter erzeugt werden. Hierdurch kann es zu erheblichen Messfehler kommen. Die Substrate können zwar zerkleinert werden um ein Durchmischen zu gewährleisten, jedoch kann keine genaue Aussage über den Einfluss des Zerkleinerns auf die Stoffeigenschaften der Probe getroffen werden. Die von zerkleinerter Rindergülle bestimmte spezifische Wärmekapazität weicht um 1,5 % von dem in der Literatur gefunden Wert ab. Dies ist nicht zwingend eine Folge des Zerkleinerns. Diese Abweichung kann ebenso durch eine abweichende Fütterung der Rinder, von denen die Probe stammt, hervorgerufen werden.

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ist mit einfachen Mitteln durchführbar, jedoch hat sich eine Abweichung von 5 % ergeben. Diese Abweichung ist ebenso wie bei der spezifischen Wärmekapazität durch eine unterschiedliche Beschaffenheit des Substrats erklärbar.

Bei der Bestimmung der Viskosität hat sich in den Messwerten widerspiegelt, dass der Versuchsaufbau in seiner Größe nicht im Verhältnis zu der untersuchten Probe gestanden hat. Die Leistung die für das Rühren aufgebracht worden ist, betrug nur knapp ein Prozent der von dem Rührwerk aufgenommenen Leistung. Die Richtigkeit der Messwerte für die Viskosität kann aufgrund mangelnder Literaturwerte nicht kontrolliert werden. Die Grundidee scheint jedoch korrekt zu sein, da die ermittelten Werte für die Viskosität von ihrer Größe her zu einander stimmig sind. Das Rezirkulat hat aufgrund des organischen Abbaus die geringste Viskosität. Die Suspension aus Maissilage und Rindergülle hat die höchste Viskosität, was aufgrund des hohen TR-Gehalts und des Aussehens der Probe auch schlüssig erscheint. Die reine Rindergülle befindet sich größentechnisch dazwischen, jedoch näher an der Viskosität des Rezirkulats.

Die Beispielrechnung eines Doppelrohrwärmeübertragers hat gezeigt, dass die Verwendung von validierten Stoffwerten wichtig ist. Die falsch Auslegung aufgrund von falschen Werten, oder aus Unerfahrenheit zu groß angenommenen Werten, sollte tunlichst vermieden werden. Dies ist an den unterschiedlich errechneten Rohrlängen gut erkennbar.

7 Ausblick

Für zukünftige Arbeiten wäre ein veränderter Versuchsaufbau für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit und die Viskosität zu empfehlen. Im einzelnen sollten für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität an dem Versuchsaufbau folgende Änderungen bzw. Erweiterungen in Betracht gezogen werden. Durch die Verwendung einer elektrisch angetriebenen Mischvorrichtung kann eventuell auch in inhomogenere dickflüssige Suspensionen gleichmäßig die Wärme eingebracht werden. Bei der Verwendung einer solchen Mischvorrichtung sollte je nach Leistungseintrag, die Temperaturerhöhung durch die beim Mischen hervorgerufene Reibung beachtet werden.

Folgende Änderungen sollte für weitere Versuche zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit am Versuchsaufbau in Betracht gezogen werden. Bei der Verwendung eines größeren Proben Behälters wird die mögliche Versuchszeit steigen. Ist die betrachtete Zeitspanne länger, so wird die Fourier-Zahl größer und es kann ein genauere Wert für die Biot-Zahl abgelesen werden. Zusätzlich um die Versuchsvorbereitungszeit zu verringern und die hygienische Handhabung mit der Probe zu steigern sollte ein dünnwandiger Probenbehälter der wiederverschließbar ist gefertigt und verwendet werden.

Des Weiteren sollte, wenn der Versuchsaufbau für die Bestimmung der Viskosität weiter verwendet werden soll, in Betracht gezogen werden diesen um eine Drehmomentenmesswelle zu erweitern. Hintergrund ist, da speziell bei großen Antriebsanlagen, wie bei der hier Verwendeten, im Verhältnis für das Rühren viel Arbeit für die Überwindung der Massenträgheit des Antriebssystems selbst benötigt wird. Diese Systemeigenschaft würde bei der Verwendung einer Drehmomentenmesswelle ausgeklammert werden, da die Leistung direkt an der Welle gemessen wird.

Literatur

- [1] Biogas: Planet und envitec im ausland erfolgreich. URL <http://www.iwr.de/news.php?id=32061>.
- [2] Martin Apelt, Rene Benndorf, Peter Fischer, Josephine Hofmann, Jan Liebetau, Jürgen Kube, Karin Jobst, Marc Lincke, Annett Lomtscher, Björn Schwarz, Jorge Iván Salazar Gómez, Andrea Gerstner, Alisa Jović, Carsten Cuhls, Anne Kleyböcker, Tobias Lienen, Lucie Moeller, Kati Görsch, Yvonne Köster, Andreas Zehnsdorf, Dietmar Ramhold, Jens Zosel, Stefan Junne, Erich Kielhorn, Peter Neubauer, Peter Dominik, and Doreen Zirkler. Messmethodensammlung biogas: Methoden zur bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden parametern im biogasbereich, 2015. URL https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Ver%C3%B6ffentlichungen/07_Messmethodensamm_Biogas_web.pdf.
- [3] BayLfU. Biogashandbuch bayern: Materialienband, 2007. URL <http://www.lfu.bayern.de/energie/biogashandbuch/doc/kap17.pdf>.
- [4] Róbert Bordás. Vorlesungsskript rheologie, 2014.
- [5] Y. R. Chen. Thennal properties of beef cattle manure, 1983.
- [6] Horst Chmiel and Sebastian Briechele, editors. *Bioprozesstechnik: Einführung in die Bioverfahrenstechnik*. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg, 2., neu bearb. aufl., [nachdr.] edition, 2008. ISBN 9783827416070. URL http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?id=2670429&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.
- [7] Holger Claus. Die auswirkung der gröÙe der viskosität auf die auslegung von apparaten im anlagenbau. telefonat, 14.07.2016.
- [8] D. Dähre. Das zeitabhängige fließverhalten trockensubstanzreicher rindergülle, 1988. URL <http://440ejournals.uni-hohenheim.de/index.php/agrartechnik/article/viewFile/3011/2739>.
- [9] DIN1306. Din 1306 dichte - begriffe, angaben, jun 1984.

- [10] DIN1345. Din 1345 thermodynamik grundbegriffe, dec 1993.
- [11] DINEN12880. Din en 12800 bestimmung des trockenrückstandes und des wassergehaltes, feb 2001.
- [12] Jürgen Eichler. *Physik: Für das Ingenieurstudium - prägnant mit knapp 300 Beispielaufgaben ; mit 48 Tab.* Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 4., aktualisierte und überarbeitete auflage edition, 2011. ISBN 9783834812728. doi: 10.1007/978-3-8348-9942-2. URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9942-2>.
- [13] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, editor. *Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung ; [Bioenergie]*. biogas.fnr.de. Gülzow-Prüzen, 6., überarb. aufl. edition, 2013. ISBN 3000143335. URL <http://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/biogas/leitfaden-biogas.html>.
- [14] Farmatic, 20.08.2016.
- [15] Andreas Fuhrman. Messtechnik asynchronmotoren: Telefonat, 16.06.2016.
- [16] Mandy Gerber. *Ganzheitliche stoffliche und energetische Modellierung des Biogasbildungsprozesses: Dissertation zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieurin.* PhD thesis, Ruhr-Universität, Bochum, 2009.
- [17] Helmuth Hausen. *Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg and s.l., zweite, neubearbeitete auflage edition, 1976. ISBN 978-3-642-88686-7. doi: 10.1007/978-3-642-88686-7. URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-88686-7>.
- [18] Jörg Hoffmann, editor. *Handbuch der Messtechnik: Mit 95 Tabellen.* Hanser, München, 4., neu bearb. aufl. edition, 2012. ISBN 978-3-446-42736-5.
- [19] Klsruher Institut für Technologie. Spezifische wärme von wasser, 2010.
- [20] Martin Kaltschmitt, Hans Hartmann, and Hermann Hofbauer, editors. *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren.* Springer, Berlin, 2., neu bearb. und erwei-

- terte aufl. edition, 2009. ISBN 978-3540850946. doi: 10.1007/978-3-540-85095-3. URL <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10310211>.
- [21] Christian Koll. Aufnahme, auswertung und beurteilung rheologischer parameter zur auslegung und simulation von fördereinheiten sowie rühraggregaten in biogasanlagen, 2012.
- [22] KSB. Kreiselpumpe, 15.09.2016. URL <https://www.ksb.com/ksb-de/Produktbauarten/Kreiselpumpe/>.
- [23] Holger Martin. *Wärmeübertrager*. Lehrbuchreihe Chemieingenieurwesen, Verfahrenstechnik. Thieme, Stuttgart, 1988. ISBN 3-13-720101-2.
- [24] Thomas G. Mezger. *Das Rheologie-Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*. Coatings-Compendien. Vincentz Network, Hannover, 2., überarb. aufl. edition, 2006. ISBN 9783878701750.
- [25] Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Die gesetzlichen einheiten in deutschland, 2012. URL https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/broschueren/Einheiten_deutsch.pdf.
- [26] Pumpen Sonnek. Exenterschenckenpumpe, 15.09.2016. URL <http://sonnek-pumpen.at/loesungen-fuer/chemie-petrochemie/product/wangen-excenterschneckenpumpe/>.
- [27] Dokumentation Stamo. Hhsl 16 rührwerk, 10.09.2016.
- [28] Matthias Stieß. *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 3., vollst. neu bearb. aufl. edition, 2009. ISBN 9783540325512. doi: 10.1007/978/3-540-32552-9. URL <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10257925>.
- [29] M. Türk. *Rohrleitungstransport von Flüssihmist: Druckverlustberechnung, Stoffdate, Tabellen, Programmbeschreibung*. PhD thesis, 1994/2.
- [30] Deutschland VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, DÄEsseldorf. *VDI-Wärmeatlas*. Springer Vieweg, Berlin, 2013.

-
- [31] VDI-Lexikon. *VDI Lexikon Maschinenbau*. Springer Berlin Heidelberg, 1995.
- [32] Hans-Peter Wilke, Christian Weber, and Thomas Fries. *Rührtechnik: Verfahrenstechn. u. apparative Grundlagen*. Hüthig, Heidelberg, 1988. ISBN 9783778513156.
- [33] Hans-Peter Wilke, Christian Weber, and Thomas Fries. *Rührtechnik: Verfahrenstechnische und apparative Grundlagen*. Hüthig, Heidelberg, 2., überarb. und erw. Aufl. edition, 1991. ISBN 3-527-297332.

A Anhang

t [s]	U [V]	I [mV]	I [A]	ϑ [°C]	P [W]
0	0	0	0	20.6	0
60	0	0	0	20.6	0
120	0	0	0	20.6	0
180	0	0	0	31.6	0
240	0	0	0	31.5	0
300	0	0	0	31.4	0
360	0	0	0	31.3	0
420	0	0	0	31.2	0
480	0	0	0	31.2	0
540	0	0	0	31.1	0
600	11.67	17.87	11.91	31.0	139.03
660	11.67	17.88	11.92	32.6	139.11
720	11.67	17.89	11.93	34.6	139.18
780	11.66	17.9	11.93	36.2	139.14
840	11.66	17.9	11.93	38.1	139.14
900	11.66	17.92	11.95	40.0	139.30
960	11.66	17.89	11.93	42.0	139.06
1020	11.66	17.81	11.87	43.5	138.44
1080	11.66	17.87	11.91	45.5	138.91
1140	11.63	17.88	11.92	47.2	138.63
1200	11.63	17.89	11.93	49.0	138.71
1260	11.63	17.83	11.89	51.0	138.24
1320	11.63	17.86	11.91	52.7	138.47
1380	11.63	17.86	11.91	54.4	138.47
1440	11.64	17.75	11.83	56.2	137.74
1500	11.63	17.82	11.88	58.0	138.16
1560	11.63	17.82	11.88	59.7	138.16
1620	11.64	17.78	11.85	61.6	137.97
1680	11.66	17.73	11.82	63.4	137.82
1740	11.66	17.7	11.80	65.0	137.59
1800	11.66	17.71	11.81	66.9	137.67
1860	11.66	17.71	11.81	68.6	137.67
1920	11.66	17.71	11.81	70.1	137.67
1980	0	0	0	70.6	0
2040	0	0	0	70.4	0
2100	0	0	0	70.4	0
2160	0	0	0	70.3	0
2220	0	0	0	70.2	0
2280	0	0	0	70.0	0
2340	0	0	0	70.0	0
2400	0	0	0	70.0	0
2460	0	0	0	70.0	0
2520	0	0	0	69.9	0

Tabelle A.1: Messwerte Kalorimeter (Wasser) Versuch 1

t [s]	U [V]	I [mV]	I [A]	ϑ [°C]	P [W]
0	0	0	0	20.1	0
60	0	0	0	20.1	0
120	0	0	0	20.1	0
180	0	0	0	36.4	0
240	0	0	0	36.2	0
300	0	0	0	36.1	0
360	0	0	0	36.0	0
420	0	0	0	36.0	0
480	0	0	0	36.0	0
540	0	0	0	36.0	0
600	11.64	17.70	11.80	36.0	137.35
660	11.64	17.73	11.82	37.3	137.58
720	11.63	18.06	12.04	39.0	140.03
780	11.63	18.03	12.02	40.3	139.79
840	11.62	18.03	12.02	42.3	139.67
900	11.62	18.02	12.01	43.9	139.59
960	11.62	18.00	12.00	45.5	139.44
1020	11.63	17.91	11.94	47.1	138.86
1080	11.63	17.94	11.96	49.0	139.09
1140	11.62	17.96	11.97	50.3	139.13
1200	11.62	17.95	11.97	52.0	139.05
1260	11.62	17.98	11.99	53.9	139.29
1320	11.63	17.95	11.97	55.4	139.17
1380	11.63	17.94	11.96	57.0	139.09
1440	11.63	17.97	11.98	58.7	139.33
1500	11.63	17.95	11.97	60.2	139.17
1560	11.62	17.94	11.96	62.0	138.98
1620	11.65	17.96	11.97	63.5	139.49
1680	11.65	18.00	12.00	65.0	139.80
1740	11.65	17.96	11.97	66.6	139.49
1800	11.66	17.96	11.97	68.2	139.61
1860	11.65	17.96	11.97	70.0	139.49
1920	0	0	0	70.0	0
1980	0	0	0	70.0	0
2040	0	0	0	70.0	0
2100	0	0	0	70.0	0
2160	0	0	0	69.9	0
2220	0	0	0	69.8	0
2280	0	0	0	69.7	0
2340	0	0	0	69.7	0
2400	0	0	0	69.6	0
2460	0	0	0	69.6	0
2520	0	0		69.9	0

Tabelle A.2: Messwerte Kalorimeter (Wasser) Versuch 2

t [s]	U [V]	I [mV]	I [A]	ϑ [°C]	P [W]
0	0	0	0	21.1	0
60	0	0	0	21.0	0
120	0	0	0	21.0	0
180	0	0	0	38.8	0
240	0	0	0	38.7	0
300	0	0	0	38.7	0
360	0	0	0	38.6	0
420	0	0	0	38.6	0
480	0	0	0	38.5	0
540	0	0	0	38.5	0
600	11.65	18.1	12.07	38.4	140.58
660	11.64	18.09	12.06	39.7	140.38
720	11.64	18.12	12.08	41.3	140.61
780	11.64	18.12	12.08	43.0	140.61
840	11.63	18.12	12.08	44.7	140.49
900	11.65	18.15	12.10	46.4	140.96
960	11.65	18.14	12.09	48.0	140.89
1020	11.65	18.13	12.09	49.6	140.81
1080	11.65	18.11	12.07	51.2	140.65
1140	11.65	18.09	12.06	53.0	140.50
1200	11.65	18.07	12.05	54.4	140.34
1260	11.65	18.05	12.03	56.0	140.19
1320	11.65	18.03	12.02	57.5	140.03
1380	11.65	18.05	12.03	59.2	140.19
1440	11.65	18.05	12.03	61.0	140.19
1500	11.65	18.05	12.03	62.5	140.19
1560	11.65	18.05	12.03	64.0	140.19
1620	11.65	18.02	12.01	65.7	139.96
1680	11.65	18	12.00	67.2	139.80
1740	11.65	18.02	12.01	68.8	139.96
1800	11.65	18.01	12.01	70.4	139.88
1860	0	0	0	70.6	0
1920	0	0	0	70.6	0
1980	0	0	0	70.5	0
2040	0	0	0	70.4	0
2100	0	0	0	70.3	0
2160	0	0	0	70.2	0
2220	0	0	0	70.2	0
2280	0	0	0	70.1	0
2340	0	0	0	70.0	0
2400	0	0	0	70.0	0
2460	0	0	0	69.6	0
2520	0	0	0	69.9	0

Tabelle A.3: Messwerte Kalorimeter (Wasser) Versuch 3

t [s]	U [V]	I [mV]	I [A]	ϑ [°C]	P [W]
0	0	0	0	24,2	0
60	0	0	0	24,4	0
120	0	0	0	24,4	0
180	0	0	0	24,5	0
240	0	0	0	24,6	0
300	0	0	0	25,4	0
360	0	0	0	43,9	0
420	0	0	0	42,8	0
480	0	0	0	42,5	0
540	0	0	0	42,4	0
600	0	0	0	40,0	140.58
660	0	0	0	39,0	140.38
720	0	0	0	42,2	140.61
780	0	0	0	42,0	140.61
840	0	0	0	42,0	140.49
900	11,66	18,13	12,09	40,7	140.96
960	11,66	18,03	12,02	40,7	140.89
1020	11,66	17,98	11,99	41,0	140.81
1080	11,66	17,93	11,95	42,3	140.65
1140	11,66	17,91	11,94	45,9	140.50
1200	11,66	17,87	11,91	46,9	140.34
1260	11,66	17,77	11,85	49,7	140.19
1320	11,66	17,76	11,84	52,2	140.03
1380	11,66	17,83	11,89	53,9	140.19
1440	11,66	17,86	11,91	56,0	140.19
1500	11,66	17,83	11,89	57,1	140.19
1560	11,66	17,86	11,91	59,3	140.19
1620	11,66	17,86	11,91	60,4	139.96
1680	11,66	17,86	11,91	61,7	139.80
1740	11,66	17,89	11,93	62,6	139.96
1800	11,66	17,88	11,92	65,0	139.88
1860	11,66	17,88	11,92	66,5	0
1920	11,66	17,89	11,93	69,7	0
1980	11,66	17,91	11,94	70,7	0
2040	11,66	17,89	11,93	65,8	0
2100	11,66	17,90	11,93	71,0	0
2160	11,66	17,90	11,93	70,7	0
2220	0	0	0	70,3	0
2280	0	0	0	70,1	0
2340	0	0	0	70,0	0
2400	0	0	0	69,8	0
2460	0	0	0	69,6	0
2520	0	0	0	69,4	0
2580	0	0	0	69,1	0

Tabelle A.4: Messwerte Kalorimeter Gulle (nicht zerkleinert) Versuch 1

t [s]	U [V]	I [mV]	I [A]	ϑ [°C]	P [W]
0	0	0	0	20,4	0
60	0	0	0	20,4	0
120	0	0	0	20,4	0
180	0	0	0	34,4	0
240	0	0	0	34,3	0
300	0	0	0	34,1	0
360	0	0	0	34,0	0
420	0	0	0	33,9	0
480	0	0	0	33,9	0
540	0	0	0	33,7	0
600	0	0	0	33,6	140.58
660	11,66	18,29	12,19	33,6	140.38
720	11,66	18,20	12,13	33,6	140.61
780	11,66	18,11	12,07	35,5	140.61
840	11,66	17,96	11,97	38,1	140.49
900	11,65	17,91	11,94	40,2	140.96
960	11,65	17,88	11,92	43,0	140.89
1020	11,65	17,87	11,91	44,5	140.81
1080	11,65	17,86	11,91	46,0	140.65
1140	11,65	17,90	11,93	49,0	140.50
1200	11,65	17,85	11,90	49,9	140.34
1260	11,65	17,85	11,90	51,8	140.19
1320	11,65	17,85	11,90	54,4	140.03
1380	11,65	17,89	11,93	58,6	140.19
1440	11,65	17,87	11,91	59,5	140.19
1500	11,65	17,87	11,91	61,5	140.19
1560	11,65	17,87	11,91	65,0	140.19
1620	11,65	17,86	11,91	65,5	139.96
1680	11,65	17,86	11,91	67,0	139.80
1740	11,65	17,86	11,91	68,5	139.96
1800	0	0	0	69,8	139.88
1860	0	0	0	70,1	0
1920	0	0	0	70,0	0
1980	0	0	0	69,7	0
2040	0	0	0	69,5	0
2100	0	0	0	69,6	0
2160	0	0	0	69,5	0
2220	0	0	0	69,4	0
2280	0	0	0	69,1	0
2340	0	0	0	69,0	0

Tabelle A.5: Messwerte Kalorimeter Gülle (nicht zerkleinert) Versuch 2

t [s]	U [V]	I [mV]	I [A]	ϑ [°C]	P [W]
0	0	0	0	21,4	0
60	0	0	0	21,4	0
120	0	0	0	33,0	0
180	0	0	0	32,6	0
240	0	0	0	32,5	0
300	0	0	0	32,4	0
360	0	0	0	32,4	0
420	0	0	0	32,2	0
480	0	0	0	32,1	0
540	0	0	0	32,1	0
600	0	0	0	32,0	140.58
660	0	0	0	32,0	140.38
720	11,66	18,24	12,16	32,0	140.61
780	11,66	18,18	12,12	34,2	140.61
840	11,66	18,09	12,06	39,0	140.49
900	11,66	17,97	11,98	38,6	140.96
960	11,66	17,92	11,95	42,0	140.89
1020	11,66	17,88	11,92	42,6	140.81
1080	11,66	17,87	11,91	49,0	140.65
1140	11,66	17,86	11,91	50,6	140.50
1200	11,66	17,85	11,90	52,6	140.34
1260	11,66	17,83	11,89	54,7	140.19
1320	11,66	17,83	11,89	55,0	140.03
1380	11,66	17,82	11,88	58,8	140.19
1440	11,66	17,88	11,92	59,8	140.19
1500	11,66	17,88	11,92	60,6	140.19
1560	0	0	0	60,0	140.19
1620	0	0	0	61,6	139.96
1680	0	0	0	60,9	139.80
1740	0	0	0	60,4	139.96
1800	0	0	0	60,4	139.88
1860	0	0	0	60,6	0
1920	0	0	0	60,0	0
1980	0	0	0	60,0	0
2040	0	0	0	59,6	0
2100	0	0	0	59,6	0

Tabelle A.6: Messwerte Kalorimeter Gulle (nicht zerkleinert) Versuch 3

t [s]	U [V]	I [mV]	I [A]	ϑ [°C]	P [W]
0	0	0	0	23,6	0
60	0	0	0	23,6	0
120	0	0	0	39,7	0
180	0	0	0	39,1	0
240	0	0	0	39,0	0
300	0	0	0	39,0	0
360	0	0	0	38,9	0
420	0	0	0	38,7	0
480	0	0	0	38,6	0
540	0	0	0	38,5	0
600	0	0	0	38,4	140.58
660	0	0	0	38,4	140.38
720	11,63	18,2	12,13	38,3	140.61
780	11,63	18,18	12,12	38,5	140.61
840	11,62	18,1	12,07	40,3	140.49
900	11,62	18,02	12,01	42,0	140.96
960	11,62	17,94	11,96	43,4	140.89
1020	11,62	17,92	11,95	45,2	140.81
1080	11,62	17,86	11,91	46,7	140.65
1140	11,62	17,88	11,92	49,0	140.50
1200	11,62	17,85	11,90	49,7	140.34
1260	11,63	17,85	11,90	51,8	140.19
1320	11,63	17,83	11,89	53,0	140.03
1380	11,63	17,8	11,87	55,1	140.19
1440	11,63	17,77	11,85	57,0	140.19
1500	11,63	17,8	11,87	58,3	140.19
1560	11,63	17,72	11,81	60,2	140.19
1620	11,63	17,71	11,81	61,0	139.96
1680	11,63	17,72	11,81	63,3	139.80
1740	0	0	0	65,0	139.96
1800	0	0	0	66,4	139.88
1860	0	0	0	67,0	0
1920	0	0	0	67,4	0
1980	0	0	0	67,6	0
2040	0	0	0	67,6	0
2100	0	0	0	67,6	0
2160	0	0	0	67,6	0
2220	0	0	0	67,6	0
2280	0	0	0	67,6	0

Tabelle A.7: Messwerte Kalorimeter Gulle (zerkleinert) Versuch 1

t [s]	U [V]	I [mV]	I [A]	ϑ [°C]	P [W]
0	0	0	0	23,0	0
60	0	0	0	23,0	0
120	0	0	0	23,0	0
180	0	0	0	23,0	0
240	0	0	0	35,6	0
300	0	0	0	35,6	0
360	0	0	0	35,0	0
420	0	0	0	35,0	0
480	0	0	0	35,0	0
540	0	0	0	35,0	0
600	0	0	0	34,8	140.58
660	0	0	0	34,7	140.38
720	11,68	18,02	12,01	34,7	140.61
780	11,67	18,00	12,00	34,8	140.61
840	11,67	17,92	11,95	37,0	140.49
900	11,67	17,84	11,89	38,3	140.96
960	11,66	17,76	11,84	40,5	140.89
1020	11,68	17,74	11,83	42,3	140.81
1080	11,66	17,68	11,79	44,0	140.65
1140	11,65	17,70	11,80	45,9	140.50
1200	11,66	17,68	11,79	47,4	140.34
1260	11,66	17,67	11,78	49,0	140.19
1320	11,66	17,65	11,77	50,5	140.03
1380	11,66	17,65	11,77	52,2	140.19
1440	11,64	17,64	11,76	54,6	140.19
1500	11,64	17,70	11,80	56,4	140.19
1560	11,65	17,70	11,80	57,7	140.19
1620	0	0	0	59,4	139.96
1680	0	0	0	61,0	139.80
1740	0	0	0	62,5	139.96
1800	0	0	0	63,6	139.88
1860	0	0	0	63,7	0
1920	0	0	0	63,9	0
1980	0	0	0	63,9	0
2040	0	0	0	63,8	0
2100	0	0	0	63,7	0
2160	0	0	0	63,6	0
2220	0	0	0	63,6	0
2280	0	0	0	63,5	0

Tabelle A.8: Messwerte Kalorimeter Gülle (zerkleinert) Versuch 1

t [s]	U [V]	I [mV]	I [A]	ϑ [°C]	P [W]
0	0	0	0	21,5	0
60	0	0	0	21,5	0
120	0	0	0	21,5	0
180	0	0	0	36,4	0
240	0	0	0	36,0	0
300	0	0	0	35,9	0
360	0	0	0	35,8	0
420	0	0	0	35,7	0
480	0	0	0	35,7	0
540	0	0	0	35,6	0
600	0	0	0	35,6	140.58
660	0	0	0	35,5	140.38
720	11,68	18,08	12,05	35,4	140.61
780	11,67	17,95	11,97	36,0	140.61
840	11,67	17,86	11,91	37,8	140.49
900	11,67	17,78	11,85	39,0	140.96
960	11,66	17,72	11,81	41,6	140.89
1020	11,66	17,68	11,79	42,2	140.81
1080	11,66	17,57	11,71	44,7	140.65
1140	11,66	17,56	11,71	46,0	140.50
1200	11,66	17,54	11,69	47,8	140.34
1260	11,67	17,56	11,71	50,0	140.19
1320	11,66	17,51	11,67	51,6	140.03
1380	11,66	17,48	11,65	54,4	140.19
1440	11,66	17,50	11,67	54,6	140.19
1500	11,67	17,55	11,70	56,0	140.19
1560	11,66	17,50	11,67	58,3	140.19
1620	11,66	17,50	11,67	59,6	139.96
1680	11,67	17,50	11,67	61,4	139.80
1740	0	0	0	62,6	139.96
1800	0	0	0	64,8	139.88
1860	0	0	0	65,0	0
1920	0	0	0	65,0	0
1980	0	0	0	65,0	0
2040	0	0	0	65,0	0
2100	0	0	0	65,0	0
2160	0	0	0	65,0	0
2220	0	0	0	65,0	0
2280	0	0	0	65,0	0

Tabelle A.9: Messwerte Kalorimeter Glle (zerkleinert) Versuch 1

t [s]	U [V]	I [mV]	I [A]	ϑ [°C]	P [W]
0	0	0	0	17,6	0
60	0	0	0	17,6	0
120	0	0	0	17,6	0
180	0	0	0	17,6	0
240	0	0	0	30,0	0
300	0	0	0	30,1	0
360	0	0	0	30,1	0
420	0	0	0	30,0	0
480	0	0	0	30,1	0
540	0	0	0	30,0	0
600	0	0	0	30,0	0
660	0	0	0	30,0	0
720	0	0	0	30,0	0
780	11,67	18,01	12,01	30,0	7,56
840	11,66	17,83	11,89	30,0	7,63
900	11,66	17,63	11,75	30,0	7,71
960	11,66	17,63	11,75	30,0	7,71
1020	11,66	17,62	11,75	30,0	7,72

Tabelle A.10: Messwerte Kalorimeter Maissilage gemischt mit Rindergülle

t [s]	U [V]	I [mV]	I [A]	ϑ [°C]	P [W]
0	0	0	0	19,0	0
60	0	0	0	19,0	0
120	0	0	0	19,0	0
180	0	0	0	35,8	0
240	0	0	0	35,7	0
300	0	0	0	35,9	0
360	0	0	0	35,4	0
420	0	0	0	35,6	0
480	0	0	0	35,4	0
540	0	0	0	34,7	0
600	0	0	0	34,0	0
660	0	0	0	35,3	0
720	0	0	0	33,0	0
780	11,66	17,93	11,95	32,7	139,38
840	11,66	17,92	11,95	32,5	139,30
900	11,65	17,77	11,85	32,5	138,01
960	11,64	17,75	11,83	32,8	137,74
1020	11,64	17,72	11,81	32,9	137,51
1080	11,64	17,69	11,79	33,6	137,27
1140	11,64	17,64	11,76	34,0	136,89
1200	11,64	17,65	11,77	35,6	136,96
1260	11,64	17,63	11,75	34,4	136,81
1320	11,64	17,63	11,75	37,6	136,81
1380	11,65	17,63	11,75	51,1	136,93
1440	11,65	17,63	11,75	51,0	136,93
1500	11,65	17,54	11,69	54,0	136,23
1560	11,65	17,56	11,71	56,0	136,38
1620	0	0	0	60,0	0
1680	0	0	0	63,0	0
1740	0	0	0	64,0	0
1800	0	0	0	63,4	0
1860	0	0	0	63,0	0
1920	0	0	0	62,2	0
1980	0	0	0	61,0	0
2040	0	0	0	61,0	0
2100	0	0	0	61,0	0

Tabelle A.11: Messwerte Kalorimeter Rezirkulat

<i>Re</i>	<i>Ne</i>
2	41,57
3	28,85
4	23,04
5	19,678
6	17,33
7	15,62
8	14,27
9	13,23
10	12,43
20	8,29
30	6,669
40	5,76
50	5,16
60	4,736
70	4,41
80	4,152
90	3,941
100	3,775
200	2,789
300	2,333
400	2,064
500	1,881
600	1,747
700	1,642
800	1,558
900	1,488
1000	1,433
2000	1,106
3000	0,962
4000	0,875
5000	0,815
6000	0,772
7000	0,738
8000	0,7099
9000	0,687
10000	0,668
20000	0,562
30000	0,526
40000	0,509
50000	0,5008
60000	0,4968

Tabelle A.12: Reynolds- und Newton-Zahl Werte nach Zlokarnik

$t [s]$	$\vartheta_1 [^{\circ}C]$	$\vartheta_2 [^{\circ}C]$	$\vartheta_3 [^{\circ}C]$	$\vartheta_4 [^{\circ}C]$
0	21,0	55,0	20,0	19,8
120	20,6	54,0	34,9	20,0
240	20,6	56,0	38,9	20,8
360	20,6	57,2	40,6	23,6
480	20,5	58,6	42,8	28,3
600	20,5	59,0	45,0	33,7
720	20,5	59,0	47,2	38,0
840	20,5	59,0	47,5	40,6
960	20,5	58,6	49,3	43,4
1080	20,6	58,6	51,1	44,9
1200	20,6	58,3	51,7	45,7

Tabelle A.13: Messwerte Wärmeleitfähigkeit Rezirkulat Versuch 1

$t [s]$	$\vartheta_1 [^{\circ}C]$	$\vartheta_2 [^{\circ}C]$	$\vartheta_3 [^{\circ}C]$	$\vartheta_4 [^{\circ}C]$
0	20,7	57,5	19,4	19,6
120	20,7	57,6	36,0	19,6
240	20,8	57,4	40,0	20,6
360	20,9	57,0	41,1	25,7
480	20,9	56,6	42,7	31,7
600	20,9	56,0	44,8	37,9
720	20,9	55,6	46,0	41,4
840	21,0	54,8	47,7	43,6
960	21,0	54,8	49,4	44,7
1080	21,0	55,7	50,7	45,0
1200	21,0	57,6	51,7	46,0

Tabelle A.14:

$t [s]$	$\vartheta_1 [^{\circ}C]$	$\vartheta_2 [^{\circ}C]$	$\vartheta_3 [^{\circ}C]$	$\vartheta_4 [^{\circ}C]$
0	21,0	58,7	19,8	19,6
120	21,0	57,6	31,8	19,7
240	21,0	56,6	33,5	19,7
360	21,0	55,5	35,0	20,4
480	21,0	54,7	38,0	23,0
600	21,0	54,9	39,8	26,5
720	21,0	55,6	42,0	30,9
840	21,0	57,4	43,8	34,7
960	21,0	58,4	46,3	38,7
1080	20,9	58,7	48,2	41,7
1200	21,0	59,0	49,4	42,6

Tabelle A.15: Messwerte Wärmeleitfähigkeit Rezirkulat Versuch 3

Hz	n [min]	U [V]	I [A]
15	12,1	78	0,22
20	17,9	106	0,21
25	22,2	127	0,21
30	29,3	161	0,2
35	36,4	194	0,2
40	42	222	0,2
45	50,6	229	0,17
50	52,2	230	0,17

Tabelle A.16: Messwerte Viskosimeter Hydraulik Öl

Hz	n [min]	U [V]	I [A]
10	7,8	59	0,22
15	11	81	0,22
20	16,5	102	0,22
25	20,8	124	0,21
30	25,2	145	0,22
35	29,7	167	0,21
40	34,1	188	0,22
45	38,6	209	0,22
50	43	230	0,22
55	47,1	230	0,2

Tabelle A.17: Messwerte Viskosimeter Maissilage-Gülle-Gemisch Versuch 1

Hz	n [min]	U [V]	I [A]
10	7,9	59	0,22
15	12,2	81	0,22
20	16,6	102	0,21
25	20,9	124	0,21
30	25,3	145	0,21
35	29,7	167	0,21
40	34,2	182	0,21
45	38,6	210	0,22
50	43,1	231	0,22
55	47,2	231	0,2

Tabelle A.18: Messwerte Viskosimeter Maissilage-Gülle-Gemisch Versuch 2

Hz	n [min]	U [V]	I [A]
10	8	59	0,22
15	12,3	81	0,22
20	14,7	103	0,22
25	20,9	123	0,21
30	25,3	144	0,21
35	29,8	165	0,21
40	34,2	186	0,21
45	38,6	208	0,21
50	43,1	229	0,21
55	47,3	229	0,2

Tabelle A.19: Messwerte Viskosimeter Maissilage-Gülle-Gemisch Versuch 3

Hz	n [min]	U [V]	I [A]
10	8,4	58	0,22
15	12,7	80	0,21
20	17	101	0,21
25	21,4	122	0,2
30	25,8	143	0,2
35	30,3	164	0,2
40	34,7	185	0,2
45	39,1	206	0,2
50	43,6	227	0,2

Tabelle A.20: Messwerte Viskosimeter Rindergülle Versuch 1

Hz	n [min]	U [V]	I [A]
10	8,4	58	0,22
15	12,7	80	0,21
20	17	101	0,21
25	21,4	122	0,2
30	25,9	143	0,2
35	30,3	165	0,2
40	34,7	186	0,2
45	39,2	207	0,21
50	43,6	228	0,21

Tabelle A.21: Messwerte Viskosimeter Rindergülle Versuch 2

Hz	n [min]	U [V]	I [A]
10	8,4	59	0,22
15	12,2	80	0,21
20	17,1	101	0,21
25	21,5	122	0,2
30	25,9	144	0,2
35	30,3	165	0,2
40	34,7	186	0,2
45	39,2	207	0,21
50	43,6	229	0,2

Tabelle A.22: Messwerte Viskosimeter Rindergülle Versuch 3

Hz	n [min]	U [V]	I [A]
10	8,2	60	0,22
15	10,3	81	0,22
20	16,9	108	0,21
25	21,3	124	0,21
30	25,7	146	0,21
35	30,1	167	0,21
40	34,6	188	0,21
45	39	210	0,21
50	43,4	231	0,21
55	47,7	231	0,19

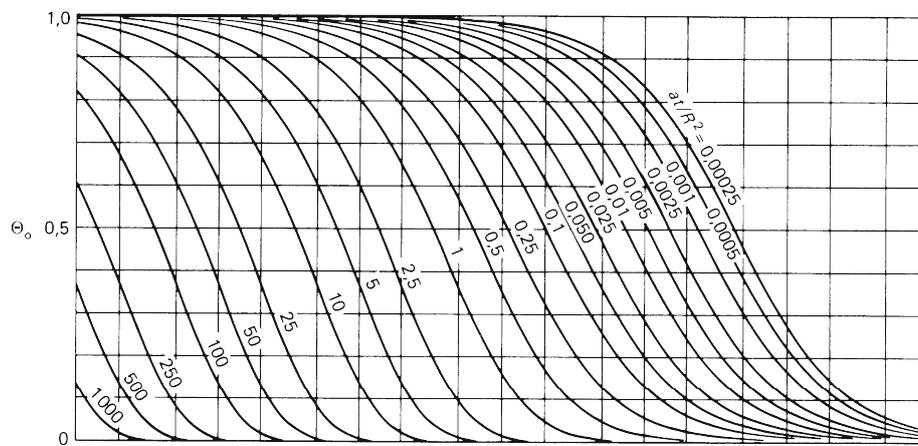
Tabelle A.23: Messwerte Viskosimeter Rezirkulat Versuch 1

Hz	n [min]	U [V]	I [A]
10	8,3	59	0,22
15	12,6	81	0,22
20	14,2	103	0,21
25	21,4	124	0,21
30	25,8	146	0,21
35	30,2	167	0,21
40	34,6	189	0,21
45	39,1	211	0,21
50	43,5	232	0,21
55	47,7	231	0,19

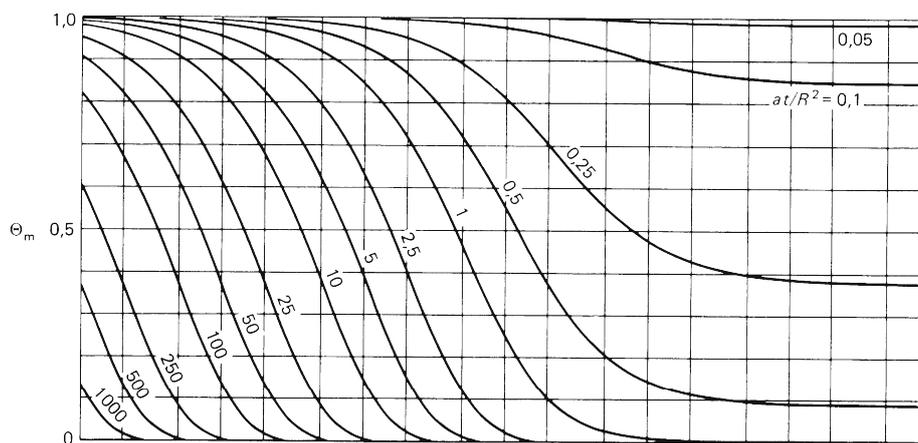
Tabelle A.24: Messwerte Viskosimeter Rezirkulat Versuch 2

Hz	n [min]	U [V]	I [A]
10	8,3	59	0,22
15	11,8	80	0,22
20	17	102	0,21
25	21,4	123	0,21
30	25,7	145	0,2
35	30,2	166	0,2
40	34,6	188	0,21
45	39	209	0,21
50	43,5	231	0,21
55	47,7	231	0,19

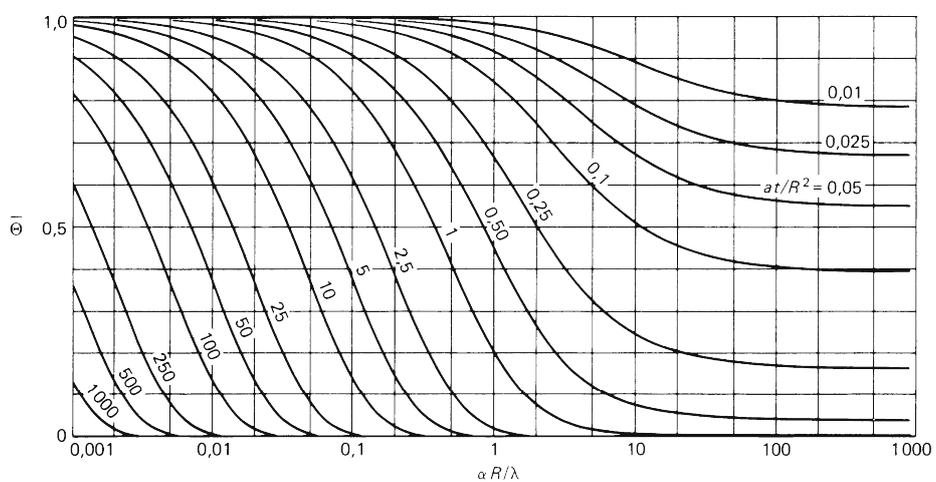
Tabelle A.25: Messwerte Viskosimeter Rezirkulat Versuch 3



E2. Abb. 6. Normierte Temperatur θ_0 der Zylinderoberfläche



E2. Abb. 7. Normierte Temperatur θ_m der Zylinderachse



E2. Abb. 8. Normierte kalorische Mitteltemperatur $\bar{\theta}$ des Zylinders



B Eidesstattliche Erklärung

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Koch

Vorname: Jan Hendrik

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Untersuchung der rheologischen Eigenschaften nichtnewtonscher Medien mittels eines dafür auszulegenden Apparats mit Ausblick auf die Optimierung eines Wärmeübertragers einer Biogasanlage

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

Datum

Unterschrift im Original