

Energetische Untersuchung von Mischgrün

Untersuchung der Auswirkungen von jahreszeitlichen
Schwankungen und verschiedenen Trennverfahren auf die
Zusammensetzung von Mischgrün.

Bachelorarbeit

vorgelegt von

Benjamin Jaiser

Gutachter:

Prof. Dr. Rainer Stank
Dipl. Ing. Helmut Adwiraah

IUE

Institut für Umwelttechnik und
Energiewirtschaft

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	V
Formelverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1. Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund und Problemstellung.....	1
1.2 Ziel der Arbeit.....	2
1.3 Methodik.....	2
2. Theoretische Grundlagen.....	3
2.1 Zusammensetzung von Mischgrün.....	3
2.1.1 Definition von Mischgrün.....	3
2.1.2 Elementare Zusammensetzung von Mischgrün.....	4
2.1.3 Biologische Zusammensetzung von Mischgrün.....	5
2.2 Zerkleinern.....	6
2.3 Partikeln und disperse Systeme.....	9
2.3.1 Partikelgrößenverteilungen.....	9
2.3.2 Darstellung und Kennzeichnung von Verteilungen disperser Güter.....	12
2.4 Theorie der Trennverfahren.....	13
2.4.1 Übersicht von Trennverfahren.....	13
2.4.2 Siebklassieren.....	14
2.4.3 Windsichten.....	15
2.4.4 Setzsortieren.....	18
2.4.5 Klauben (Handsortieren).....	18
2.4.6 Trennungen, Trenngradkurven.....	18
2.5 Anaerober Abbau.....	21
2.5.1 Definition des anaeroben Abbaus.....	21
2.5.1 Einflussfaktoren.....	24

2.5.2	Substrateigenschaften.....	24
2.5.3	Biogaspotentialbestimmung	25
3.	Material und Methoden	31
3.1	Repräsentative Probennahme und Probenvorbereitung.....	31
3.2	Biogaspotenzialtest.....	32
3.3	Handsortierung	32
3.4	Siebung.....	33
3.5	Sichtung.....	34
4.	Saisonaler Anfall	35
4.1	Theoretischer saisonaler Anfall von Mischgrün.....	35
4.2	Kalendarische Betrachtung.....	35
4.2.1	Frühling	36
4.2.2	Sommer	37
4.2.3	Herbst	37
4.2.4	Winter.....	38
4.2.5	Ergebnisse des theoretischen saisonalen Anfalls.....	39
4.3	Praktischer Saisonaler Anfall	40
4.3.1	März.....	40
4.3.2	April.....	42
4.3.3	Mai.....	43
4.3.4	Juni	44
4.3.5	Juli	45
4.3.6	August	46
4.3.7	September	48
4.3.8	Biogaspotenziale von Mischgrün	49
4.3.9	Zusammenfassung der Ergebnisse des praktischen saisonalen Anfalls.....	51
5.	Trennverfahren	53
5.1	Theoretische Auswahl der Trennverfahren	53

5.2 Praktische Siebversuche	54
5.2 Praktische Versuche am Windsichten	56
5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Trennversuche.....	58
6. Diskussion	59
6.1 Jahreszeitliche Schwankungen	59
6.2 Energetische Betrachtungen	61
6.3 Trennverfahren	64
7. Zusammenfassung.....	66
8. Ausblick.....	68
Literaturverzeichnis.....	V
Anhang	IX
Anhang I: Jahresarbeitstabelle.....	IX
Anhang II: Biogaspotentialtestkurven.....	X
Anhang III Ergebnisse der Siebklassierung	XVIII
Danksagung.....	XX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Mittlere Zusammensetzung der Pflanzensubstanz	5
Tabelle 2.2 Systematische Indizierung der Mengenart	10
Tabelle 2.3 Zur Auswahl stehende Trennverfahren	14
Tabelle 2.4 Einflussgrößen und Milieuanforderungen bei Vergärung von biogenen Reststoffen	24
Tabelle 2.5 Typische Hemmstoffe bei anaeroben Abbauprozessen.....	24
Tabelle 2.6 Theoretische Gasausbeute und theoretische Gaszusammensetzung bei der Vergärung.....	27
Tabelle 4.1 Gartenarbeiten im Frühling	36
Tabelle 4.2 Gartenarbeiten im Sommer.....	37
Tabelle 4.3 Gartenarbeiten im Herbst	37
Tabelle 4.4 Gartenarbeiten im Winter	38
Tabelle 4.5 Erwarteter monatlicher krautiger Anfall.....	39
Tabelle 4.6 Ergebnisse der Biogaspotentialtests	52
Tabelle 5.1 Bewertung der möglichen Trennverfahren.....	53
Tabelle 5.2 Ergebnisse des Testlaufs am Zick-Zack-Sichter	56
Tabelle 5.3 Ergebnisse des Sichtversuchs (Fraktion $5\text{mm} < x_1 < 2\text{mm}$).....	56
Tabelle 5.4 Ergebnisse des Sichtversuchs (Fraktion $6\text{mm} < x_2 < 5\text{mm}$).....	57
Tabelle 6.1 Gehalt an Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz der untersuchten Proben ..	63
Tabelle 6.2 Biogasertrag gängiger Substrate.....	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Beanspruchungsarten nach Rumpf.....	7
Abbildung 2.2 Sieblinien für drei unterschiedliche Zerkleinerungsaggregatetypen	8
Abbildung 2.3 Vergleich der drei genormten Verteilungsfunktionen.....	12
Abbildung 2.4 Verfahrensschritte des Windsichters	16
Abbildung 2.5 Trennprinzip eines Zick-Zack-Sichters	17
Abbildung 2.6 Beispiel zur Trenngradbestimmung nach Stieß.....	19
Abbildung 2.7 Phasen des anaeroben Abbaus.....	22
Abbildung 2.8 Abbaubarkeit verschiedener Stoffgruppen	25
Abbildung 2.9 Typische Verläufe von Gasbildungskurven	30
Abbildung 3.1 VIKING-Häcksler AD 4064S	31
Abbildung 3.2 Versuchs- und Geräteapparatur nach DIN 38414	32
Abbildung 3.3 Siebturm und Rundsiebe Fa. Riesch.....	33
Abbildung 3.4 Zickzacksichter.....	34
Abbildung 4.1 Qualitativer Verlauf des theoretischen saisonalen Anfalles	39
Abbildung 4.2 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe März.....	40
Abbildung 4.3 Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im März	41
Abbildung 4.4 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe April.....	42
Abbildung 4.5 Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im April	43
Abbildung 4.6 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe Mai.....	43
Abbildung 4.7: Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im Mai	44
Abbildung 4.8 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe Juni	44
Abbildung 4.9 Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im Juni	45
Abbildung 4.10 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe Juli	45
Abbildung 4.11 Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im Juli.....	46
Abbildung 4.12 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe August.....	46
Abbildung 4.13 Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im August	47
Abbildung 4.14 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe September	48

Abbildung 4.15 Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im September .	48
Abbildung 4.16 Biogaspotenzial der Mischprobe von März bis September 2011	49
Abbildung 4.17 Biogaspotential der krautigen Probe von März bis September 2011	50
Abbildung 4.18 Ergebnisse der Handsortierung der Mischgrünproben von März bis September 2011	51
Abbildung 4.19 Vergleich der Biogaspotentiale von krautiger- und gemischter Probe.....	52
Abbildung 5.1 Verteilungsdichte- und Verteilungssumme des Siebversuchs im März	54
Abbildung 5.2 Siebober- und Siebunterlauf des 10mm Siebes	55
Abbildung 5.3 li. Grobfraction re. Feinfraction des zweiten Sichtversuchs	57
Abbildung 6.1 Vergleich des theoretischen Anfalls (li.) und des praktischen (re.).....	60
Abbildung 6.2 Gegenüberstellung des Biogaspotentials und des praktischen saisonalen Anfalls.....	62

Formelverzeichnis

Formel 2.1 Verteilungsdichte	9
Formel 2.2 Verteilungssumme	9
Formel 2.3 Mittlere Teilchengröße.....	10
Formel 2.4 Mittler Teilchengröße bei stetiger Verteilungsfunktion.....	11
Formel 2.5 Spezifische Oberfläche	11
Formel 2.6 Spezifische Oberfläche unregelmäßiger Partikel	11
Formel 2.7 Spezifische Oberfläche eines Teilchenkollektivs	11
Formel 2.8 Sauterdurchmesser	11
Formel 2.9 Massenbilanz	18
Formel 2.10 Grobgutanteil	18
Formel 2.11 Feingutanteil	18
Formel 2.12 Massenbilanz bei der Trennung	18
Formel 2.13 Trenngerade	19
Formel 2.14 Trenngrad einer idealen Klassierung	19
Formel 2.15 Trennschärfegrad	20
Formel 2.16 Chemische Reaktionsgleichung der Acetogenese	23
Formel 2.17 Chemische Reaktionsgleichung der Acetogenese	23
Formel 2.18 Chemische Reaktionsgleichung der Methanogenese	23
Formel 2.19 Chemische Reaktionsgleichung der Methanogenese	23
Formel 2.20 Buswellgleichung.....	25
Formel 2.21 Verhältnis von Impfschlamm zu Substrat	27
Formel 2.22 Volumen des trockenen Gases.....	28
Formel 2.23 Mengenanteil trockenes Gas	28
Formel 2.24 Anteil der Gasproduktion des Impfschlammes	29
Formel 2.25 Spezifische Faulgasproduktion	29

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
Abb.	Abbildung
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
d	Tag
FM	Frischmasse
g	Gramm
H _u	Unterer Heizwert
kg	Kilogramm
L	Liter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
Mg	Megagramm
mm	Millimeter
li	links
re	rechts
oTS	Organische Trockensubstanz
TS	Trockensubstanz
WMO	World Metrological Organisation
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
VDI	Verbund Deutscher Ingenieure
NawaRos	Nachwachsende Rohstoffe
DIN	Deutsche Industrienorm
LFU	Bayrisches Landesamt für Umwelt
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
RRSB	Rosin, Rammler, Sperling, Bennett

1. Einleitung

Vor dem Hintergrund des steigenden Primärenergiebedarfs und der Verknappung von fossilen Ressourcen sowie des voranschreitenden Klimawandels ist es notwendig, die Energieversorgung nachhaltig, effizient und umweltverträglich zu gestalten. Eine wichtige Grundlage hierfür bietet die verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien. Besonders die Energie aus nachhaltig erzeugter Biomasse stellt hierbei einen wichtigen Baustein dar. Durch die räumliche und zeitliche Flexibilität ist es möglich, sie sowohl zur Deckung von Grund- als auch von Spitzenlasten einzusetzen und so die fossilen Energieträger ohne schädliche Treibhausgasemissionen zu substituieren. Im Jahr 2007 deckte die Bioenergie (bezogen auf den Endenergieverbrauch) in Deutschland 3,9 % des gesamten Stromverbrauchs, 6,1 % des gesamten Wärmebedarfs und 7,3 % des gesamten Kraftstoffverbrauchs. Insgesamt trug die Bioenergie mit 4,9 % zur Deckung des gesamten Primärenergieverbrauchs bei (BMU, 2009). Bislang werden für die Herstellung von Biomethan und Bioethanol hauptsächlich Energiepflanzen wie z.B. Mais oder Raps verwendet. Da jedoch der Bedarf an Bioenergie steigt werden zunehmend wertvolle Agrarflächen für den Anbau von Energiepflanzen genutzt. Deshalb rückt zum einen die Diskussion „Tank oder Teller“ vermehrt in den Fokus der Öffentlichkeit, zum anderen entstehen auch nachteilige Umwelteffekte, wie z.B. Bodenerosion und –verarmung durch den monokulturellen Anbau. Als alternative Bioressourcen bieten sich Stoffströme an, die zurzeit kaum oder gar nicht genutzt und oft kostenpflichtig entsorgt werden, wie z.B. organische Abfälle. Speise- und Lebensmittelreste werden bereits teilweise in Biogasanlagen verwertet (z.B. Stadtreinigung Hamburg, Stelling Moor), die Grünabfälle jedoch kaum beachtet. Das große, jährlich anfallende Aufkommen an Grünabfällen bietet in Verbindung mit optimierten Verwertungswegen die Möglichkeit nutzbare Energie zu generieren.

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Das in privaten Gärten, öffentlichen Grünanlagen, Naturschutzgebieten, Straßenrändern oder auch in Gärtnereibetrieben und der Landwirtschaft anfallende Mischgrün wird hauptsächlich kompostiert und kaum energetisch genutzt. Um eine energetische Verwertung zu ermöglichen kommen die thermische Verwertung durch eine Verbrennung und die energetische Verwertung mittels Biogaserzeugung in Frage. Mischgrün kann bei genauerer Betrachtung in eine krautige Fraktion, die alle „grünen“ Pflanzenteile enthält und eine holzige Fraktion eingeteilt werden. Während sich für die krautige Fraktion, auf Grund des geringen Ligno-Cellulose-Anteils, des hohen Wassergehaltes und der leichten Abbaubarkeit, die anaerobe Fermentation anbietet, ist für die holzige Fraktion eine Verbrennung zu bevorzugen. Das Mischgrün ist jedoch starken jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Um diese wachstumsabhängigen Rhythmen effektiv nutzen zu können, ist es notwendig, das Material jahreszeitlich abhängig zu verwerten.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass sich die Grünabfälle nicht, hinsichtlich krautiger und holziger Eigenschaften, separiert einsammeln lassen. Das liegt zum einen daran, dass Pflanzenteile wie Zweige

und Blätter oft fest miteinander verbunden und schwer zu trennen sind (z.B. Nadelhölzer und Heckenschnitte) und zum anderen, an der fehlenden Bereitschaft der Anlieferer, die krautigen Grünabfälle (z.B. Rasenschnitt, Blumen, Kräuter) getrennt von holzigen Grünabfällen (z.B. wie Baumschnitten, Äste, Wurzeln) einzusammeln und separaten Verwertungswegen zuzuführen.

Eine weitere Möglichkeit Substratströme mit verbesserter Verwertbarkeit zu schaffen, könnten mechanische Trennverfahren darstellen, mit deren Hilfe eine krautige und eine holzige Fraktion generiert werden könnte. So wäre es möglich einen idealen Verwertungskreislauf zu schaffen, der sowohl hohe Wirkungsgrade als auch geschlossene Nährstoffkreisläufe generiert.

Um eine optimale Energiegewinnung aus Mischgrün zu ermöglichen, können verschiedene Verfahren zur Trennung eingesetzt werden. Das entscheidende Kriterium für die Sinnhaftigkeit der Trennung ist die erreichte Trennschärfe in Hinblick auf die krautige und holzige Fraktion. Mit Erreichen eines geringen Fehlkornanteils sollte der energetische Ertrag beider Fraktion soweit gesteigert werden, dass die Trennung als effektiver Beitrag zur Energiegewinnung betrachtet werden kann.

1.2 Ziel der Arbeit

Diese Arbeit soll eine Grundlage für die energetische Nutzung von Mischgrün schaffen. Ein Ziel hierbei ist es die jahreszeitlichen Schwankungen der Zusammensetzung von Mischgrün zu charakterisieren um das Material bestmöglich energetisch verwerten zu können. Das zweite Ziel ist die Untersuchung welche Auswirkungen Trennverfahren auf die Zusammensetzung von Mischgrün haben. Dabei sollten eine krautige und eine holzige Fraktion erzeugt werden, die dann unterschiedlichen Verwertungswegen zugeführt werden können.

1.3 Methodik

Zuerst werden die verschiedenen Definitionen von Mischgrün dargestellt und die chemischen und biologischen Zusammensetzungen analysiert. Anschließend werden die jahreszeitlichen Einflüsse auf die Zusammensetzung theoretisch ermittelt und mit praktisch durchgeführten Versuchen belegt. Anschließend erfolgt eine energetische Betrachtung des Mischgrüns anhand der Biogaspotentiale. Die energetische Betrachtung beinhaltet Batchversuche nach der VDI Richtlinie 4630, mit deren Hilfe der maximale Biogasertrag bestimmt wird. Es wird geprüft, welches maximale Biogaspotential das anfallende Material in Abhängigkeit von den jahreszeitlichen Schwankungen hat. So werden die Grundlagen für eine ganzjährige energetische Nutzung des Mischgrüns theoretisch und praktisch analysiert und eine Empfehlung für weiteres Vorgehen getroffen.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Analyse geeigneter Trennverfahren. Zunächst werden durch eine Literaturrecherche geeignete Trennverfahren gesichtet und ausgewählt. Anschließend werden diese in Hinblick auf die Trennung des Mischgrüns bewertet. Die vielversprechendsten Verfahren werden durch praktische Trennversuche geprüft. Ziel hierbei ist das Generieren einer krautigen und einer holzigen Fraktion.

2. Theoretische Grundlagen

Um eine optimierte Verwertung für Mischgrün zu schaffen müssen zunächst die theoretischen Grundlagen recherchiert und erläutert werden. Nachfolgend wird zunächst eine Definition für den Begriff „Mischgrün“ eingeführt und auf die elementare und biologische Zusammensetzung eingegangen. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der gängigsten Trennverfahren. Abschließend werden die Grundlagen des anaeroben Abbaus und der im Verlauf der Arbeit genutzten Bachverfahren, nach VDI Richtlinie 4630 (2006) dargestellt.

2.1 Zusammensetzung von Mischgrün

Mischgrün beinhaltet alle Stoffe, die bei der Gartenarbeit an privaten und öffentlichen Flächen sowie der Land- und Forstwirtschaft anfallen. Das Material ist inhomogen und die Zusammensetzung starken Schwankungen unterworfen. Diese hängen von vielen Faktoren, wie z.B. der Art der Bewirtschaftung, dem Ort und der Zeit ab. Die optimale Verwertung des anfallenden Materials bezieht sich auf die genaue Zusammensetzung bzw. das Verhältnis der einzelnen Komponenten. Deshalb wird in diesem Kapitel zunächst eine Definition erörtert und anschließend die biologische Zusammensetzung charakterisiert.

2.1.1 Definition von Mischgrün

Für den Begriff „Mischgrün“ existiert bislang keine eindeutige Definition. In der *BioAbfV* sind Grünabfälle den Bioabfällen zugeordnet und werden im § 2 Abs.1 als „Abfälle tierischer oder pflanzlicher Herkunft, die durch Mikroorganismen, bodenbürtige Lebewesen oder Enzyme abgebaut werden können“ bezeichnet. Hierzu gehören insbesondere die in Anhang 1 Abs. 1 genannten Abfälle; Bodenmaterial ohne wesentlichen Anteil an Bioabfällen gehören nicht zu den Bioabfällen; Pflanzenreste die auf Land- oder Forstwirtschaftlichen Flächen verbleiben, sind keine Bioabfälle. (BioAbfV, 2010)

Nach Anhang 1 Nr. 1 der *BioAbfV* werden diese präzisiert und unter dem Abfallschlüssel 02 01 03 aufgelistet. Hierzu zählen folgende Grünabfälle:

- Garten und Parkabfälle
- Landschaftspflegeabfälle
- Gehölzrückstände
- Grün- und Strauchschnitt von Straßenrändern (Straßenbegleitgrün)
- Pflanzliche Bestandteile des Treibsels

Bei den oben beschriebenen Grünabfällen handelt es sich ebenfalls um eine anerkannte Biomasse nach der *BiomasseV* §2 Abs. 1 und 2. Im Absatz 1 ist definiert, dass Biomasse ein Energieträger aus Phyto- und Zoomasse ist. Hierzu gehören auch aus Phyto- und Zoomasse resultierende Folge- und Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle, deren Energiegehalt aus Phyto- und Zoomasse stammt. Nach Absatz 2 wird Biomasse insbesondere in die folgenden Punkte eingeteilt:

1. Pflanzen und Pflanzenbestandteile
2. aus Pflanzen oder Pflanzenbestandteilen hergestellte Energieträger, deren sämtliche Bestandteile und Zwischenprodukte aus Biomasse im Sinne des Absatzes 1 erzeugt wurden,
3. Abfälle und Nebenprodukte pflanzlicher und tierischer Herkunft aus der Land-, Forst- und Fischwirtschaft,
4. Bioabfälle im Sinne von § 2 Nr. 1 der Bioabfallverordnung, aus Biomasse im Sinne des Absatzes 1 durch Vergasung oder Pyrolyse.

Da die *BiomasseV* außerdem den Anwendungsbereich des *EEG* regelt, können die Grünabfälle als Energieträger einer energetischen Verwertung zugeführt werden. Nach dem *KrW-/AbfG*, ist es möglich die Abfälle sowohl energetisch als auch stofflich zu verwerten, jedoch sollte dabei die umweltverträglichere Verwertungsart Priorität haben.

Im Anhang IV Teil 2 der Verordnung (EG) 1013/2006 des europäischen Parlaments und Rates über die Verbringung von Abfällen (2006) wird Mischgrün unter 0201, Abfälle aus Landwirtschaft, Gartenbau, Teichwirtschaft, Forstwirtschaft, Jagd und Fischerei anfallen aufgeführt.

Nach Klärung der Rechtslage ist es jedoch für die praktische Arbeit sinnvoll, eine zusätzliche Definition die sich an dem anfallenden Material richtet:

Als Mischgrün werden alle bei der Gartenarbeit, Landschaftspflege und Landwirtschaft entstehenden Pflanzenabfälle, in der Form wie sie bei den Entsorgern auf Recycling-, Abfallwirtschaftshöfen usw. anfallen, bezeichnet.

Hier entstehen große Haufwerke, die viele verschiedene Komponenten wie z.B. Baum-, Strauch- und Rasenschnitt, Äste, Zweige, Laub, Blumen und Blumenresten, Wildkräuter, Erdrückstände beinhalten. Die Zusammensetzung unterliegt starken Schwankungen und ist hauptsächlich von den vegetativen Gegebenheiten abhängig.

2.1.2 Elementare Zusammensetzung von Mischgrün

Pflanzen enthalten hauptsächlich Wasser (bis über 90 % Gewichtsanteil). Die nach der Entfernung des Wassers zurückbleibende Trockensubstanz (TS) besteht zum größten Teil aus den Nichtmetallen Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Schwefel (S) und Phosphor (P). Diese Verbindungen liegen zu einem geringen Teil auch als Ionen vor. Daneben finden sich zahlreiche

weiter Elemente, die in ionischer Form auftreten. Als kovalente Bindungspartner in organischen Verbindungen kommen diese dagegen gar nicht vor, z.B. Magnesium (Mg), Calcium (Ca) oder Chlor (Cl). Dem pflanzlichen Bedarf entsprechend werden Makro- und Mikroelemente unterschieden (Weiler, 2008). Die mittlere Zusammensetzung der Pflanzensubstanz ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2.1: Mittlere Zusammensetzung der Pflanzensubstanz (Kaltschmitt, 2009)

	Elemente	Pflanzentrockensubstanz in %
Makronährstoffe	C	42-47
	H	6
	O	40-44
	N	1-5
	K	0,3-5
	Ca	0,3-5
	Mg	0,05-1
	S	0,05-0,8
	P	0,05-0,8
Makro- und Mikronährstoff	Fe	0,005-0,1
Mikronährstoff	B	0,005-0,01
	Cu	0,0002-0,002
	Mn	0,002-0,03
	Zn	0,001-0,01
	Na	0,02-0,8
	Si	0,05-3
	Cl	0,02-1

2.1.3 Biologische Zusammensetzung von Mischgrün

Das anfallende Mischgrün beinhaltet viele verschiedene Pflanzen mit unterschiedlicher elementarer Zusammensetzung. Für eine optimale Verwertung der anfallenden Masse ist daher eine Aufteilung in einen krautigen und einen holzigen Anteil sinnvoll.

Holzige Biomasse des Mischgrüns

Der im Mischgrün enthaltene Anteil an holziger Biomasse entstammt ausschließlich der Garten- und Landschaftspflege. Die in der Forstwirtschaft anfallende Masse sowie Industrie- und Altholz werden hier nicht betrachtet, da sie auf andern Wegen der Entsorgung zugeführt werden. Die enthaltenen Komponenten sind hauptsächlich Äste und Zweige sowie vereinzelt Stammholz und Wurzeln.

Die holzige oder auch holzartig genannte Biomasse ist durch ihren hohen Lignin- und Celluloseanteil gekennzeichnet. Die Lignineinlagerungen, die der Festigung dienen, finden sich außer im Holz auch in andern Geweben. Im Unterschied zu den andern in Pflanzen vorkommenden Polymeren, besitzt Lignin keine definierte Struktur, es lässt sich bestenfalls ein Konstitutionschema erkennen. Der Grund hierfür besteht darin, dass die monomeren Bausteine, die Zimtalkohole, bei der Bildung des Lignins

enzymatisch in Radikale überführt werden, die dann untereinander, aber auch mit den übrigen Zellwandkomponenten, unter Ausbildung kovalenter Bindungen verschiedenster Typen reagiert. So entstehen amorphe Polymere riesigen Ausmaßes, die ihrerseits mit Makromolekülen in ihrer Umgebung verbunden sind. Lignin ist enzymatisch nur schwer abbaubar und dient nicht nur der Festigung, sondern ist zudem ein idealer Schutzstoff beispielsweise gegen eindringende Mikroorganismen (Weiler, 2008).

Für den in Kapitel 2.5 beschriebenen, anaeroben Abbauprozess ist die Abbaubarkeit der Substrate entscheidend. Da Lignin gar nicht und Cellulose nur sehr schlecht abgebaut werden kann, eignet sich der holzige Anteil des Mischgrüns nicht für die anaerobe Fermentation. Auf Grund des geringen Wasser- und des hohen Kohlenstoffanteils ist eine Nutzung als Festbrennstoff anzustreben.

Krautige Biomasse des Mischgrüns

Als krautige Biomasse werden alle Pflanzenteile bezeichnet, die einen geringen Ligno-Cellulose-Anteil aufweisen. Hierzu gehören alle halmgutartigen Gewächse wie Gras- und Rasenschnitt, aber auch Blumen, Kräuter, Blätter etc. Die in diesen Pflanzenteilen enthaltenen Stoffe, wie Zucker und Hemicellulose, sind sehr gut durch Mikroorganismen aufzuschließen, während Cellulose, Stärkekörner oder Pektin, aufgrund ihrer Zellstruktur langsamer verstoffwechselt werden. Insgesamt eignen sich die im Mischgrün enthaltenen krautigen Pflanzenteile gut für eine energetische Verwertung durch die anaerobe Fermentation. Die thermische Verwertung ist besonders wegen der hohen Ascherückstände und des hohen Wassergehalts für den krautigen Anteil ungeeignet.

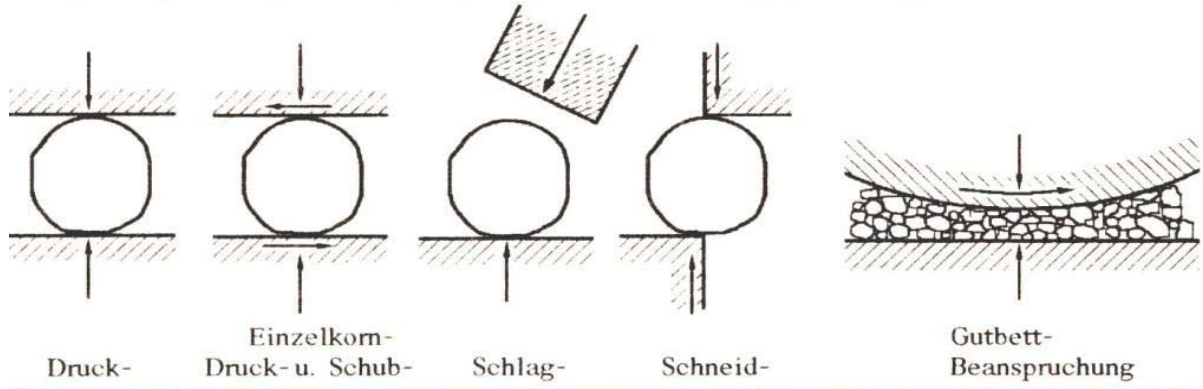
2.2 Zerkleinern

Die Partikelgröße fester Stoffe wird durch die Zerkleinerung verringert. Der Zweck der Zerkleinerung besteht nach Hemming/Wagner (2004) hauptsächlich aus:

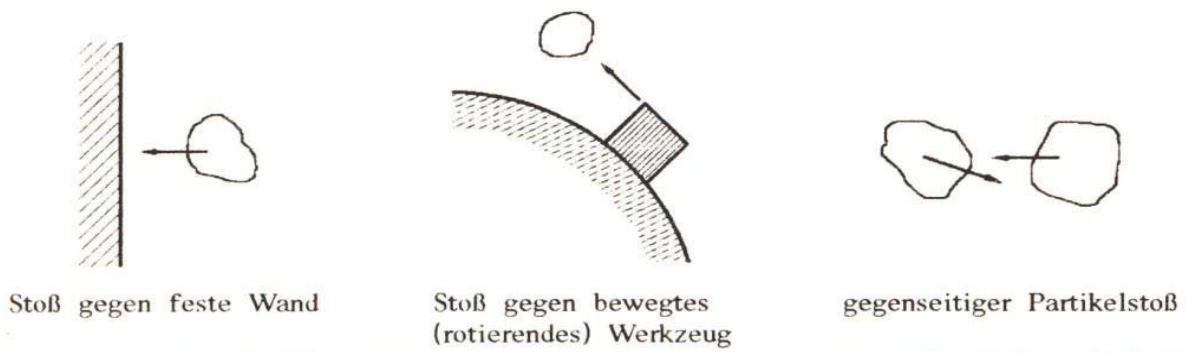
- Der Vorbereitung von Rohstoffen auf Trennverfahren,
- der Vorbereitung von Rohstoffen auf chemische Reaktionsverfahren und
- der Herstellung einer für die Endproduktqualität erforderliche Teilchengröße.

Für die Zerkleinerung stehen nach Rumpf (1975) vier verschiedene Beanspruchungsarten zu Verfügung die in Abbildung 2.1 dargestellt sind. Der Widerstand, den das Material einer zerkleinernden Beanspruchung entgegen setzt, ebenso wie das Ergebnis der Zerkleinerung, sind sowohl von den Beanspruchungsbedingungen wie vom Material selbst abhängig. Werden definierte Bedingungen konstant gehalten, können materialspezifische zerkleinerungstechnische Stoffeigenschaften bzw. Kennwerte für die Mahlbarkeit des betroffenen Produkts gewonnen werden.

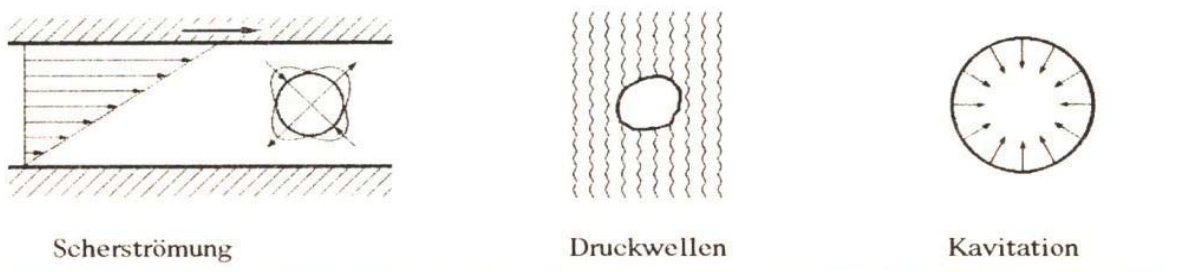
I Beanspruchung zwischen (zwei) Zerkleinerungswerkzeugen



II Beanspruchung an einem Zerkleinerungswerkzeug (Prall)



III Beanspruchung durch das umgebende Medium



IV Beanspruchung durch nichtmechanische Energiezufuhr

thermisch, elektromagnetisch, chemisch induzierte mechanische Spannungen

Abbildung 2.1 Beanspruchungsarten nach Rumpf (1975)

Die für die Zerkleinerung von Mischgrün nach Raussen, Hackländer und Siepenkothen (Witzenhausen, 2010) in Frage kommenden Zerkleinerer sind in folgende zwei Hauptgruppen unterteilt:

- Schnellläufer (schlagende Beanspruchung)
- Langsamläufer (reißende Beanspruchung)

Bei der Zerkleinerung nach dem Prinzip des Schnellläufers wird das Material stärker beansprucht, wodurch sich der Aufschluss hinsichtlich der Korngrößenverteilung anders verhält, als nach einer langsamen Zerkleinerung. Als Folge der hohen Umfangsgeschwindigkeit des Zerkleinerungswerkzeugs im Schnellläufer und der schlagenden Arbeitsweise entsteht ein höherer Feingutanteil als bei der Beanspruchung durch einen Langsamläufer. Durch die Art der mechanischen Bearbeitung werden sowohl holzige, als auch krautige Bestandteile des Mischgrüns gut zerkleinert bzw. aufgefasernt. Bei der Beanspruchung des Materials durch einen Langsamläufer werden holzige und strauchige Stoffe vornehmlich einer scherenen Beanspruchung ausgesetzt, wobei insbesondere durch das elastische Verhalten des krautigen Materials, dieses nur bedingt zerkleinert wird. Holzige Materialien, wie z.B. Äste, brechen beim abscheren. In der nachfolgenden Abbildung 2.2 Sind die Sieblinien für drei unterschiedliche Zerkleinerungsaggregatetypen nach Raussen, Hackländer und Siepenkothen (Witzenhausen, 2010) dargestellt.

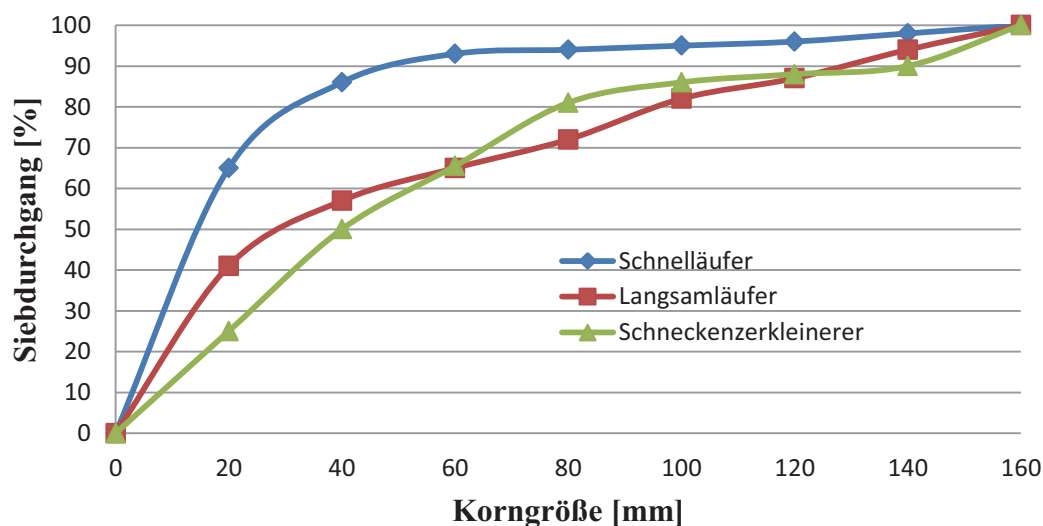


Abbildung 2.2 Sieblinien für drei unterschiedliche Zerkleinerungsaggregatetypen

Die für diese Arbeit relevante Hammermühle arbeitet nach der Beanspruchungsart II an einem Werkzeug und gehört zu den Schnellläufern. Die technischen Daten der verwendeten Maschine sind Kapitel 3 Material und Methoden zu entnehmen. Das Zerkleinern ist notwendig, um zum einen fest miteinander verbunden Pflanzenteile, wie zweige und Blätter voneinander zu lösen und zum anderen, um die anschließenden Verfahrensschritte durchführen zu können. Für Trennversuche und

Biogaspotentialtests ist das Material in seiner Ausgangsgröße ungeeignet. Für den Windsichter im Labormaßstab können, auf Grund der Bauweise, nur Partikel mit einer Korngröße kleiner 5mm eingesetzt werden. Größere Partikel führen zur Verstopfung des Sichtraums und somit zum Abbruch des Versuchs. Auf eine Betrachtung der Effektivität und des Aufwands kann verzichtet werden, da die Zerkleinerung im Rahmen dieser Arbeit nur als Verfahrensschritt für die weitere Analyse dient und nicht auf technische Anlagen angewendet werden soll.

2.3 Partikeln und disperse Systeme

Stoffsysteme die aus sehr vielen Einzelteilchen bestehen liegen häufig als Haufwerk, als Schüttung, als Pulver aber auch als Tröpfchen in der Luft oder als Bläschen in einer Flüssigkeit vor. Solche Partikelkollektive nennt man disperse Systeme. Sie bestehen aus sehr vielen Einzelteilchen, der dispersen Phase und dem umgebendem Medium, der kontinuierlichen Phase. Mischgrün kann, besonders im zerkleinerten Zustand, als Schüttgut angesehen werden wobei die einzelnen Partikel die disperse Phase darstellen und die umgebende Luft die kontinuierliche Phase bildet. Um disperse Systeme zu kennzeichnen werden Partikelgrößenverteilungen und Feinheitsmerkmale sowie die Darstellung und Kennzeichnung von Verteilungen angewandt. Diese werden in den folgenden beiden Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2 näher erläutert um eine Grundlage für die Auswertung der später folgenden praktischen Trennverfahren zu schaffen.

2.3.1 Partikelgrößenverteilungen

Zur Kennzeichnung von Verteilungen disperser Güter werden die Verteilungssumme und die Verteilungsdichte herangezogen. Die Verteilungssumme ist der Anteil an der Gesamtmenge, der unterhalb einer bestimmten Partikelgröße x_i liegt.

Formel 2.1 Verteilungsdichte

$$Q_r(x_i) = \frac{\text{Teilmenge}(x_{\min} \dots x_i)}{\text{Gesamtmenge}(x_{\min} \dots x_{\max})}$$

Die Verteilungsdichte bezeichnet den Anteil der Gesamtmenge in einem Größenintervall bezogen auf die Intervallbreite Δx_i

Formel 2.2 Verteilungssumme

$$q_{ri} = \frac{\text{Teilmenge}(x_{i-1} \dots x_i)}{\text{Gesamtmenge} \cdot \text{Intervallbreite}}$$

Der Index „r“ dient zur die Bezeichnung der verwendeten Mengenangabe und unterliegt nach Stieß (1992) der in Tabelle 2.2 gezeigten Vereinbarung:

Tabelle 2.2 Systematische Indizierung der Mengenangabe

Index	Mengenangabe	Anwendung
0	Anzahl	sehr häufig
1	Länge	sehr selten
2	Fläche	häufig
3	Volumen	häufig
3*	Masse	sehr häufig

Es ist häufig Sinnvoll die Teilchengrößenverteilung durch Angabe eines Wertes zu kennzeichnen. Hierzu stehen Werte von besonders praktischer Bedeutung zur Verfügung. Der Medianwert $x_{h,50}$, der Modalwert $x_{h,r}$, die mittlere Teilchengröße \bar{x} , die Spezifische Oberfläche S_v und der Sauterdurchmesser d_{32} .

Medianwert $x_{h,50}$

Der Medianwert $x_{h,50}$ beschreibt diejenige Teilchengröße, unterhalb derer 50% der Teilchenmenge liegen. Daher muss auch die Mengenangabe durch „r“ angegeben werden. Der Medianwert kann aus dem Schnittpunkt der Verteilungssummenkurve $Q_r(x)$ mit der 50% Horizontalen erhalten werden. Dieser Wert lässt sich oft sehr schnell und einfach bestimmen, da nur ein kleines Mittelstück gemessen werden muss. Ein Nachteil stellt allerdings die Unkenntnis über den restlichen Verlauf der Verteilung dar.

Modalwert $x_{h,r}$

Der Modalwert kann als Maximum der Verteilungsdichtekurve, bzw. als mittlere Teilchengröße in der höchsten Säule des Histogramms entnommen werden.

Mittlere Teilchengröße \bar{x}

Zur Bildung dieses Mittelwerts tragen alle vorkommenden Teilchengrößen entsprechend ihrem Mengenanteil im Kollektiv bei. Die mittlere Teilchengröße x_i im Intervall wird mit dem entsprechenden Mengenanteil gewichtet, und über diese gewichteten Werte wird gemittelt.

Formel 2.3 Mittlere Teilchengröße

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\mu_i}{\mu_{ges}}$$

$$= \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \cdot q_{ri} \cdot \Delta x_i = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \cdot \Delta Q_{r,i}$$

Bei stetiger Darstellung der Verteilungsfunktion gilt

Formel 2.4 Mittler Teilchengröße bei stetiger Verteilungsfunktion

$$\bar{x}_r = \int_{x_{min}}^{x_{max}} x q_r(x) dx$$

Spezifische Oberfläche S_v

Die spezifische Oberfläche einer Kugel mit dem Durchmesser d beträgt:

Formel 2.5 Spezifische Oberfläche

$$S_v = \frac{6}{d}$$

Wenn es sich um unregelmäßig geformte Teilchen der Größe x und dem Formfaktor φ handelt gilt:

Formel 2.6 Spezifische Oberfläche unregelmäßiger Partikel

$$S_v = \frac{6 \cdot \varphi}{x}$$

In einem Teilchenkollektiv ist die spezifische Oberfläche:

Formel 2.7 Spezifische Oberfläche eines Teilchenkollektivs

$$S_v = \frac{S_{ges}}{V_{ges}}$$

Sauterdurchmesser d_{32}

Der Sauterdurchmesser stellt die der spezifischen Oberfläche des gesamten Teilchenkollektivs entsprechender mittlerer Teilchengröße dar. Dieser Kennwert ist besonders für Vorgänge, die sich an Partikeloberflächen abspielen von Bedeutung. Er lässt sich in folgender Form darstellen:

Formel 2.8 Sauterdurchmesser

$$d_{32} = \frac{\bar{x}^3}{\bar{x}^2} = \frac{6\varphi}{S_v}$$

2.3.2 Darstellung und Kennzeichnung von Verteilungen disperser Güter

Bei Wachstumsprozessen, beim Mischen oder beim Trennen entstehen und verändern sich die Partikelverteilungen. Da hierbei viele Zufallsmomente wirken, ist eine Prognose über die Verteilung nahezu unmöglich. Im Bereich der Korngrößenanalytik sind die in Abbildung 2.3 abgebildeten Verteilungen zur Approximation der gemessenen Werte geeignet.

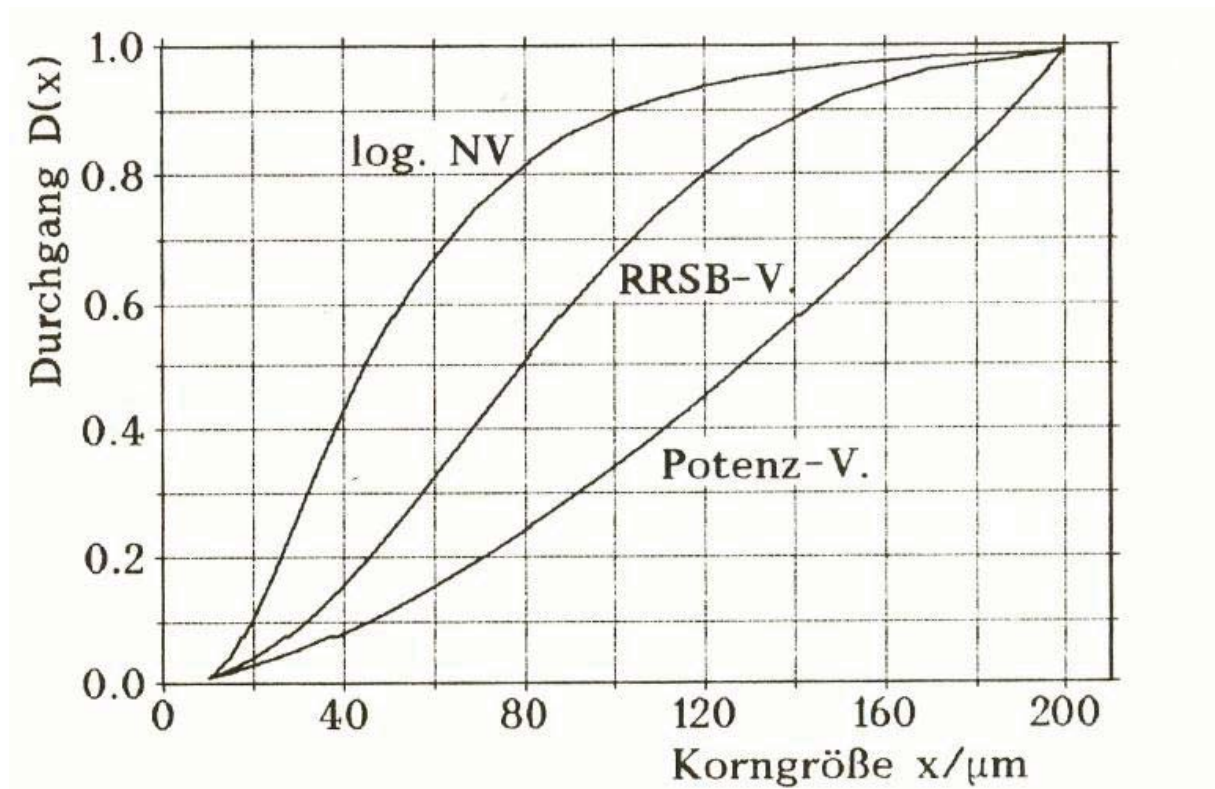


Abbildung 2.3 Vergleich der drei genormten Verteilungsfunktionen

Logarithmische Normalverteilung

Die Logarithmische Normalverteilung entsteht vor allem dann, wenn ein Korn zufällig in zwei beliebig große Teile gespaltet wird und sich dieser Vorgang mehrmals wiederholt, wie er häufig in Zerkleinerungsmaschinen stattfindet. Die Auswertung erfolgt im logarithmischen Wahrscheinlichkeitsnetz. Ist die Durchgangssummenkurve eine Gerade, so kann die Verteilung durch eine logarithmische Normalverteilung approximiert werden. Lageparameter ist der Medianwert x_{50} , Streuungsparameter ist die empirische Standardabweichung s .

Potenzverteilung

Die Potenzverteilung zur Approximation einer gemessenen Verteilung hat sich in der Praxis häufig bewährt, diese wurde durch empirische Untersuchungen gefunden. Im doppelt logarithmisch geteiltem Potenznetz, ergibt die Massenverteilungssummenkurve der Potenzverteilung eine Gerade, die durch die Steigung m und durch die Abszisse x_{\max} eindeutig gekennzeichnet ist. Da dieser maximale Wert experimentell schwer zu bestimmen ist, erfolgt häufig eine Normierung auf den Lageparameter x_{80x} , d.h. auf den Feinheitskennwert $Q_r=0.8$

RRSB Verteilung

Diese empirische Verteilung ist die wichtigste in der praktischen Korngrößenanalytik. Sie ist besonders geeignet für Zerkleinerungsvorgänge, bei denen viele elementare Zerkleinerungsvorgänge nacheinander in stochastischer Folge auf das einzelne Korn einwirken, wie z.B. beim Feinmahlen. In einem Netz mit logarithmisch geteilter Abszissenachse und doppelt geteilter Ordinatenachse ergibt die Massenverteilungssummenkurve eine Gerade. Auch diese Verteilung ist durch zwei Parameter eindeutig festgelegt. Der Punkt x' ist der dem Durchgang $D(x)=1-1/e=0,632$ zugeordnete Lageparameter. Streuungsparameter ist der Exponent n der RRSB-Verteilung. Im Allgemeinen ist mit den genannten Verteilungen die Approximation nur im mittleren Bereich von 1 bis 90% der Verteilungssumme recht genau möglich, falls nicht fehlende Korngrößen (Ausfallkörnungen) dies erschweren. Unterhalb und oberhalb dieser Bereiche muss mit Abweichungen gerechnet werden.

2.4 Theorie der Trennverfahren

In der Verfahrenstechnik zählen Trennverfahren zu den wichtigsten und vielfältigsten Operationen. Rohstoffe und Zwischenprodukte liegen selten in reiner Form vor sondern nahezu immer als Gemische aus mehreren Komponenten mit unterschiedlichen Eigenschaften. Diese Variationen in den Eigenschaften werden in der Verfahrenstechnik für die Trennung ausgenutzt. Geometrische und stoffliche Eigenschaften gelten dabei als die wichtigsten Trennmerkmale. Bei mechanischen Trennverfahren handelt es sich im Wesentlichen um die Trennung von dispersen Systemen voneinander oder von einer kontinuierlichen Phase. Praktisch alle Trennverfahren benutzen dabei das gleiche Grundprinzip. Durch die Einwirkung konkurrierender Kräfte auf die verschiedenen Komponenten, werden diese zu verschiedenen Orten des Trennapparats bevorzugt transportiert, und dort entnommen (Stieß, 1994). In folgendem Kapitel werden die, für die Trennung von Mischgrün in eine krautige und eine holzige Fraktion in Frage kommenden Trennverfahren erörtert.

2.4.1 Übersicht von Trennverfahren

Eine erste Einteilung der Trennverfahren erfolgt anhand der Aggregatzustände der zu trennenden Medien. Dabei wird zwischen der Trennung von zwei oder mehreren Festen Stoffen (im weiteren Verlauf als Fest-Fest-Trennung bezeichnet), von festen und flüssigen Stoffen, von zwei flüssigen Stoffen, und die Trennung von festen oder flüssigen Stoffen aus einer Gasphase unterschieden. Bei dem Trennprozess für Mischgrün handelt es sich um eine Fest-Fest-Trennung, weshalb im weiteren Verlauf, auch nur auf die hierfür geeigneten Trennverfahren eingegangen wird.

Allgemein werden Fest-Fest Trennverfahren zunächst nach den physikalischen Merkmalen, die zur Trennung genutzt werden eingeteilt. Es wird zwischen Klassieren, dem Trennen nach Feinheitsmerkmalen (Größe Volumen, Oberfläche, Durchmesser, Form) und dem Sortieren, dem Trennen nach stofflichen Eigenschaften (Dichte, Leitfähigkeit, elektrische Aufladbarkeit, Benetzbarkeit) unterschieden. In der nachfolgenden Tabelle 2.3 sind die möglichen Trennverfahren aufgelistet.

Tabelle 2.3 Zur Auswahl stehende Trennverfahren

Trennverfahren	Sortieren	Klassieren	genutzte physikalische Größen	Beispiel für Trennaggregate
Sieben		x	Massen-, Volumen, Oberflächenkräfte	Wurfsieb, Rüttelsieb, Schwingsieb, Mogensen-Sizer
Sichten	x	x	Schwerkraft, Fliehkraft	Fliehkraft-, Schwerkraft, Umlenk-Gegenstromsichter
Klauben	x	x	Optische Einschätzung	Sortiertisch
Sedimentation	x	x	Auftrieb/Sinkgeschwindigkeit, Fliehkraft	Suspensionsverfahren, Überschichtungsverfahren
Setzen	x	x	Haftung, Reibung	Schwingsortierer, Herd-, Rinnensetzer

2.4.2 Siebklassieren

Das Ziel der Klassierung ist das Trennen eines Aufgabeguts mit Partikel verschiedener Größe. Alle Partikel, die größer als eine bestimmte Korngröße sind, sollen dabei in die Klasse Grobgut und alle kleineren Partikel in die Klasse Feingut gelangen. So werden aus Produkten mit breiter Korngrößenverteilung zwei oder mehrere Größenklassen abgetrennt. Technisch kann eine ideale Klassierung nicht erreicht werden. Folglich ist nach dem Klassieren immer noch Feingut in der Grobgutfraktion enthalten und umgekehrt. Dieser Anteil wird als Fehlkornanteil bezeichnet (Stieß, 1994).

Kennzeichnend für dieses Verfahren sind, die gleiche Größenordnung der Maschenweite sowie der Siebe und der Korngröße der Produkte. Beim Sieben wird jedes einzelne Korn des Aufgabegutes nach seiner geometrischen Größe und Form mit der Sieböffnung verglichen, in welchem es die Öffnung zu passieren versucht. Trennmerkmal ist also die geometrische Gestalt. Gelangt das Korn hindurch, zählt es zum Durchgang oder Siebunterlauf, bleibt es auf dem Siebboden zurück gehört es zum Rückstand oder Siebüberlauf.

Für den Transport der Körner auf dem Sieb und durch die Maschen hindurch sind Kräfte erforderlich. Hierfür kommen in Frage:

- Massen- bzw. Volumenkräfte (Schwerkraft, Stoßkräfte, Fliehkraft)
- Oberflächenkräfte (Strömungswiderstand)

Da es zeitlich und örtlich schwankende Kräfte und geometrische Verhältnisse gibt, die das Passieren der Körner durch die Maschen erschweren oder behindern, muss möglichst jedes Korn mehrfach die Gelegenheit erhalten sich mit den Maschen zu vergleichen. Dazu dient eine periodische Auflockerung und Umwälzung der auf dem Sieb liegenden Gutschicht, mittels mechanischer Energie, z.B. durch Vibration des Siebes.

Siebklassieren ist ein kostengünstiges Verfahren, das sich mit wenig Aufwand und Betriebskosten realisieren lässt. Da es möglich ist mehrere Siebstufen hintereinander zu schalten, kann die Trennung in eine krautige und eine holzige Fraktion und das Abscheiden von Störstoffen in einem Verfahrensschritt vollzogen werden. Außerdem wird der Trenngrad nicht von Witterungsgegebenheiten wie z.B. der Feuchtigkeit des Materials beeinflusst.

2.4.3 Windsichten

Ziel der technischen Windsichtung ist das Trennen von Produktströmen in zwei oder mehrere Kornklassen. Trennmerkmale sind die auf die Partikel wirkenden Kräfte, die Sinkgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit eines Teilchens im freien Fall. Da dies abhängig von Größe, Form und Dichte ist, kann durch Windsichten sowohl klassiert als auch sortiert werden.

- Bei gleicher Dichte und gleicher Kornform kann das Produkt nach seiner Korngröße getrennt werden.
- Bei äquivalenter Korngröße und Kornform, aber unterschiedlicher Dichte wird eine Trennung nach der Dichte vorgenommen. Das leichtere Material wird mit der Luft mitgerissen, das schwerere sinkt gegen den Luftstrom zu Boden.
- Sind Korngröße und Dichte gleich, so beeinflusst die Kornform die Trennung. Flächige oder faserige Teilchen werden von der Luft mitgerissen, voluminöse runde oder würfelige Teile hingegen sinken ab.

Bei Sortieraufgaben in der Praxis führt dies dazu, dass kleine Schwerteile im Leichtgut landen und sehr große kompakte Leichtteile in das Schwergut gelangen. Eine ideale Trennung bei inhomogenen, mehrkomponentigen Materialien ist technisch nicht realisierbar. Wenn sich das Material jedoch ändert, sollte die Möglichkeit bestehen, flexibel mit den Trennaggregaten zu reagieren. Grundsätzlich wird nach der Anströmrichtung, relativ zur Partikelbewegung, in Gegenstrom- und Querstrom-Sichtung und nach der Art des trennenden Feldes in Schwerkraft- und Fliehkraft-Sichtung unterschieden. Allgemein arbeitet ein Windsichter umso besser, je gleichmäßiger die Trennbedingungen für jedes einzelnes Partikel eingehalten werden können. Das bedeutet: Sowohl Strömungs- wie Kraftfeld sollten zeitlich gleich bleibend und möglichst einfach und übersichtlich sein (Stieß 1994).

Der Trennvorgang selbst ist aber nicht allein maßgebend für die Qualität eines Trennvorgangs durch Windsichtung. Vielmehr ist er eingebunden in eine Reihe von vor- und nachgestellten Verfahrensschritten die sich nach Leschonski (1986) wie in Abbildung 2.4 gezeigt darstellen lassen.

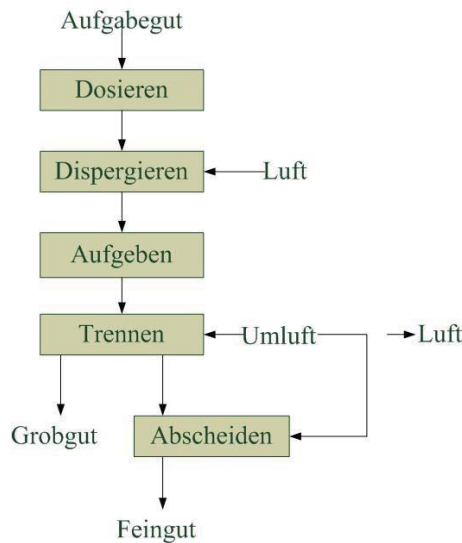


Abbildung 2.4 Verfahrensschritte des Windsichters (Stieß 1992)

Das Sichtgut muss möglichst gleichmäßig dosiert aufgegeben und dispergiert werden, damit nicht anhaftendes Feinkorn mit dem Grobgut ausgetragen wird. Bei manchen Sichtern transportiert die Sichtluft das Aufgabegut in den Apparat, bei andern wird die Sichtluft separat zugeführt. Mit abnehmen der Partikelgröße nimmt der Aufwand für das Dispergieren erheblich zu. Auch die Zuführung zur Trennzone muss im Interesse gleich bleibender Trennbedingungen kontrolliert geschehen. Bei der Trennung durch Windsichten wird das Schwergut in einen nicht durchströmten Bereich des Klassierers verwiesen und dort gesammelt, so dass es ohne Luft entnommen werden kann. Das Leichtgut wird von der Sichtluft mitgenommen und mit Hilfe eines Abscheiders von ihr getrennt. Bei Technischen Sichtern werden meistens Mischformen der nachfolgend beschriebenen Sichtprinzipien verwirklicht (Stieß, 1994).

2.4.3.1 Schwerkraftsichter

In der Guteintragszone bewegt sich der Feststoff zunächst quer zur senkrechten Aufwärtsströmung, in den Sichtzonen darüber und darunter liegt Gegenstromsichtung vor. Durch den ringförmigen Lufteintritt erfolgt eine Querstrom-Nachsichtung des herabrieselnden Grobguts.

2.4.3.2 Umlenk Gegenstromsichter

Durch Prall wird das, mittels pneumatischer Aufwärtsförderung aufgegeben, Sichtgut umgelenkt und so dispergiert. Danach erfolgt eine kreisförmige Beschleunigungsstrecke, an deren Ende eine Umlenkung um 180° mittels der entgegenströmenden Luft erzwungen wird. Sowohl durch die Absaugung der feingutbeladenen Luft, wie durch eine zusätzliche Reinluftzufuhr werden in der Trennzone feine und grobe Partikel voneinander getrennt. Das Schwergut überwindet aufgrund seiner

Trägheit den plötzlich aufwärts gerichteten Luftstrom und fällt nach unten in den Austragsbehälter, während das Leichtgut mit dem Gesamtluftstrom den Apparat verlässt.

2.4.3.3 Fliehkraftsichter

Das Aufgabegut fällt über einen Fallschacht an die Peripherie des Sichtraums. Die Sichtluft tritt durch das verstellbare Leitschaufelgitter ein, erfasst die Partikel und führt sie auf Spiralbahnen in den Sichraum, wo die Klassierung erfolgt. Das nach außen getragene und dort kreisende Grobgut wird mit einer Schneide abgeschält und mittel Transportschnecke ausgetragen. Das Feingut verlässt die Trennzone zusammen mit der Sichtluft über einen Ventilator in die Austrittsspirale.

2.4.3.4 Zick-Zack-Sichter

Der Zick-Zack-Sichter stellt eine spezielle Form des Schwerkraftsichters dar und besteht aus einer Folge von geraden Rohrabschnitten quadratischen Querschnitts, die unter einem Winkel von etwa 120° aufeinander stoßen. In diesem Kanal strömt, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, Luft der Schwerkraft entgegen und das Feinkorn steigt mit dieser nach oben. Das Grobkorn rieselt weiter nach unten. In jedem Glied des Zick-Zack-Wegs bildet sich eine Wirbelwalze aus trennkornnahem Gut aus. Jedes Teilstück eines Zickzack-Kanals bildet auf diese Weise eine Trennstufe. In den einzelnen Trennstufen herrschen verschieden Sichtprinzipien vor. Nach unten hin reichert sich an jeder Innenkante das Grobkorn an, auf dem Weg nach oben das Feingut. Auch wenn die Trennschärfe der einzelnen Stufen nur gering ist, führt die Hintereinanderschaltung vieler solcher Stufen zu sehr scharfen Trennungen.

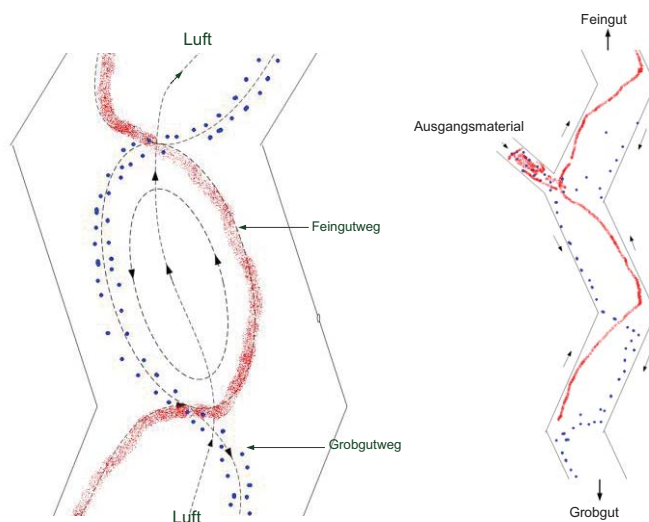


Abbildung 2.5 Trennprinzip eines Zick-Zack-Sichters

2.4.4 Setzsortieren

Als Setzen bezeichnet man den Entmischungsvorgang, der Eintritt, wenn ein zwei-Komponenten-Haufwerk fortlaufend aufgelockert und geschüttelt wird. Die Partikel mit der geringeren Dichte sammeln sich oben, die Partikel mit der größeren Dichte unten im geschüttelten Haufwerk. In einer Körnerschicht, die durch einen aufwärts gerichteten Fluidstrom aufgelockert wird, ordnen sich die spezifisch leichteren über den spezifisch schwereren Körnern ein. Es vollzieht sich eine Schichtung nach der Dichte, die von einer Klassierung überlagert sein kann. Bei pulsierendem Aufstrom wird eine periodische Fluidisierung erreicht, in der die Sichtung effektiver erfolgt als im stationären Zustand. Als Fluid wird hauptsächlich Wasser verwendet. Luft wird wegen der geringen Trennschärfe und der Notwendigkeit der engen Klassierung nur selten angewandt.

2.4.5 Klauben (Handsartieren)

Das Klauben ist ein Trennverfahren für Feststoffmischungen bei dem nach Merkmalen sortiert wird die nicht oder nur schlecht maschinell realisierbar sind. Dabei werden Fremdstoffe manuell aus dem Aufgabegut ausgelesen. Durch Vorabsiebungen sollte das Klaubegut möglichst auf „handliche“ Korngrößen, etwa zwischen 40mm und 200mm eingegrenzt werden.

2.4.6 Trennungen, Trenngradkurven

Mit der Trennung durch ein Sieb oder einen Windsichter wird das Aufgabegut in zwei Klassen aufgeteilt. Es entsteht Grobgut und Feingut. Dafür lassen sich die folgenden Massenbilanzen aufstellen

Formel 2.9 Massenbilanz

$$m_A = m_G + m_F$$

Der Grobgutanteil g wird angegeben durch

Formel 2.10 Grobgutanteil

$$g = \frac{m_G}{m_A}$$

Und entsprechend der Feingut-Massenanteil f mit

Formel 2.11 Feingutanteil

$$f = \frac{m_F}{m_A}$$

Hieraus ergibt sich

Formel 2.12 Massenbilanz bei der Trennung

$$1 = g + f$$

Siebanalysen oder andere Partikelgrößenverfahren liefern die Korngrößenverteilung grundsätzlich in diskreter Form, also als Histogramm- oder Verteilungssummenwerte an bestimmten Stützstellen. Aus

diesem Grund orientiert sich in der folgenden Darstellung die Bestimmung der Trenngradkurve, der Trenngrenze und Trennschärfe an dieser, in der Praxis vorliegenden Form und nicht an der mathematischen Darstellung stetiger Verteilungen. Aus der Differenz der Durchgangssummen-Werte des Aufgabeguts und des Grobgutes erhält man die Trenngerade mit der Formel:

Formel 2.13 Trenngerade

$$T_i = g \cdot \frac{\Delta D_{G_i}}{\Delta D_{A_i}} = \frac{m_g}{m_A} \cdot \frac{\Delta D_{G_i}}{\Delta D_{A_i}}$$

Die graphische Darstellung ergibt ein Stufendiagramm mit den Trenngeraden der einzelnen Fraktionen. Eine geschlossene Trenngradkurve kann durch die Mittelwerte der einzelnen Fraktionen gelegt werden.

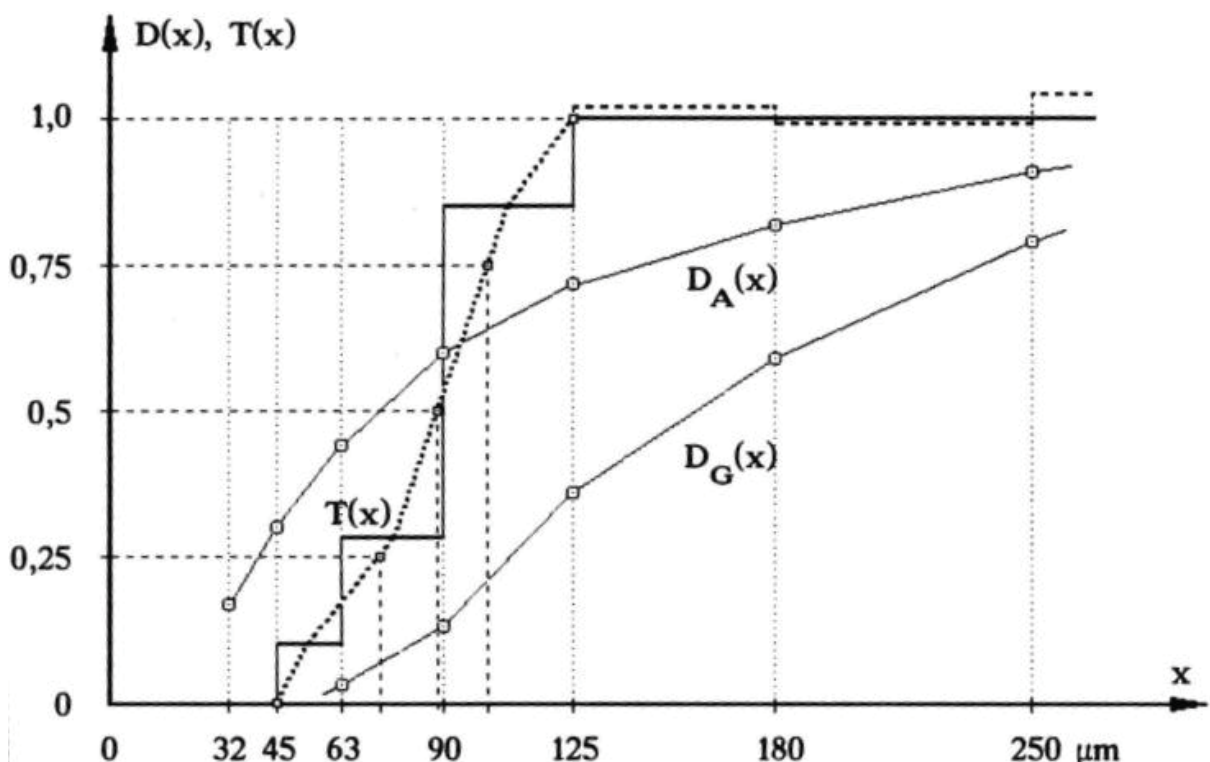


Abbildung 2.6 Beispiel zur Trenngradbestimmung nach Stieß (1992)

Zur Kennzeichnung der Übereinstimmung einer realen mit einer idealen Klassierung dient die Trennschärfe. Aus der Steilheit der Trenngradkurve lässt sich die die Güte der Klassierung erkennen. Ideal scharf ist eine Klassierung mit dem Trenngrad als Sprungfunktion von Null auf Eins.

Formel 2.14 Trenngrad einer idealen Klassierung

$$T(x) \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq x_t \\ 1 & \text{für } x > x_t \end{cases}$$

Je steiler die Trenngradkurve verläuft und je enger der Bereich zwischen x_u und x_o ist, desto schärfer ist die Klassierung. Da derartige Bewertungen Kenntnisse über die gesamte Trenngradkurve voraussetzen und die praktische Bestimmung zum einen aufwändig und zum anderen im Randbereich weniger genau ist, als im mittleren Bereich, werden für diesen Mittenbereich verschiedenen Kennwerte,

für die Steilheit, zur Charakterisierung der Trennschärfe eingeführt. Üblich ist nach Stieß (1992) vor allem der Trennschärfegrad x .

Formel 2.15 Trennschärfegrad

$$x = \frac{x_{25}}{x_{75}}$$

Nach dieser Definition ist $x=1$ für die ideale Klassierung und $x<1$ für reale Klassierungen.

Rumpf (1975) gibt als praktische Werte an:

~0,8... x ...~0,9 für scharfe Analysen-Klassierung,

~0,6... x ...~0,8 für scharfe technische Klassierungen,

~0,3... x ...~0,6 für übliche technische Klassierungen.

2.5 Anaerober Abbau

Die energetische Verwertung des Mischgrüns erfolgt über den anaeroben Abbau der Biomasse durch Mikroorganismen. Dieser Prozess ist die Grundlage für die Gewinnung von Biogas aus Biomasse und somit für die energetische Verwertung. Um das enthaltene maximale Biogaspotential des Mischgrüns zu bestimmen, werden in dieser Arbeit Biogastests im Batchverfahren nach VDI-Richtlinie 4630 durchgeführt. In diesem Kapitel werden die Grundlagen des anaeroben Abbaus beschrieben und die Berechnungsformeln der VDI-Richtlinie 4630 erläutert.

2.5.1 Definition des anaeroben Abbaus

Bei der Vergärung von Biomasse unter vollständigem Ausschluss von Sauerstoff kommt es durch Mikroorganismen zur Bildung eines methanhaltigen Produktgases. Dieses besteht hauptsächlich aus Methan (CH_4) und Kohlenstoffdioxid (CO_2). Der anaerobe Abbau ist durch verschiedene Mikroorganismengruppen, die aufeinander abgestimmt funktionieren müssen, charakterisiert. (Bischofsberger, 2005) In der Natur kommen ähnliche Prozesse in Sümpfen, Pansen von Wiederkäuern und an Böden von Seen vor (Körner, 2009).

Der Abbau verläuft über komplexe Wechselwirkungen verschiedener Mikroorganismen in vier Stufen und ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Diese laufen im Gleichgewicht zueinander ab, haben jedoch unterschiedliche Optima in Bezug auf z.B. Temperatur und pH-Wert. Als erster und geschwindigkeitsbestimmender Schritt erfolgt die Hydrolyse, danach erfolgen Acidogenese und Acetogenese und schließlich die Methanogenese, in der das gewünschte Methan gebildet wird.

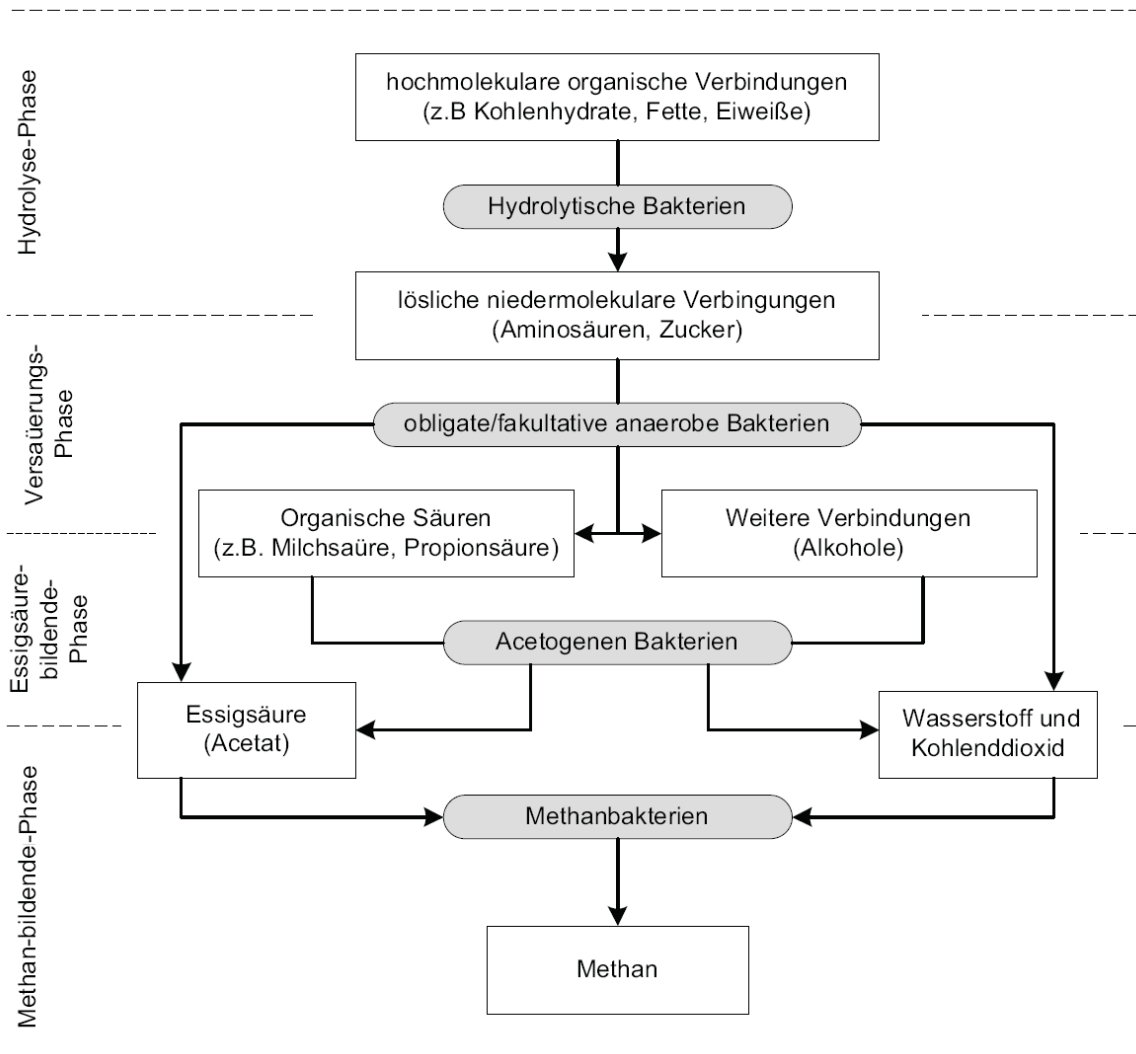


Abbildung 2.7 Phasen des anaeroben Abbaus (Wieczorek, 2010)

Hydrolyse

In der ersten Phase des anaeroben Abbauprozesses werden polymere Moleküle wie Proteine, Kohlenhydrate, Fette usw. in monomere Verbindungen (Aminosäuren, Zucker, Fettsäuren) zerlegt. Dies geschieht mit Hilfe von extrazellulären Enzymen (Proteasen, Cellulasen, Lipasen usw.), die von den hydrolytischen Mikroorganismen gebildet werden. Die Hydrolyse kann bei der Vergärung von Mischgrün als geschwindigkeitsbestimmender Schritt angesehen werden, da sich Cellulose und Hemmicellulose nur sehr schwer und Lignin gar nicht abbauen lassen (Kaltschmitt, 2009). Die

Geschwindigkeit und Intensität der Hydrolyse bestimmt im Wesentlichen den erreichbaren Wirkungsgrad der nachfolgenden Abbaustufen (Dornack, 2001).

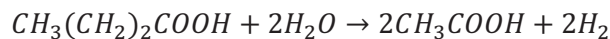
Acitogenese

Während der Versäuerung erfolgt eine enzymatische Umwandlung, der bei der Hydrolyse entstandenen monomeren Verbindungen, zu Carboxylsäuren, Wasserstoff, Alkoholen und kurzkettigen Säuren wie Buttersäure, Essigsäure und Propionsäure. Die genaue Zusammensetzung hängt von der Zusammensetzung des Substrats und von den Prozessbedingungen im Reaktor, insbesondere dem Wasserstoffpartialdruck und dem pH-Wert ab (Bischofsberger, 2005).

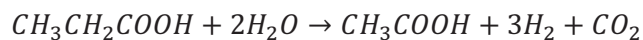
Acetogenese

In der Acetogenese setzen wasserstoff- und essigsäurebildende Bakterien die langkettigen Carbonsäuren, Alkohole und Aldehyde in Essigsäure, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid um. (Dornack, 2001) Beispielhaft ist die Bildung von Essigsäure und Wasserstoff in den nachfolgenden Gleichungen dargestellt (Rechtenbach, 2009).

Formel 2.16 Chemische Reaktionsgleichung der Acetogenese



Formel 2.17 Chemische Reaktionsgleichung der Acetogenese

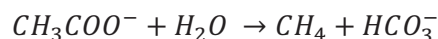


Methanogenese

In der methanogenen Phase werden Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid zu Methan und Kohlendioxid umgewandelt. Es ist den Methanbakterien nicht möglich, aus den Produkten der vorangegangenen Stufen (mit Ausnahme von CO_2 und H_2) direkt Methan zu bilden. Die beiden Prozesse laufen folgendermaßen ab:

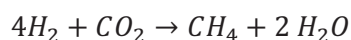
Acetatabbau:

Formel 2.18 Chemische Reaktionsgleichung der Methanogenese 1



Oxidation von Wasserstoff zu Methan:

Formel 2.19 Chemische Reaktionsgleichung der Methanogenese 2



Das Methan entsteht zu 70% aus Acetat und Wasser und zu etwa 30% aus Wasserstoff und Kohlendioxid. Entstehen bei den ersten drei Schritten Unregelmäßigkeiten, die eine Störung der Methanbakterien erzeugen (z.B. Veränderung des pH-Werts), so kann die Menge des produzierten Biogases deutlich abnehmen (Dornack, 2001).

2.5.1 Einflussfaktoren

Um einen optimalen Prozess zu gewährleisten müssen eine Vielzahl von Parametern beachtet werden. In der nachfolgenden Tabelle 2.4 sind die wichtigsten inklusive ihrer Spannweite dargestellt.

Tabelle 2.4 Einflussgrößen und Milieuanforderungen bei Vergärung von biogenen Reststoffen (Weiland, 2001)

Einflussgröße	Optimale Milieubedingungen
Temperatur	mesophil: 32-42 °C thermophil: 50-58°C
pH-Wert	6,7-7,5
C:N-Verhältnis	20-30
Nährstoffbedarf C:N:S:P	600:15:5:3
Spurenelemente	Ni, Co, Mo, Se

Des Weiteren ist der Einfluss von Stoffen zu beachten, die auf die Mikroorganismen hemmend bzw. in höheren Konzentrationen toxisch wirken. In Tabelle 2.5 ist eine Übersicht der geläufigsten Hemmstoffe gegeben.

Tabelle 2.5 Typische Hemmstoffe bei anaeroben Abbauprozessen (Weiland 2001)

Hemmstoff	Hemmkonzentration	Anmerkung
Sauerstoff	> 0,1 mg/l O ₂	Hemmung der obligat anaeroben Methanbakterien.
Schwefelwasserstoff	> 50 mg/l H ₂ S	Hemmwirkung steigt mit sinkendem pH-Wert.
Flüchtige Säuren	> 2000 mg/l HAC (pH = 7)	Hemmwirkung steigt mit sinkendem pH-Wert. Hohe Adaptionsfähigkeit der Bakterien.
Ammoniumstickstoff	> 3500 mg/l NH (pH = 7)	Hemmwirkung steigt mit steigendem pH-Wert und steigender Temperatur. Hohe Adaptionsfähigkeit der Bakterien.
Schwermetalle	Cu > 50 mg/l Zn > 150 mg/l Cr > 100 mg/l	Nur gelöste Metalle wirken inhibierend. Entgiftung durch Sulfidfällung.

2.5.2 Substrateigenschaften

Für die Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen und zum Aufbau neuer Zellsubstanz benötigen die Mikroorganismen geeignete Substrate, aus denen sie die zur Lebenserhaltung erforderliche Energie synthetisieren. Die Zusammensetzung dieser Substrate hat einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der Biozönose im Faulprozess. Die Hydrolysierbarkeit der Kohlenhydratfraktion wird entscheidend von der Zusammensetzung der Faserfraktion der Pflanze beeinflusst. Mit steigendem Ligninanteil in der Pflanze sinkt die Verdaulichkeit. Die Abbaubarkeit verschiedener Stoffgruppen ist in Abbildung 2.8 (Ottow, Bidlingmaier 1997) schematisiert. Demnach sind Pflanzen mit hohem Zucker oder Stärke Anteil wie z.B. Mais oder Raps sehr gut hydrolysierbar, wohingegen Pflanzen mit

einem hohem Cellulose oder Lignin Anteil, wie z.B. Bäume oder Hecken, nur sehr schlecht bis gar nicht hydrolysierbar sind.

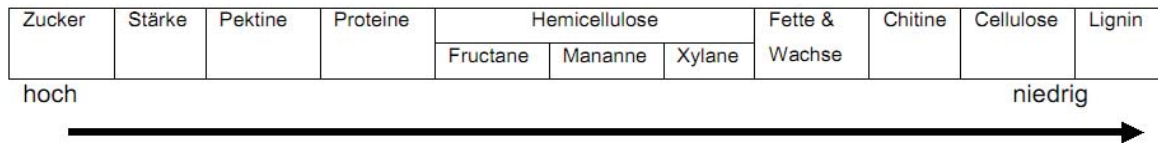


Abbildung 2.8 Abbaubarkeit verschiedener Stoffgruppen (Ottow 1997)

2.5.3 Biogaspotentialbestimmung

Das Biogaspotential von organischen Verbindungen wird durch ihre Zusammensetzung, letztendlich durch das Verhältnis C:H:O bestimmt. (Dornack, 2001) Das maximal Biogas bzw. Methanpotential kann entweder theoretisch oder praktisch ermittelt werden. Im Folgenden werden sowohl die theoretischen Berechnungen als auch die praktische Versuchsdurchführung erläutert.

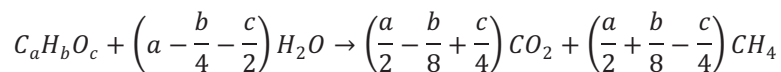
2.5.3.1 Theoretische Biogaspotentialbestimmung

Für die theoretische Bestimmung existieren zwei gängige Modelle, die sogenannte Buswell-Formel und die Weender-Futtermittelanalyse.

Berechnung nach Buswell

Bei bekannter Elementarzusammensetzung und gänzlich abbaubarer organischer Trockensubstanz ist die Berechnung des maximalen Biogasertrags und der gebildeten Anteile über Formel 2.20 möglich (Buswell, 1952). Unter der Berücksichtigung der chemischen Grundstruktur der Biomasse Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel kann die Gaszusammensetzung (CH₄, CO₂, H₂S und NH₃) des verwendeten Substrats bestimmt werden. Der Index *a* gibt die Anzahl der Kohlenstoff-, *b* die der Wasserstoff-, *c* die der Sauerstoff-, *d* die der Stickstoff und *e* die der Schwefelatome an (Linke, 2006).

Formel 2.20 Buswellgleichung



Berechnung nach Weender

Bei der Berechnung nach Weender wird der Biogas- bzw. Methanertrag eines Substrats durch den Gehalt an Proteinen, Fetten und Kohlenhydraten sowie der Verdaulichkeit dieser Stoffgruppen bestimmt. Da zwischen den mikrobiologischen Verhältnissen im Pansen von Rindern und im Reaktor einer Biogasanlage Analogien bestehen, kann die Berechnung des theoretischen Biogas- und Methanertrages auf Basis der Weender-Analyse erfolgen (LFU, 2007). Näheres findet sich bei

(Weiland, 2003) oder (Amon, 2003). Die notwendigen Kennzahlen können den DLG-Futterwerttabellen entnommen werden. Dieses Vorgehen ist für die Praxis zielführender als der Ansatz über die Buswell-Gleichung, da diese von einer vollständigen Abbaubarkeit der organischen Substanz ausgeht (LFU, 2007).

2.5.3.2 Praktische Biogaspotentialbestimmung

Praktisch kann der maximale Biogasertrag z.B. mit Biogaspotentialtest ermittelt werden. Der apparative Aufbau, der zur Durchführung dieser genutzt wird, entspricht der DIN 384141-8 „Gasvolumenmessung mittels Eudiometerrohr“ und ist in Kapitel 3.2 näher beschrieben.

Die praktische Bestimmung der Biogaspotenziale wird in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4630 durchgeführt. Diese vermittelt Regeln zur Beurteilung von organischen Stoffen und der notwendigen Ausrüstung der entsprechenden Versuchsanordnungen. Außerdem gibt die Richtlinie Hinweise zur Charakterisierung der Substrate und macht Vorgaben, wie bestimmte die Substrate kennzeichnenden Größen jeweils zu messen sind, um Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Richtlinie ist auf alle organischen Stoffe anwendbar, deren Vergärung geprüft werden soll. Derartige Gärtests erlauben Aussagen

- zur grundsätzlichen Bewertung des möglichen Biogasertrags und der anaeroben biologischen Abbaubarkeit eines Stoffes oder Stoffgemisches,
- zur qualitativen Beurteilung der Geschwindigkeit des anaeroben Abbaus des untersuchten Stoffes und
- zur qualitativen Bewertung der Hemmwirkung des untersuchten Stoffes im untersuchten Konzentrationsbereich.

Keine Aussage erlauben Gärtests

- zur Prozessstabilität in Reaktoren, die mit den untersuchten Stoffen oder Stoffgemischen kontinuierlich beschickt werden,
- zur Biogausbeute unter Praxisbedingungen, auf Grund möglicher negativer oder positiver Synergieeffekte,
- zur Monovergärbarkeit des Substrates unter Prozessbedingungen und
- über die Grenzen der organischen Raumbelastung.

Das Ergebnis eines Gärtests ist hauptsächlich abhängig von der mikrobiologischen Aktivität des verwendeten Impfschlammes und der ordnungsgemäßen Erfassung und Auswertung der entstanden Biogasmenge.

Um reproduzierbare Ergebnisse in Gärtests zu erhalten ist es notwendig, sowohl die Erstellung eines Gäransatzes, als auch die Gaserfassung und deren Auswertungen möglichst genau zu definieren. Eine genaue Beschreibung der verwendeten Geräteapparatur ist in Kapitel 3.1 beschrieben.

Als Impfschlamm soll bevorzugt unbehandelter Faulschlamm aus kommunalen Kläranlagen verwendet werden. Diese kommen mit einer Vielzahl von Substanzen in Kontakt und bilden so ein Inoculum, das eine vielseitige Biozönose enthält und deshalb einem labortechnischen Inoculum vorzuziehen ist. Der Impfschlamm soll einen organischen Trockensubstanzgehalt von über 50% aufweisen. Dieser ist vor dem Einsatz eine Woche bei Testtemperatur zu lagern, um durch die Hungerphase seine Eigengasproduktion ausreichend abzusenken. Bei der Festlegung der Substrat- und Impfschlammmenge, die in einem Gäransatz eingewogen werden sollen, sind folgende Rahmenbedingungen einzuhalten.

- Um eine Hemmung zu vermeiden soll das Substrat im Verhältnis zum Impfschlamm keinen großen Anteil haben. Dies wird mit Formel 2.21 bestimmt

Formel 2.21 Verhältnis von Impfschlamm zu Substrat

$$\frac{oTS_{Substrat}}{oTS_{Impfschlamm}} \leq 0,5$$

- Die Gaserträge des Substrates sollen mehr als 80% der Gesamtmenge einer Probe ausmachen
- Der TS-Gehalt im Ansatz darf nicht mehr als 10% betragen, um einen ausreichenden Stoffübergang sicherzustellen.

Die maximal entstehende Gasmenge kann bei bekannter Zusammensetzung von den in Tabelle 2.6 dargestellten Werten hergeleitet werden.

Tabelle 2.6 Theoretische Gasausbeute und theoretische Gaszusammensetzung bei der Vergärung

Substrat Typ	Theoretische Biogasausbeute In L_N/kg_{oTS}	Theoretische Zusammensetzung	CH_4/CO_2
Kohlenhydrate	750	50% CH_4	50% CO_2
Fette	1390	72% CH_4	28% CO_2
Proteine	800	62% CH_4	40% CO_2

Um die mikrobiologische Aktivität des eingesetzten Impfschlammes sicherzustellen ist der Einsatz einer sogenannten Referenz- oder Blindprobe nötig. Zu diesem Zweck soll in einem separaten Ansatz ein Substrat mitvergoren werden, dessen Biogaspotenzial bekannt ist. Die Anforderungen an dieses Material sind zum einen, ein nicht zu schnelles Vergären und zum anderen eine vollständige Abbaubarkeit. Hier bietet sich nach VDI Richtlinie 4630 beispielsweise mikrokristalline Cellulose an. Diese liefert bei einem 100%igen Umsatz und unter Berücksichtigung der Biomasseneubildung eine Gasmenge von 740-750 L_N/kg_{oTS} . Dieser Wert sollte im Kontrollansatz zu 80% erreicht werden um die Leistungsfähigkeit der biologisch aktiven Masse zu belegen.

Für die erforderliche Datenerhebung und quantitative Auswertung von Gärtests erfolgt im ersten Schritt die Berechnung des Normvolumens, des in den einzelnen Zeitabschnitten entwickelten

Faulgases. Dabei wird der Wasserdampfgehalt des Biogases herausgerechnet und das trockene Gasvolumen ermittelt. Dazu dient folgende Gleichung:

Formel 2.22 Volumen des trockenen Gases

$$V_0^{tr} = V \frac{(p - p_w) \cdot T_0}{p_0 \cdot T}$$

- V_0^{tr} Volumen des Trockenen Gases im Normzustand mL_N
- V Abgelesenes Volumen des Gases in mL
- p Druck der Gasphase zum Zeitpunkt der Ablesung in hPa
- p_w Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur des umgebenden Raumes in hPa
- T_0 Normtemperatur $T_0=273,15\text{K}$
- p_0 Normdruck $p_0=1013\text{hPa}$
- T Temperatur des Faulgases oder des umgebenden Raumes in K

Wird der Methangehalt im feuchten anstatt im trockenen Gas gemessen, kann der Methangehalt des trockenen Gases wie folgt berechnet werden:

Formel 2.23 Mengenanteil trockenes Gas

$$C_{CH_4^{tr}} = C_{CH_4^f} \cdot \frac{p}{p - p_w}$$

Dabei ist

- $C_{CH_4^{tr}}$ Methankonzentration im trockenen Gas, in Vol.%
- $C_{CH_4^f}$ Methankonzentration im feuchten Gas, in Vol.%
- p Druck der Gasphase zum Zeitpunkt der Ablesung in hPa
- p_w Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur des umgebenden Raumes in hPa

Das bei jedem Versuch angefallene Biogasvolumen wird schrittweise in der Reihenfolge des Ablesungen summiert. Änderungen des Totvolumens, die sich in Folge veränderter Temperatur-Druckverhältnisse zwischen den Ablesungen ergeben, sind unerheblich und können vernachlässigt werden. Für die Ansätze der Mischung des Substrates oder des Referenzsubstrates wird der Anteil der Gasproduktion des Impfschlammes im Versuch nach folgender Gleichung errechnet:

Formel 2.24 Anteil der Gasproduktion des Impfschlammes

$$V_{Is(korr.)} = \frac{\sum V_{Is} \cdot m_{Is}}{m_M}$$

Dabei ist

- $V_{Is(korr.)}$ Gasvolumen, das aus dem Impfschlamm entwickelt wurde in mL_N
- $\sum V_{Is}$ Summe der Gasvolumina des Versuchs mit Impfschlamm für die betrachtete Versuchsdauer in mL_N
- m_{Is} Masse des für die Mischung benutzten Impfschlammes in g
- m_M Masse des im Kontrollversuch benutzten Impfschlammes in g

Das Netto-Gas-Normvolumen des Substrates oder des Referenzsubstrates im Versuch ergibt sich für die gleichen Versuchszeiten als Differenz von Normvolumen des trockenen Gases aus dem Impfschlamm. Die spezifische Faulgasproduktion V_s von Substrat oder Referenzsubstrat, in Abhängigkeit von der Versuchsdauer, berechnet sich von Ablesung zu Ablesung nach der Gleichung:

Formel 2.25 Spezifische Faulgasproduktion

$$V_s = \frac{\sum V_n \cdot 10^4}{m \cdot w_T w_v}$$

- V_s Spezifische, auf die Glühverlustmasse bezogene Faulgasproduktion während des Versuchszeit in L_N/kg_{GV}
- $\sum V_n$ Netto-Gasvolumen des Substrates oder des Referenzsubstrates für die betrachtete Versuchsdauer in mL_N
- m Masse des eingewogenen Substrates oder Referenzsubstrates in g
- w_T Trockenrückstand des Probe oder des Vergleichschlammes in %
- w_v Glühverlust (GV) der Trockenmasse der Probe oder des Vergleichschlammes in %

Das Netto-Methanvolumen des Substrates ergibt sich für die gleiche Versuchszeit als Differenz von Methannormvolumen im Versuch, minus des Methannormvolumens aus dem Impfschlamm. Das Methannormvolumen wird durch Multiplikation des Normvolumens des trockenen Gases mit dem Methangehalt des trockenen Gases errechnet. Die spezifische Methanproduktion wird analog zur spezifischen Biogasproduktion bestimmt. Die Werte der spezifischen Biogasproduktion und der spezifischen Methanproduktion von Substrat oder Referenzsubstrat werden als Summenkurve aufgetragen, bezogen auf die Glühverlustmasse zu Versuchsbeginn.

Störungen der Vergärung sind zum Teil schwer von andern Eigenschaften zu unterscheiden. Störungen treten auf, wenn die Biologie nicht in der Lage ist, die zu verarbeitende Substratmenge sofort umzusetzen. Die Hemmung ist manchmal zeitlich begrenzt oder führt nur zu einem verlangsamteten Abbau. Abbildung 2.9 zeigt typische Verläufe von Biogassummenkurven. Die hier abgebildete Netto-Biogasproduktion ist die Differenz der Biogasproduktion des Substrats und der Biogasproduktion aus dem Impfschlamm. Handelt es sich um ein leicht umsetzbares Substrat, dann ist der Abbau durch einen steilen Anstieg im Kurvenverlauf gekennzeichnet. Der verzögerte Abbau hingegen deutet auf eine schwer abbaubare Substanz hin. Bei einer Diauxie handelt es sich um eine zweistufige Umsetzung des Substrats und ist durch einen stufenartigen Verlauf charakterisiert. Von einem starken oder vollständig gehemmten Umsatz ist auszugehen, wenn der Kurvenverlauf unterhalb des Ansatzes der Nullprobe liegt. Neben den dargestellten Kurvenverläufen, existiert eine Vielzahl von Mischformen.

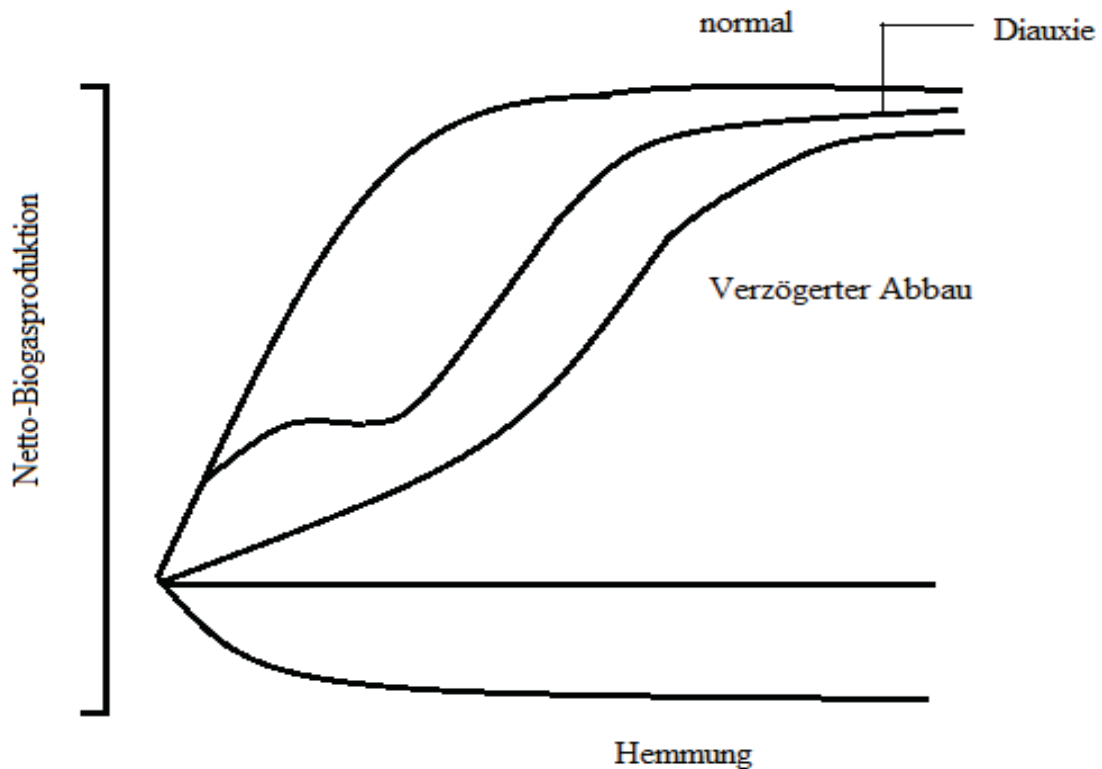


Abbildung 2.9 Typische Verläufe von Gasbildungskurven (VDI 4630)

3. Material und Methoden

Die Analyse der jahreszeitlichen Schwankungen der Mischgrünzusammensetzung erfolgt zum einen, über eine visuelle Einschätzung des vorhandenen Materials und zum andern, über Handsortierung einer repräsentativen Probe. Hierfür wurde in der Zeit von März bis September das Abfallwirtschaftszentrum der Firma Buhck in Trittau einmal monatlich aufgesucht und der Mischgrünhaufen fotografiert, sowie eine repräsentative Probe entnommen. Anschließend erfolgten eine Handsortierung und eine Zerkleinerung. Schließlich wurden Biogaspotentialtests nach VDI-Richtlinie 4630 durchgeführt und Sieb-, sowie Sichtversuche getestet. In diesem Kapitel werden die angewendeten Methoden und die verwendeten Materialien beschrieben.

3.1 Repräsentative Probennahme und Probenvorbereitung

Für die Probenahme wurde der Mischgrünhaufen umlaufen und im Abstand von einem Meter eine Schaufel oder Mistgabel des Materials der Probe hinzugefügt. Größere Äste, die so nicht erfasst werden konnten wurden anschließend hinzugefügt. Die so gewonnene Probe wurde dann im Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft weiter analysiert. Als erstes wurde das Probenmaterial fotografiert und gewogen. Anschließend wurde die Probe geteilt und so je eine Fraktion für die Handsortierung und für eine Mischprobe bereitgestellt. Der Teil für die Handsortierung betrug ca. 20% der Ausgangsprobe, der Rest wurde für die Mischprobe verwendet. Als nächster Verfahrensschritt erfolgte die Zerkleinerung der Mischprobe.

Hierfür stand die in Abbildung 3.1 dargestellte Zerkleinerungsmaschine VIKING-Häcksler AD 4064S. Diese verfügen über ein Zweikammer-System: Die obere Häckselkammer mit Schlagmessern und Auswerfer für weiche Pflanzenreste, die untere Schnitzelkammer zum Zerspanen von Astmaterial bis 50mm. Der Häcksler besitzt eine Leistung von 4,7kW und erreicht 2800U/min.



Abbildung 3.1 VIKING-Häcksler AD 4064S

3.2 Biogaspotenzialtest

Anschließend wurde eine Probe für die später stattfindenden Biogaspotentialtests entnommen und eingefroren. Die Biogaspotentialtests erfolgten nach VDI-Richtlinie 4630 „Gasvolumenmessung mittels Eudiometerrohr“. Der Versuchsaufbau und ein Foto der verwendeten Apparatur ist der Abbildung 3.2 zu entnehmen. Die Versuchsanlage besteht aus einem skalierten Eudiometerrohr mit einem Volumen von 900ml bzw. von 200ml für die Referenzproben. Dieses ist zum Teil mit Sperrflüssigkeit gefüllt. Die Skalierung beträgt bei den großen Säulen 5ml und bei den kleinen Säulen 0,5 ml. Als Sperrflüssigkeit wurde eine 20%ige Kochsalzlösung mit 0,5% Zitronensäure verwendet. Dadurch wird die Aufnahme saurer Gase reduziert und somit verhindert, dass sich Biogasbestandteile in der Flüssigkeit lösen. Als Indikator für eine Änderung des pH-Wertes wurde zudem Methylorange zugefügt. Die entstandene Gasmenge kann am Eudiometerrohr abgelesen werden. Dies wird durch einen Niveauegleich der Sperrflüssigkeit zwischen dem Niveaugefäß und dem Eudiometerrohr realisiert. Durch die Gasproduktion im Reaktorgefäß entsteht ein Überdruck und es wird Sperrflüssigkeit aus dem Eudiometerrohr in das Niveaugefäß gedrückt. Die entstandene Differenz der Sperrflüssigkeit kann abgelesen und in das produzierte Gasvolumen umgerechnet werden.

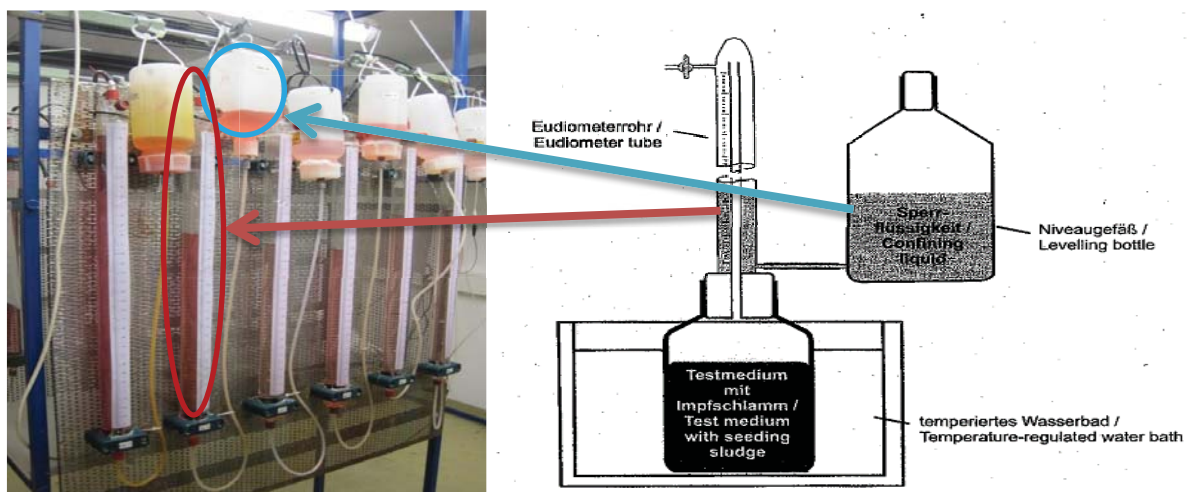


Abbildung 3.2 Versuchs- und Geräteapparatur nach DIN 38414 (VDI 4630)

3.3 Handsortierung

Die für die Handsortierung entnommene Probe wurde in eine krautige und eine holzige Fraktion getrennt. Das Material, welches nicht diesen beiden Fraktionen zuzuordnen war, wurde als Störstoffe aussortiert. Die Störstoffe bestanden zum größten Teil aus Erde, aber auch Plastik, Metall und Textilien waren vereinzelt enthalten. Als krautig galt sämtliches „grünes“ Material, welches nicht vollständig verholzt war. Teilweise erwies sich die Einordnung als problematisch da auch grüne Pflanzenteile sehr stark verholzt waren und mit einem hohen Ligno-Celluloseanteil ungeeignet für die Biogaserzeugung sind.

3.4 Siebung

Für die durchgeführten Siebversuche standen 40, 20 und 10mm Kastensiebe sowie 10, 6,3, 5, 2, 1,6 mm und 630 μ m Rundsiebe zur Verfügung, die, als Siebturm genutzt werden können (vergleiche Abbildung 3.3). Die Kastensiebe wurden zu früheren Versuchszwecken angefertigt, die Rundsiebe stammen von der Firma Riesch.



Abbildung 3.3 Siebturm und Rundsiebe Fa. Riesch

Der Versuchsaufbau bestand aus mehreren nacheinander durchgeführten Siebstufen. Das zunächst mit dem bereits beschriebenen Industriebäcksler (Hammermühle) zerkleinerte Material, wurde auf einen groben 40mm Sieb aufgegeben und von Hand solange horizontal bewegt, bis keine Partikel mehr die Maschen passierten. Anschließend erfolgte die zweite Siebstufe mit einem 10mm Sieb. Danach wurden je nach Bedarf weitere Siebstufen mit 10 bis 1,6mm durchgeführt. Schließlich wurde der Feinanteil mit einem 630 μ m Siebs bestimmt. Nach der Zerkleinerung sowie von jedem Siebober- und Unterlauf wurden Rückstellproben entnommen. Um eine Massenbilanz anfertigen zu können, wurden die jeweiligen Massenströme notiert. Ein Verfahrensschema ist dem Anhang IV beigefügt.

3.5 Sichtung

Der für die Sichtversuche verwendete Zickzacksichter ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Das Sichtgut wird über den Vorratsbehälter (1) aufgegeben. Anschließend wird dieses über eine Vibrationsförderrinne (2) zum Sichtraum transportiert. Die Förderrinne lässt sich über einen Einstellknopf (3) in acht Stufen regeln. Der Volumenstrom wird von einem angeschlossenen Staubsauger (4) erzeugt und ist stufenlos regelbar. Das Sichtgut gelangt über die Förderrinne von oben in den Sichtkanal, (5) in dem die Trennung stattfindet. An der Lufteintrittsstelle befindet sich ein Volumenmesser (6) über den der Volumenstrom bestimmt wird. Das von dem Luftstrom mitgeführte Material wird im Zyklon (7) abgeschieden und gelangt in das Auffanggefäß für das Feingut (8). Das restliche Material sinkt ab und wird im Auffanggefäß für das Grobgut (9) gesammelt.



Abbildung 3.4 Zickzacksichter

Um die erforderlichen Betriebsparameter zu bestimmen, wurde für die Versuchszwecke zunächst Testmaterial verwendet. Diese Parameter wurden analytisch ermittelt, indem eine vorgegebene Menge, mit einer definierten Mischung so oft gesichtet wurde, bis die bestmögliche Trennung ermittelt werden konnte. Anschließend wurden unter denselben Bedingungen, definierte Mischungen, von holzigem und krautigem Material, unterschiedlicher Partikelgrößen eingesetzt um das Trennverhalten zu testen. Die entstanden Fraktionen wurden gewogen und visuell begutachtet.

4. Saisonaler Anfall

Der saisonale Anfall von Mischgrün ist starken jahreszeitlich abhängigen Schwankungen unterworfen. Für die optimale Verwertung sind diese Schwankungen von hoher Bedeutung. In dem nachfolgenden Kapitel wird der Saisonale Anfall zunächst theoretisch anhand einer Literaturrecherche charakterisiert und anschließend mit praktischen Versuchen der tatsächliche Anfall ermittelt. Abschließend wird das Biogaspotential der gemischten und der krautigen Probe analysiert und die Ergebnisse zusammengefasst.

4.1 Theoretischer saisonaler Anfall von Mischgrün

Die Zusammensetzung des Mischgrüns, das heißt die Anteile an krautiger und holziger Biomasse, sind über das Jahr starken Schwankungen unterworfen. Abhängig von der Jahreszeit ergeben sich unterschiedliche Wachstumsphasen und damit verbundene Pflegemaßnahmen. So werden Pflanzen zu verschiedenen Jahreszeiten gepflanzt, zurückgeschnitten, Gemüse und Früchte geerntet, Bäume gefällt und Rasen gemäht. Für die jeweiligen Arbeiten gibt es definierte Regeln (z.B. zu welcher Jahreszeit sie am besten durchgeführt werden) um bestmögliche Wachstumsbedingungen zu gewähren.

4.2 Kalendarische Betrachtung

Der kalendarischen Betrachtung entspringen die folgenden Jahreszeiten:

- Frühling: 21. März bis 20. Juni
- Sommer: 21. Juni bis 22. September
- Herbst: 23. September bis 20. Dezember
- Winter: 21. Dezember - 20. März

Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) hat meteorologische Jahreszeiten eingeführt, die exakt drei Monate dauern und mit dem 1. Tag des Monats beginnen, in dem der astronomische Beginn der Jahreszeit liegt. Da die astronomischen Phänomene für die weitere Betrachtung keine Bedeutung haben, sondern viel mehr auf die einzelnen Monate eingegangen wird, ist hier der meteorologische Kalender relevant. Zunächst folgt eine kurze Beschreibung der anstehenden Arbeiten zu den Jahreszeiten. Danach wird auf jeden Monat detailliert eingegangen.

4.2.1 Frühling

Im Frühling setzt die Hauptgartenarbeit ein. Der Garten wird von Schäden, die der Winter hinterlassen hat befreit und auf die neue Wachstumsperiode vorbereitet. Abgestorbene Pflanzen werden entfernt und Bäume von Winterschäden befreit (Totholzschnitt).

Außerdem wird ein großer Teil der Aussaat und der Neupflanzungen bereits jetzt vorgenommen. Die Arbeiten sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Tabelle 4.1 Gartenarbeiten im Frühling

Monat	Tätigkeiten
März	Kirschbäume und Rosen werden zurückgeschnitten. Der Rasen wird vertikutiert
April	Das Rasenmähen beginnt Die Staudenbeete müssen von den abgestorbenen Pflanzenteilen des letzten Jahres gesäubert werden
Mai	Pflegemaßnahmen beginnen (z.B. Hacken und Jäten) Regelmäßiges mähen des Rasen

Im März und April finden noch hauptsächlich Aufräumarbeiten und Vorbereitungsmaßnahmen für die anstehende Wachstumsphase statt. Deshalb ist hier nur mit einem geringen Aufkommen an krautigen Materialien zu rechnen. Da abgestorbene Pflanzen oft mit Wurzeln und Erdreich entfernt werden ist zu dieser Zeit ein erhöhter Störstoffanteil zu erwarten. Im Mai setzt das Pflanzenwachstum ein und das schneiden von Bäumen wird eingestellt. Deshalb ist eine deutliche Zunahme des krautigen Anteils zu erwarten.

4.2.2 Sommer

Während des Sommers müssen die Gärten regelmäßig von Unkraut befreit und der Rasen gemäht werden. Die meisten Obst- und Gemüsesorten müssen geerntet und Hecken können zurückgeschnitten werden. Verblühte Blüten von Blumen müssen entfernt werden. Eine Übersicht der Arbeiten ist in Tabelle 4.2 gegeben.

Tabelle 4.2 Gartenarbeiten im Sommer

Monat	Tätigkeiten
Juni	Hecken können zurückgeschnitten werden hacken und jäten muss regelmäßig durchgeführt werden. Geiztriebe der Brombeere sind zurückzuschneiden Fallobst wird aufgelesen und entsorgt. Verwelkte Blüten sind abzuschneiden insbesondere Rosenblüten. Rhabarberblütenschäfte sind auszuschneiden Regelmäßiges mähen des Rasen
Juli	Die relevanten Pflegearbeiten sind die gleichen wie im Vormonat In diesem und dem nächsten Monat können bei allen Obstarten Äste und Triebe erfolgreich entfernt werden. Der Sommerschnitt ist bei jungen Bäumen angebracht. Bei Kirscharten, Pfirsichen und Aprikosen ist ein Vollschnitt möglich. Beerenobst wird geerntet. Abgefallene unreife Früchte werden aufgesammelt und entsorgt Regelmäßiges mähen des Rasen
August	Im August stehen viele Erntearbeiten an. Die relevanten Pflegearbeiten sind die gleichen wie im Vormonat Walnuss sollte nur im August oder Dezember geschnitten werden. Abgeerntete Himbeerruten werden 10cm über dem Boden abgeschnitten. Johannis- und Stachelbeeren werden nach der Ernte gelichtet. Hecken werden geschnitten Regelmäßiges mähen des Rasen

In den Sommermonaten ist ein konstant hoher krautiger Anteil zu erwarten der auf Grund des Pflanzenwachstums sein Maximum im Juli erreicht.

4.2.3 Herbst

Im Herbst steht die Ernte vieler Obstsorten an. Nachdem die Früchte geerntet sind, können die Bäume zurückgeschnitten werden. Außerdem ist jetzt eine gute Zeit um Hecken und Stauden zurückzuschneiden. Weiterhin fällt in dieser Jahreszeit viel Laub an, welches eingesammelt und entsorgt wird. Eine Übersicht der Pflegemaßnahmen ist in Tabelle 4.3 gegeben.

Tabelle 4.3 Gartenarbeiten im Herbst

Monat	Tätigkeiten
September	Hecken, Rosen, Stauden alle Obstbäume werden zurückgeschnitten Regelmäßiges mähen des Rasen
Oktober	Erziehungsschnitte an Obstbäumen sollten jetzt vollzogen werden Hecken können auch jetzt noch zurückgeschnitten werden. Laub wird aus dem Garten und von Wegen entfernt und entsorgt
November	Die restlichen erziehungsschnitte an Obstbäumen werden vollzogen Stauden werden geschnitten. Laub wird eingesammelt und entsorgt.

Im Herbst ist mit einer Abnahme an krautigen Pflanzen zu rechnen. Allerdings fällt dieser auf Grund des Laubfalls kaum gravierend aus. Der Störstoffanteil wird wegen der bei der Laubsammlung eingetragenen Fremdstoffe zunehmen.

4.2.4 Winter

Der Winter ist die Zeit, in der der Garten ruht. Es werden hauptsächlich Schnitte an Bäumen und Beeresträuchern vorgenommen sowie Laubreste eingesammelt. Wegen des Weihnachtsfests werden Ende Dezember und Anfang Januar viele Tannen entsorgt. Eine Übersicht der Pflegemaßnahmen ist in Tabelle 4.4 gegeben.

Tabelle 4.4 Gartenarbeiten im Winter

Monat	Tätigkeiten
Dezember	Der Winterschnitt kann begonnen werden, wenn es nicht friert Zu dichte Baumkronen werden ausgelichtet.
Januar	Bei frostfreiem Wetter werden die noch nicht durchgeführten Winterschnitte vollzogen. Zu dicht gewachsene Ziergehölze werden ausgelichtet.
Februar	Die restlichen Schnitte an Bäumen und Beeresträuchern können durchgeführt werden.

In den Wintermonaten ist mit sehr wenig krautigem Material zu rechnen. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um immergrüne Pflanzen wie Nadelhölzer und Abfälle aus Gewächshäusern.

4.2.5 Ergebnisse des theoretischen saisonalen Anfalls

In Anhang I ist eine ausführliche Jahresarbeitstabelle über alle Pflegemaßnahmen dargestellt. Aus den gewonnen Erkenntnissen ergibt sich die in Tabelle 4.5 dargestellte Bewertung, welche den zu erwartenden Jahreszeitlichen Verlauf widerspiegelt. Dabei steht „+“ für einen erhöhten erwarteten krautigen Anteil im Mischgrün und „-“ für einen niedrigen.

Tabelle 4.5 Erwarteter monatlicher krautiger Anfall

Monat	Erwarteter krautiger Anfall
Januar	--
Februar	-
März	-
April	+
Mai	+
Juni	++
Juli	+++
August	++
September	+
Oktober	+
November	-
Dezember	--

Hieraus lässt sich der erwartete qualitative Verlauf, welcher in Abbildung 4.1 dargestellt ist ableiten.

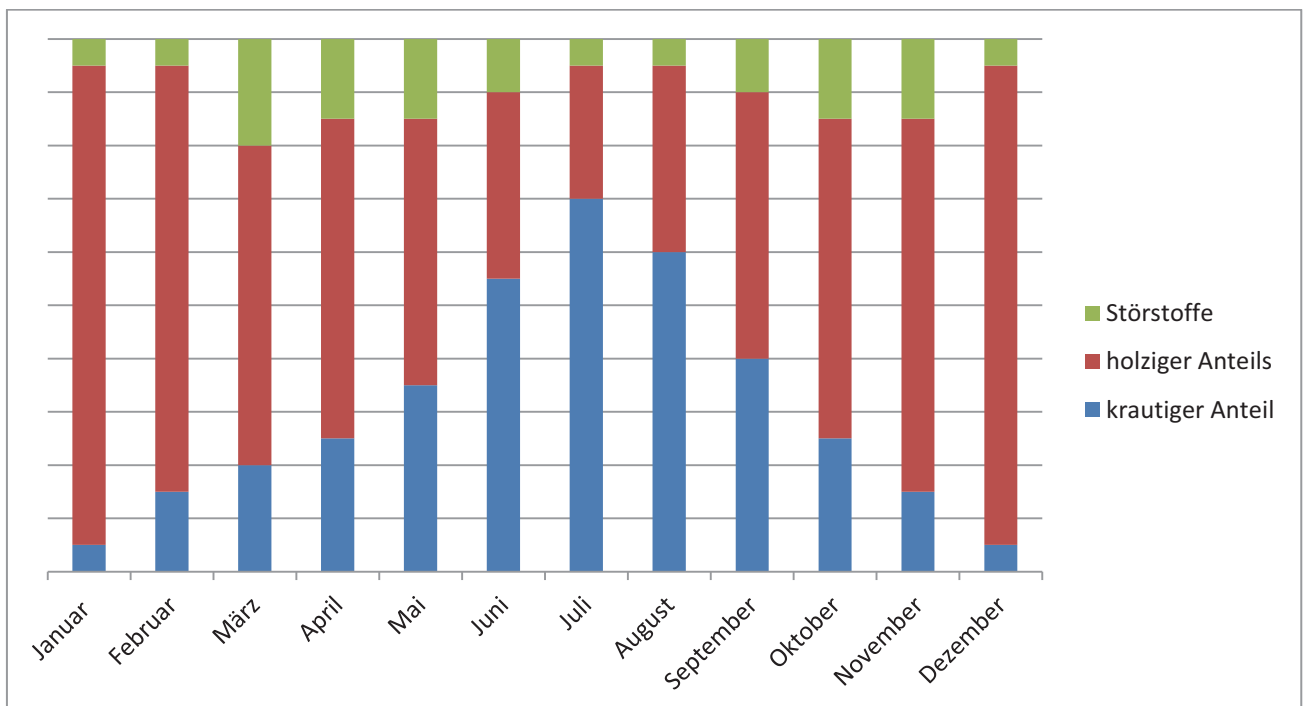


Abbildung 4.1 Qualitativer Verlauf des theoretischen saisonalen Anfalles

In Blau ist der erwartete Anteil an krautigem Material abgebildet. Der Holzige Anteil ist in Rot und der Störstoffanteil in Grün dargestellt. Diese Farbverteilung findet sich in allen Balkendiagrammen die zur Charakterisierung des saisonalen Anfalls dienen wieder.

4.3 Praktischer saisonaler Anfall

Es wurde in der Zeit von März bis September 2011 jeden Monat eine repräsentative Probe des Grünabfallhaufens genommen. Während der Probenahme wurde eine visuelle Einschätzung über die zu erwartende Zusammensetzung erstellt. Danach erfolgte eine Handsortierung des Probenmaterials in eine krautige und eine holzige Fraktion, um eine detaillierte Einschätzung bezüglich der Zusammensetzung zu geben. Die Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln nach Monaten dargestellt.

4.3.1 März

Der Grünabfallhaufen im März enthielt einen großen Anteil an Baum- und Heckenschnitt, der vorwiegend aus Nadelhölzern bestand. Eine weitere Partie bestand aus altem Laub und Blumenresten. In Abbildung 4.2 sind die Fotos des Grünabfallhaufens und der repräsentativen Probe abgebildet.



Abbildung 4.2 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe März

Das Material wurde zerkleinert und eine Probe von 1,0 kg per Hand in eine krautige und eine holzige Fraktion sortiert. Die Sortierung des zerkleinerten Materials erwies sich als schwierig und unbefriedigend genau, da bei dem zerkleinerten Material die krautigen und holzigen Anteile optisch nur schwer zu unterscheiden waren. Außerdem waren die Nadeln der Nadelhölzer auch nach der Zerkleinerung noch fest mit den Zweigen verbunden und konnten schwer einer der beiden Fraktionen zugeordnet werden. Der holzige Anteil belief sich auf 89%, krautiges Material war zu 9% und Störstoffe waren zu 2% enthalten. Die Verteilung ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

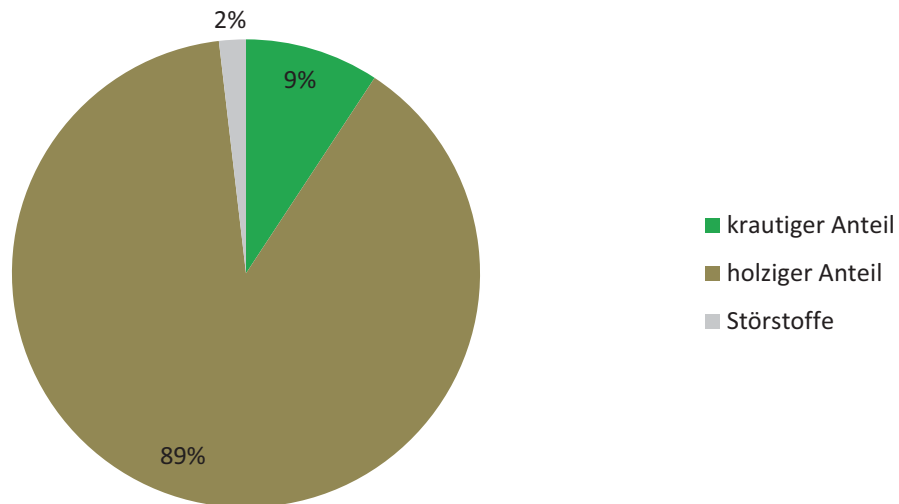


Abbildung 4.3 Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im März

4.3.2 April

Augenscheinlich enthielt der Grünabfallhaufen deutlich mehr krautiges Material, insbesondere hat die Menge an Moos und Rasenschnitt zugenommen. Außerdem war entschieden weniger Nadelholz zu erkennen. Insgesamt schien dennoch ein Großteil des Mischgrünhaufens von Baum- und Heckenschnitten zu stammen und entsprechend wurde ein Übergewicht der holzigen Fraktion erwartet. Auf Grund der klimatischen Bedingungen (Sonnig und Tageswerte von über 20°C) der letzten Woche und des Osterwochenendes (24.-26. April) war das gesammelte Material sehr trocken. In Abbildung 4.4 sind die Fotos des Grünabfallhaufens und der repräsentativen Probe abgebildet.



Abbildung 4.4 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe April

Die Handsortierung ergab wie in Abbildung 4.5 abgebildet, einen holzigen Anteil von 91% und einen krautigen Anteil von 9%. Störstoffe waren mit unter 1% vertreten. Als Hauptgrund hierfür sind die Witterungsbedingungen anzuführen, durch das trockene Wetter der vergangenen Tage ist das krautige Material stark ausgetrocknet und hat somit deutlich an Gewicht verloren. Deshalb ist im Allgemeinen ein etwas höherer krautiger Anteil zu erwarten als durch diese Probe festgestellt wurde.

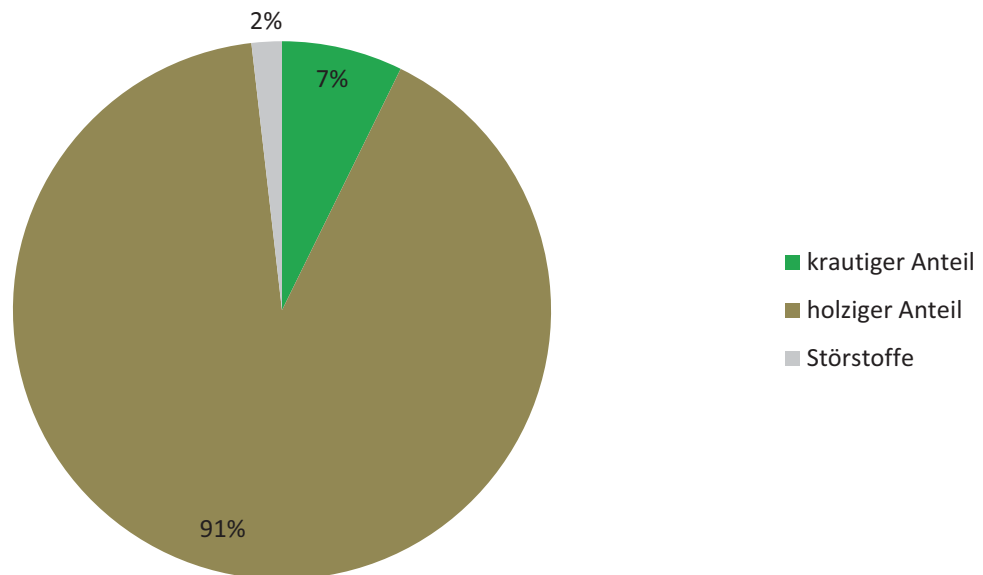


Abbildung 4.5 Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im April

4.3.3 Mai

Bei der Maiprobe war weniger Moos vorhanden, dafür nahm der Anteil an Rasenschnitt zu. Außerdem war zu erkennen, dass Baum- und Heckenschnitte immer „grüner“ werden, also einen höheren krautigen Anteil besitzen. Am stärksten schien jedoch immer noch die holzige Fraktion vertreten zu sein, auch wenn sich das Verhältnis annähert. In Abbildung 4.6 ist ein Foto des Grünabfallhaufens und der repräsentativen Probe abgebildet.



Abbildung 4.6 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe Mai

Die Handsortierung ergab, dass die holzige Fraktion mit 61% immer noch am stärksten vertreten war. Dennoch bedeutet dies eine deutliche Zunahme des krautigen Anteils auf immerhin 28%. Der Störstoffanteil belief sich auf 11%. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.7 graphisch dargestellt.

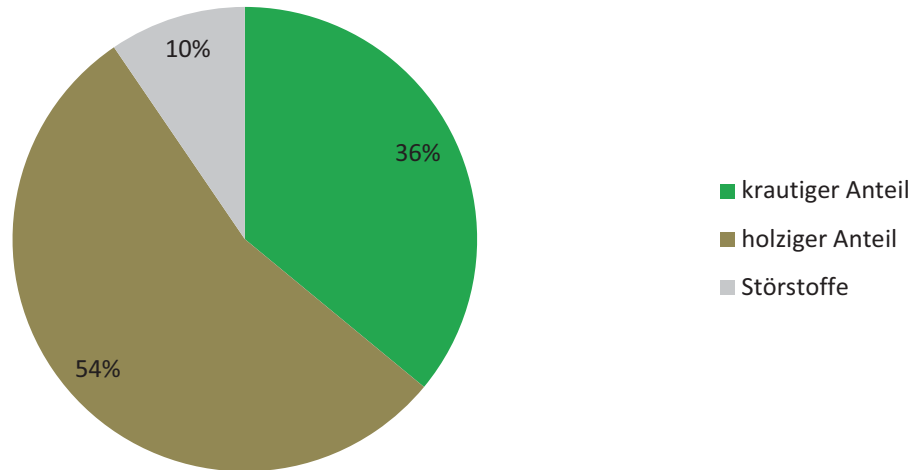


Abbildung 4.7: Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im Mai

4.3.4 Juni

Der Grünabfallhaufen enthielt augenscheinlich einen hohen krautigen Anteil, der hauptsächlich aus grünem Laub und Rasenschnitt bestand. Auffällig war der hohe Strohanteil. Daneben war ein geringer Anteil an Nadelholz und Baumschnitten zu identifizieren. In Abbildung 4.8 sind die Fotos des Grünabfallhaufens und der repräsentativen Probe abgebildet.



Abbildung 4.8 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe Juni

Die Handsortierung zeigt, wie in Abbildung 4.9 zu erkennen, dass die holzige Fraktion mit 55% immer noch den größten Anteil stellt. Die krautige Fraktion hat sich mit 37% im Vergleich zum Vormonat kaum verändert. Der hohe Störstoffanteil von 8% lässt sich hauptsächlich auf Rasenstücke, die mit Wurzel und Erde entfernt wurden, zurückführen.

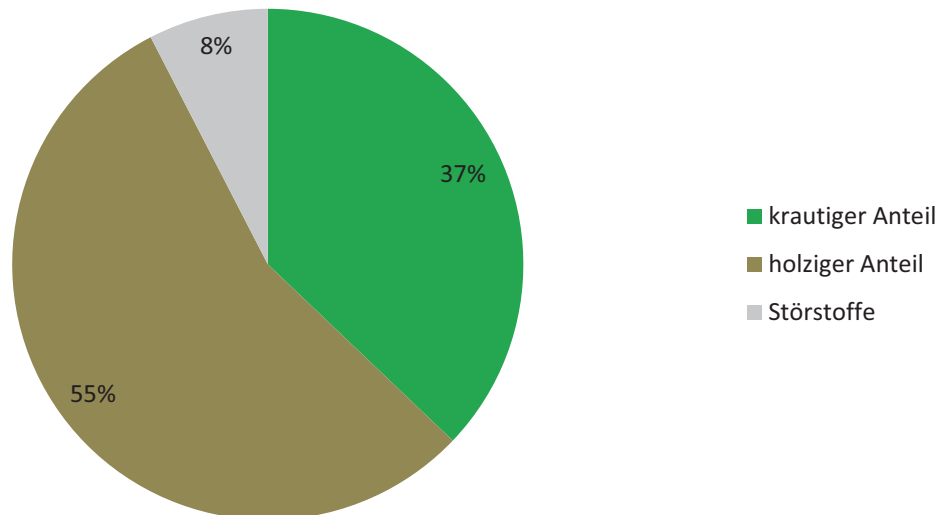


Abbildung 4.9 Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im Juni

4.3.5 Juli

Die Probe für den Monat Juli enthielt bereits einen sehr hohen Grünanteil. Es waren zunehmend grünes Laub sowie vereinzelte Baumschnitte festzustellen. Außerdem war Rasenschnitt und ein kleiner Nadelholzanteil enthalten. Die Probe enthielt sehr viel Frischmasse. Das rauchen des Grünabfallhaufens lies auf eine aerobe Vergärung im Inneren des Haufens schließen. In Abbildung 4.10 sind die Fotos des Grünabfallhaufens und der repräsentativen Probe abgebildet.



Abbildung 4.10 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe Juli

Die anschließende Handsortierung bestätigte den Eindruck des hohen krautigen Anteils. Mit 66% ist dieser auch der höchste festgestellte Anteil aller Monate. Des Weiteren waren 29% des Mischgrüns holzig und 5% waren Störstoffe. Die Verteilung ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

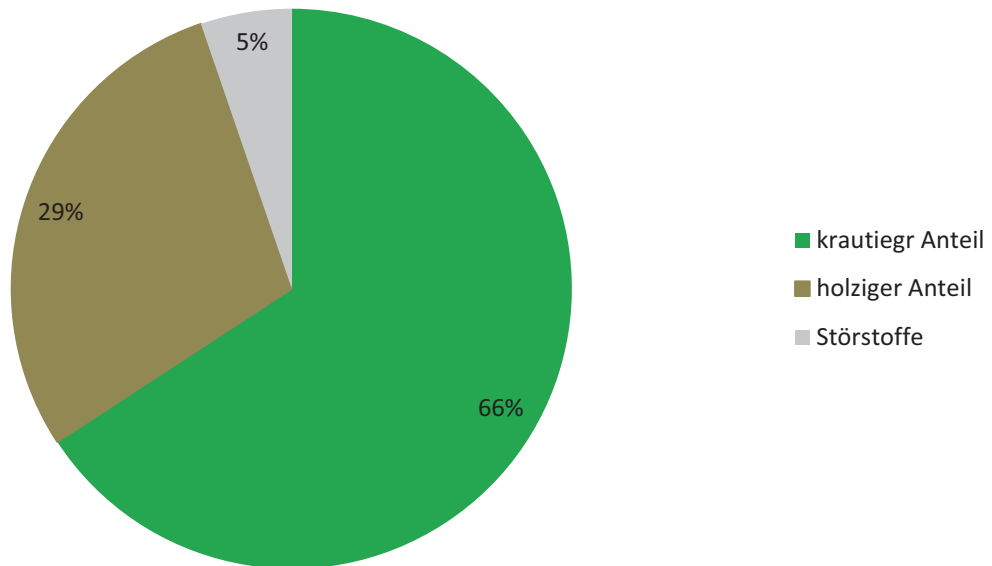


Abbildung 4.11 Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im Juli

4.3.6 August

Die Mischgrünzusammensetzung im August beinhaltete viele Komponenten mit einem hohen krautigen Anteil. Ein Foto des Grünabfallhaufens und der repräsentativen Probe ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Die vorhandenen Hecken und Baumschnitte waren voll von grünen Blättern. Des Weiteren waren Gras und Rasenschnitte sowie Schilf enthalten.



Abbildung 4.12 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe August

Die in Abbildung 4.13 dargestellte Handsortierung ergab einen krautigen Anteil von 44%. Holziges Material war zu 39% enthalten. Der Störstoffanteil lag in dieser Probe bei 17% und damit deutlich über dem Durchschnitt. Der hohe Störstoffanteil weist darauf hin, dass Rasen und Blumen zunehmend mit Erdreich entfernt wurde.

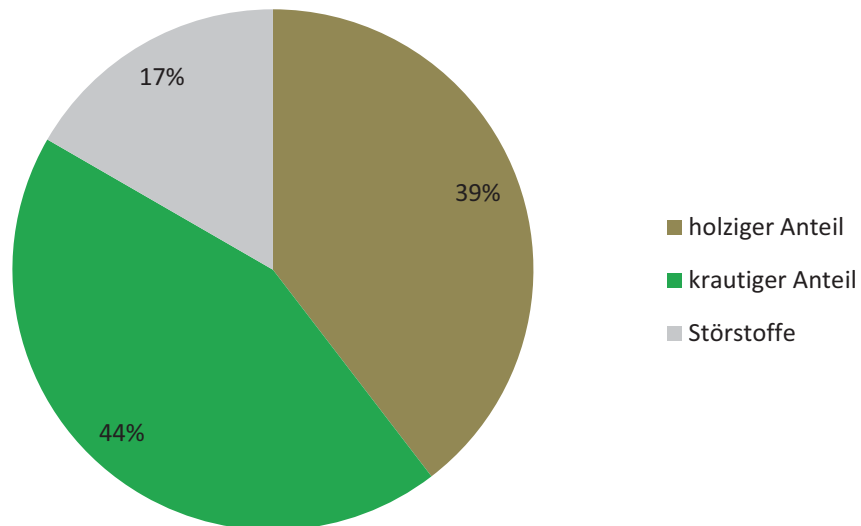


Abbildung 4.13 Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im August

4.3.7 September

Das Mischgrün im September enthielt noch immer reichlich Grünanteil zu enthalten. Ein Grund hierfür könnte der Spätherbst mit hohen Temperaturen und viel Sonnenschein gewesen sein. Der Mischgrünhaufen und die repräsentative Probe sind in Abbildung 4.14 abgebildet. Der Anteil an Rasenschnitt hat deutlich abgenommen. Dafür konnte ein hoher Anteil Obstbaumschnitten, teilweise noch mit Früchten behangen, festgestellt werden. Außerdem waren Strauch und Heckenschnitte enthalten und ein geringer Anteil an Nadelhölzern.



Abbildung 4.14 Grünabfallhaufen und repräsentative Probe September

Die in Abbildung 4.15 dargestellte Handsortierung ergab 45% krautiges, 43% holziges Material und einen Störstoffanteil von 12%. Damit hat sich die Probe bis auf den gesunkenen Störstoffanteil, im Vergleich zu der Vormonatsprobe kaum verändert.

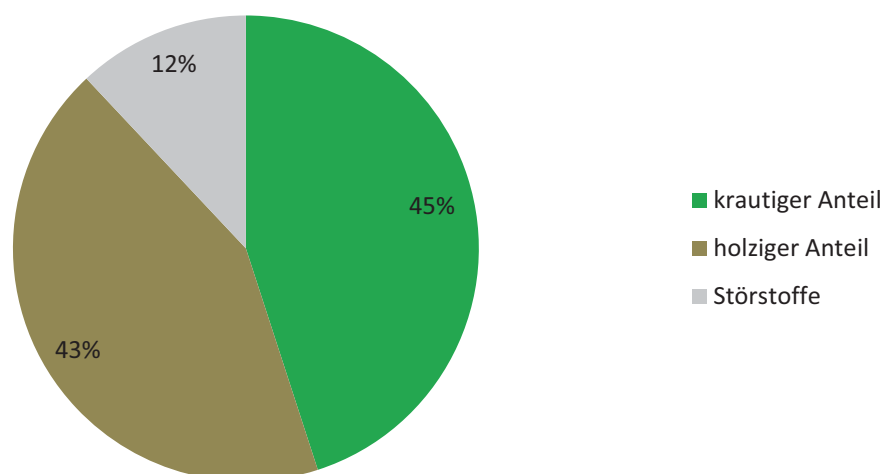


Abbildung 4.15 Ergebnisse der Handsortierung der repräsentativen Grünabfallprobe im September

4.3.8 Biogaspotenziale von Mischgrün

Zusätzlich zu der Handsortierung wurden die repräsentativen Mischproben auf ihr Biogaspotential untersucht. Die Bestimmung des Biogasertrags fand nach VDI Richtlinie 4630 statt, welche in Kapitel „2.5.3.2 Praktische Biogaspotentialbestimmung“ erläutert wurde. Die hohen Standardabweichungen sind auf die Heterogenität des Materials zurückzuführen. Alle Tests fanden gemäß VDI-Richtlinie 4630 in Dreifachansätzen statt. Besonders bei der Mischprobe war eine große Vielfalt an unterschiedlich gut abbaubaren Materialien enthalten. Zusätzlich entstand durch das Zerkleinern unregelmäßige Partikelgröße. Eine optimale, reproduzierbare Durchmischung konnte, bei einer Einwaage von 5g, deshalb nicht erreicht werden. Für die Mischprobe lag die durchschnittliche Standardabweichung bei 13,6%, für die krautige Fraktion bei 8,9%. Hohe Standardabweichungen sind bei biologischen Testverfahren mit heterogenen Substraten wie Mischgrün nicht zu vermeiden. Weitere Diskussionen zu Fehlerquellen befinden sich in Kapitel 6.2.

Die ermittelten Daten für die krautige Fraktion sind in Abbildung 4.16 dargestellt. Dabei ist das Biogaspotential der Mischprobe für die Monate März bis April aufgetragen. Der höchste maximale Biogasertrag wurde mit $259\text{L}_\text{N}/\text{kg}_{\text{TS}}$ überraschend für die Maiprobe gemessen. Auf die Gründe des erhöhten Biogasertrags der Maiprobe wird am Ende des Kapitels und in der Diskussion (Kapitel 6.2) näher eingegangen. Der Verlauf der restlichen untersuchten Monate deckt sich mit dem aus der Theorie zu erwartenden Verlauf und den Ergebnissen der Handsortierung.

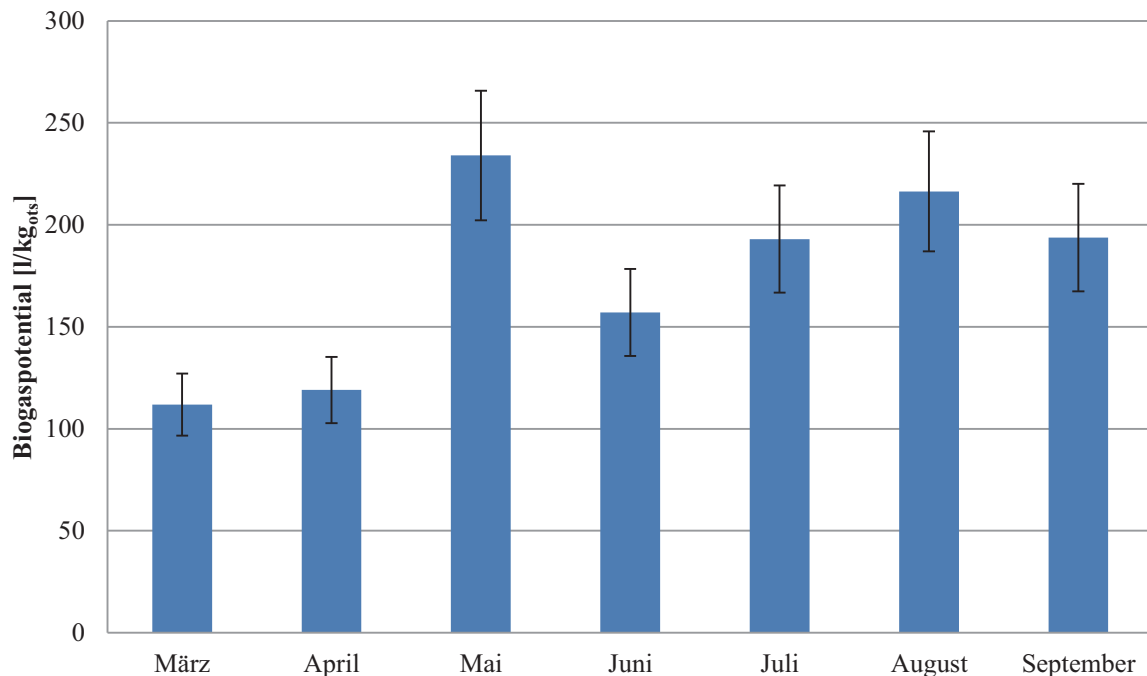


Abbildung 4.16 Biogaspotential der Mischprobe von März bis September 2011

Zu Beginn des Frühjahres und damit auch des Pflanzenwachstums ist der Biogaspotential mit maximal $120\text{L}_\text{N}/\text{kg}_{\text{TS}}$ gering. Mit Voranschreiten des Wachstums und dem steigenden krautigem Anteil nimmt auch das Biogaspotential zu. Im Herbst folgt wie erwartet ein Rückgang und im Winter, der im

Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden konnte, ist der kleinste Biogasertrag zu erwarten. Die Verweilzeiten variieren kaum und sind im Anhang II abgebildet.

Außerdem wurden die krautigen Anteile der betrachteten Mischgrünproben auf ihr Biogaspotenzial untersucht. Der Verlauf ist in Abbildung 4.17 dargestellt. Die größere Homogenität der krautigen Probe führte zu deutlich geringeren Schwankungen, des Biogaspotentials der einzelnen Monate. Da die Schwankungen der Zusammensetzung hier nicht von Bedeutung sind, rühren die Unterschiede lediglich von der elementaren Zusammensetzung des krautigen Materials her. Es zeigt sich zwar, dass die elementare Zusammensetzung durchaus einen Einfluss auf die Vergärbarkeit des Mischgrüns hat, diese aber im Vergleich zu den jahreszeitlichen Schwankungen der Zusammensetzung gering ist.

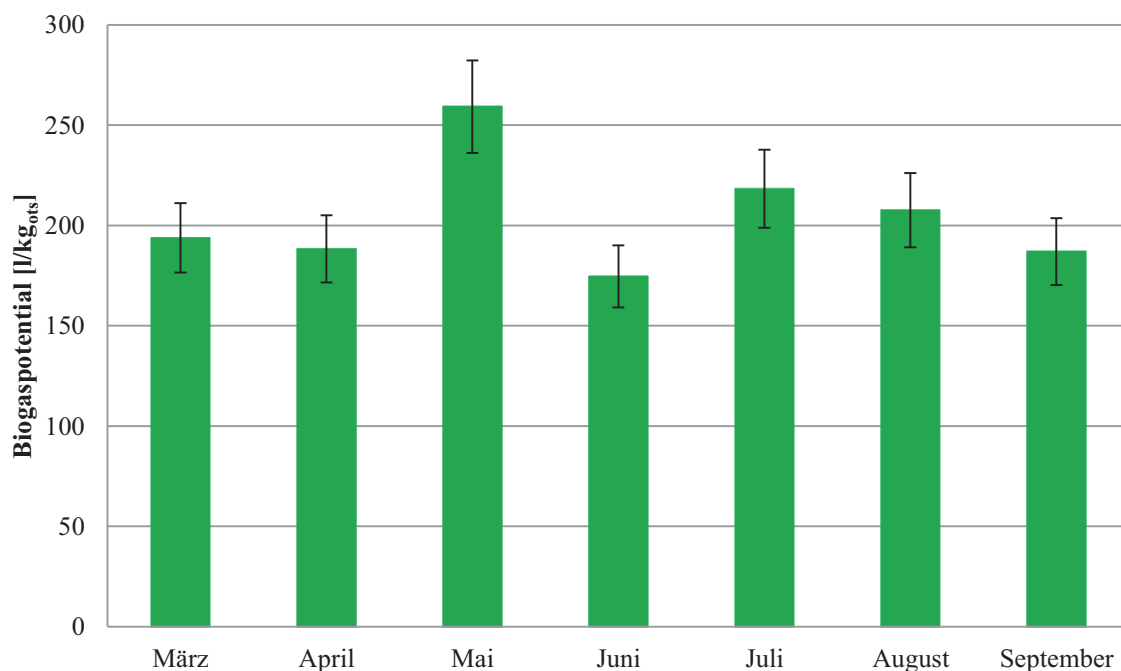


Abbildung 4.17 Biogaspotential der krautigen Probe von März bis September 2011

Das geringste Biogaspotential wurde mit 175L_N/kg_{0TS} im Juni gemessen. Das höchste lag im Mai bei 260L_N/kg_{0TS}. Im späten Frühling wenn das Pflanzenwachstum beginnt steigt auch das Biogaspotential der krautigen Fraktion. In den Sommermonaten bleibt dieses dann in etwa konstant bei etwa 200L_N/kg_{0TS} und sinkt im Herbst wieder etwas ab. In den kommenden Monaten ist auf Grund der schlechten Verwertbarkeit des Laubs eine weitere Verringerung des Biogaspotentials der krautigen Fraktion zu erwarten. Das etwas niedrigere Biogaspotential des Junis liegt im Bereich der Standardabweichung.

4.3.9 Zusammenfassung der Ergebnisse des praktischen saisonalen Anfalls

Wie in Abbildung 4.18 dargestellt, enthält das Mischgrün zu Beginn des Frühlings von März bis April hauptsächlich holziges Material. In den darauf folgenden Monaten nimmt der krautige Anteil stetig zu und erreicht im Juli sein Maximum. In diesem Monat macht der krautige Anteil mehr als 60% aus und stellt damit einen größeren Anteil als die holzige Fraktion dar. In den Monaten August und September nimmt der krautige Anteil wieder ab. Der holzige Anteil hingegen nimmt in dieser Zeit wieder leicht zu, was letztendlich dazu führt, dass in etwa gleich viel krautiges und holziges Material im Mischgrün enthalten ist.

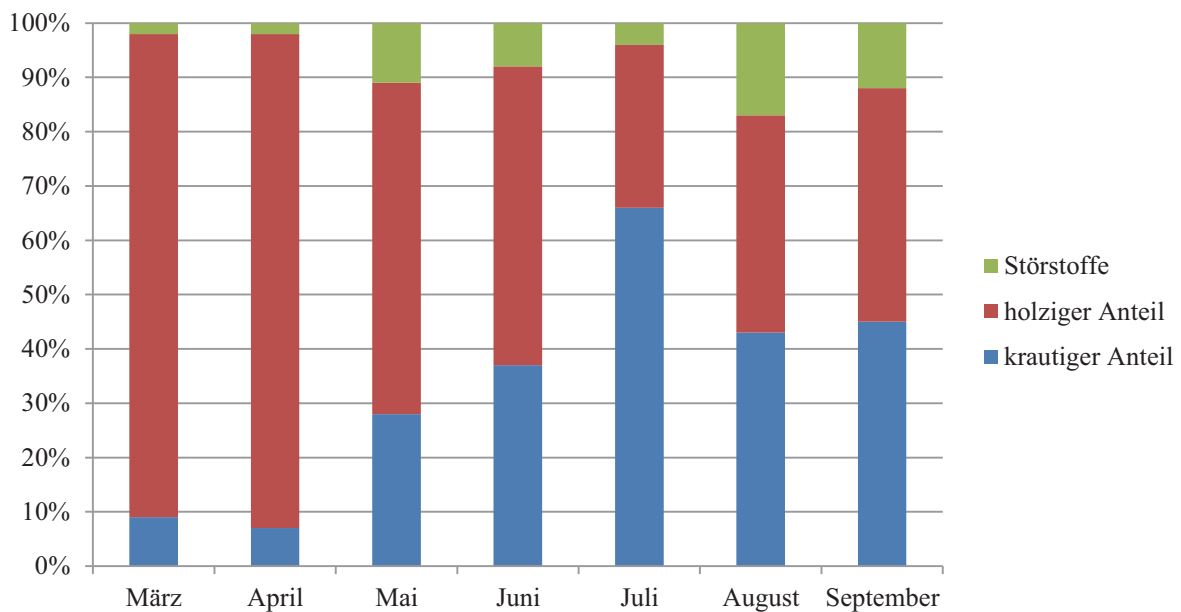


Abbildung 4.18 Ergebnisse der Handsortierung der Mischgrünproben von März bis September 2011

Die praktisch ermittelten Ergebnisse über die jahreszeitlichen Schwankungen des krautigen Anteils spiegeln den aus der Literaturrecherche (Kapitel 4.1 Theoretischer saisonaler Anfall von Mischgrün) erwarteten Anfall wieder. Im Herbst steigt der Störstoffanteil wie erwartet an, da durch das aufgesammelte Laub mehr anorganische Stoffe in das Mischgrün gelangen.

Die krautige Probe erzeugt wie erwartet konstant höhere Biogaspotentiale als die Mischprobe (vergleiche Abbildung 4.19). In den Frühjahrsmonaten liegen die Potenziale der krautigen- und der Mischprobe noch weit auseinander, gleichen sie sich in den Sommermonaten immer mehr an. Da in den Proben der Monate März und April hauptsächlich schwer abbaubares holziges Material befindet, ist hier auch nur ein sehr geringer Biogasertrag zu erwarten. Das Verhältnis von leicht und schwer abbaubaren Substanzen gleicht sich bis Juli immer weiter an. Damit verbunden nähren sich auch die Biogaspotentiale der holzigen und der krautigen Fraktion. Insgesamt fällt die Differenz deutlich kleiner aus als erwartet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nicht alle Pflanzenteile der krautigen Fraktion tatsächlich deutlich besser als verholzte Pflanzenteile von den Mikroorganismen umgesetzt werden können. Außerdem ist bei verholzten Pflanzenteilen in der Wachstumsphase der Ligno-Cellulosekomplex noch nicht so ausgeprägt und bindet deshalb weniger abbaubare Stoffe, als im

späteren Verlauf. So können diese Pflanzenteile besser als erwartet von den Mikroorganismen verstoffwechselt werden und es entsteht mehr Biogas.

Biogaspotential 2011

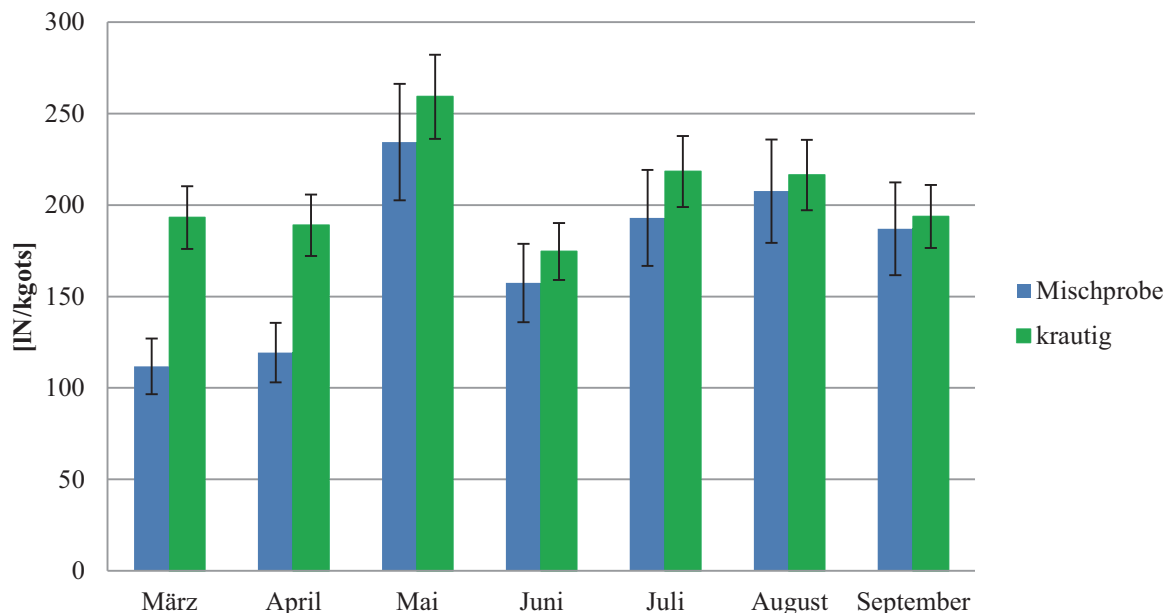


Abbildung 4.19 Vergleich der Biogaspotentiale von krautiger- und gemischter Probe

In der obenstehenden Tabelle sind die Biogaspotentiale der krautigen Fraktion (in grün) denen der gemischten Fraktion (in Blau) gegenübergestellt und über die einzelnen Monate aufgetragen.

Die ermittelten maximalen und minimalen sowie durchschnittlichen Biogaspotentiale sind in Tabelle 4.6 dargestellt. Die Biogaserträge der gemischten Fraktion lagen zwischen 111 und 234 L_N/kg_{oTS}. Durchschnittlich wurde in der Zeit von März bis September ein Biogaspotential von 212 L_N/kg_{oTS} für die krautige Fraktion erreicht. Für die Gemischte Fraktion wurde der Biogasertrag zwischen 188 und 259 L_N/kg_{oTS} ermittelt. Im Durchschnitt betrug das Biogaspotential für die gemischte Fraktion 196 L_N/kg_{oTS}.

Tabelle 4.6 Ergebnisse der Biogaspotentialtests

Fraktion	Min Biogaspotential [L _N /kg _{oTS}]	Max Biogaspotential [L _N /kg _{oTS}]	Durchschnittliches Biogaspotential März-Sept [L _N /kg _{oTS}]
Krautig	175	259	206
Gemischt	111	234	172

5. Trennverfahren

Das aus vielen Komponenten bestehende Mischgrün kann durch mechanische Trennverfahren in einzelne Fraktionen aufgeteilt werden. Diese können über unterschiedliche Wege verwertet und so effektiver genutzt werden. Bevor das Material in die gewünschten Fraktionen getrennt wird, sollten fest miteinander verbundene Pflanzenteile wie Blätter und Zweige voneinander gelöst werden. Hierzu wird zunächst eine Zerkleinerung durchgeführt. Dadurch entsteht eine heterogene Korngrößenverteilung, bei der zu erwarten ist, dass die holzigen Teile in größerer Kornform erhalten bleiben als die krautigen. Diese Korngrößenverteilung soll genutzt werden um mittels Klassierung die gewünschten Fraktionen zu erhalten. Als weitere Möglichkeit der Trennung können die Dichteunterschiede ausgenutzt werden. Hierbei sollte zunächst durch Siebklassierung eine homogene Partikelgröße geschaffen werden. Anschließend kann das Mischgrün mit einem durch Luft erzeugten Auftrieb nach Dichte sortiert werden.

5.1 Theoretische Auswahl der Trennverfahren

In diesem Kapitel werden die in „2.4 Theorie der Trennverfahren“ vorgestellten Trennverfahren bewertet und so die geeignetsten für die anschließend erläuterten praktischen Trennversuche ausgewählt.

Sowohl die krautige, als auch die holzige Fraktion besitzen eine geringere Dichte als Wasser, wodurch Trennverfahren, die mit Wasser arbeiten, nicht in Frage kommen. Zentrifugieren ist sehr Energieaufwendig und auf Grund der Bauweise besser für Fest-Flüssig-Trennungen geeignet. Setzmaschinen sind zwar für den Prozess nutzbar, konnten aber auf Grund der hohen Anschaffungskosten und ihrer Seltenheit nicht für praktische Versuche genutzt werden. Als geeignet und realisierbare Trennverfahren stellen sich Sieben, Sichten und Klauben (Handsortierung) dar. Das Klauben stellt zwar ein geeignetes Trennverfahren dar, ist jedoch auf Grund des hohen Arbeitsaufwandes und der damit verbundenen hohen Kosten für eine wirtschaftliche Anwendung unrealistisch. In dieser Arbeit dient es zur Charakterisierung der Schwankungen in der Zusammensetzung und nicht als getestetes Trennverfahren. Die Trennverfahren werden im weiteren Verlauf näher erörtert und die Vorteile, in Bezug auf die Trennung von Mischgrün, herausgearbeitet.

Tabelle 5.1 Bewertung der möglichen Trennverfahren

Trennverfahren	Sortieren	Klassieren	Eignung
Sieben		x	++
Klauben	x		+
Sichten	x	x	++
Setzen	x		+

Als geeignetste Verfahren werden das Sieben und das Sichten ausgewählt. Bei der Siebklassierung können problemlos mehrere Siebstufen hintereinander geschaltet werden und so gleichzeitig mehrere Fraktionen erzeugt und Störstoffe als Feinfraktion abgeschieden werden. Da krautiges und holziges Material unterschiedliche Dichten aufweisen ist auch eine Trennung mittels Dichtesortierung möglich. Hierbei sollte jedoch bei der Zerkleinerung versucht werden eine möglichst homogene Partikelgrößenverteilung zu erreichen. Mit dem Prinzip des Windsichtens ist theoretisch sowohl eine Klassierung als auch eine Dichtesortierung möglich, womit das Verfahren gut geeignet erscheint. Möglich ist auch eine Kombination aus beiden Verfahren bei der zunächst eine homogene Partikelgrößenverteilung erzeugt und anschließend nach Dichte sortiert wird.

5.2 Praktische Siebversuche

Das Probenmaterial der Monate März und November wurde, wie im Material und Methoden Teil beschrieben, zerkleinert und den einzelnen Siebstufen zugeführt. Als problematisch stellte sich die unregelmäßige Form der einzelnen Partikel heraus. Die Länge einzelner Äste und Zweige liegt zwar deutlich über der Maschenweite der jeweiligen Siebstufe, jedoch ist der Durchmesser deutlich kleiner als diese. Daher passierten größere Partikel teilweise die Maschen und führen zu einem hohen Fehlkornanteil. Außerdem verstopfte das Aufgabegut, durch die inhomogenen Kornformen, schnell das Sieb, so dass viel Energie aufgebracht werden muss um die einzelnen Partikel mit den Maschen zu vergleichen. Exemplarisch sind Verteilungssumme und Verteilungsdichte des Monats März in Abbildung 5.1 dargestellt. Mit Hilfe der beiden Geraden kann die Trennung charakterisiert werden, jedoch keine Aussage über den Anteil an holzigem und krautigem Material getroffen werden. Wenn allerdings eine Entmischung festgestellt wird, kann anhand des Verlaufs der Kurven bestimmt werden wie sich die Partikelgrößenverteilung verhält, also wie viel Material einer bestimmten Größe enthalten ist. Als charakteristische Werte für die Siebklassierung wurden außerdem der Medianwert x_{50} der Verteilungssumme zu $1500\mu\text{m}$ und Modalwert der Verteilungsdichte zu $1000\mu\text{m}$ bestimmt.

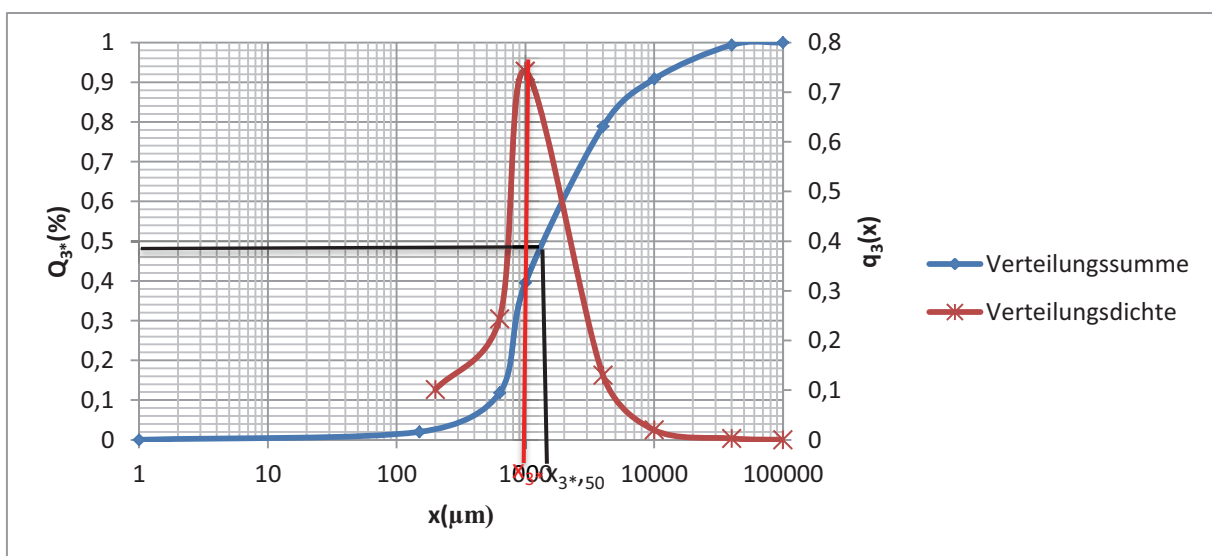


Abbildung 5.1 Verteilungsdichte- und Verteilungssumme des Siebversuchs im März

Die Verteilungssumme gibt den Anteil der Gesamtmenge, der unterhalb einer bestimmten Partikelgröße liegt, an. Der Medianwert stellt hierbei die Teilchengröße dar, unterhalb derer 50% der Teilchenmenge liegen. Die Verteilungssumme zeigt, dass 80% der Teilchen zwischen 1 und 10mm liegen. Anhand des Verteilungsdichteverlaufs können die Anteile der Gesamtmenge in einem bestimmten Intervall bezogen auf die Intervallbreite, der zwischen zwei Siebstufen zurückbleibt abgelesen werden.

Es konnte visuell kaum eine Entmischung festgestellt werden, weshalb im weiteren Verlauf auf aufwendige Biogaspotentialtests verzichtet wurde. Beispielhaft ist die Probe des 10mm Siebes in Abbildung 5.2 dargestellt. Der Anteil an holzigem und krautigem Material in den einzelnen Fraktionen unterschied sich kaum. Auch in den Feineren Siebbereich war kein erhöhter krautiger Anteil festzustellen. Allerdings konnte mit der Feinfraktion des 630 μ m Siebes eine reine Störstofffraktion erzeugt werden.



Abbildung 5.2 Siebober- und Siebunterlauf des 10mm Siebes

In Anhang III sind die Ergebnisse der Siebversuche dargestellt. Eine weitere Auswertung der Siebrückstände bezieht sich lediglich auf die Korngrößenverteilung nach der Zerkleinerung und erlaubt somit keine nähere Aussage über den Anteil an krautigem und holzigem Material in den einzelnen Fraktionen.

5.2 Praktische Versuche am Windsichten

Um ein optimales Ergebnis zu erzielen, wurden zunächst die Einstellungen des Sichters getestet. Hierbei wurde eine Mischung mit 50% krautigem (Feinanteil) und 50% holzigem (Grobanteil) Material verwendet. Der Luftstrom wurde solange variiert bis sich eine annehmbare Trennung des Testmaterials einstellte. Als problematisch stellten sich die Schwankungen der stufenlosen Regelung dar. Der Luftstrom wies Sprünge von $\pm 1 \text{ m}^3/\text{h}$ auf. Anzumerken ist, dass bei den einzelnen Durchläufen ein Massenverlust von 2-10g zu verzeichnen war. Dies ist entweder auf Undichtigkeiten im Sichter oder auf einen Verbleib des Materials im Sichtraum zurückzuführen. Aus den in Tabelle 5.2 dargestellten Ergebnissen folgt, dass die optimalen Bedingungen bei $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$ liegen.

Tabelle 5.2 Ergebnisse des Testlaufs am Zick-Zack-Sichter

Testlauf	Volumenstrom $[\frac{\text{m}^3}{\text{h}}]$	Feinanteil [g]	Grobanteil [g]	Feinanteil [%]	Massenverlust [g]
1	15	97,2	44,8	0,684507042	8,0
2	10	42,0	96,4	0,303468208	2,4
3	13	77,4	54,4	0,587253414	6,4
4	12	50,9	77,8	0,395493395	2,7
5	12,5	58,2	77,8	0,427941176	3,1

Anschließend erfolgte die Sichtung der definierten Mischproben. Zur Verfügung standen Proben mit drei unterschiedlichen Partikelgrößen. Die Partikelgrößen wurden zuvor über eine Siebklassierung ermittelt und beliefen sich auf $5\text{mm} > x_1 > 2\text{mm}$, $6\text{mm} > x_2 > 5\text{mm}$ und $10\text{mm} > x_3 > 6\text{mm}$. Jede dieser Proben bestand ihrerseits aus drei Mischungsverhältnissen zu 20%, 50% und 80% bezogen auf den krautigen Anteil. Die Mischungsverhältnisse wurden dem Sichtraum zugeführt und anschließend die entstandenen Fraktionen gewogen. Der Versuch der dritten Probe x_3 musste abgebrochen werden, da das Aufgabegut zu einer Verstopfung des Sichtraums führte. In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse der ersten Probe (x_1) dargestellt. Anhand der Ergebnisse ist lediglich eine Tendenz zu einer Entmischung festzustellen. Die gewünschte deutliche Trennung wurde nicht erreicht.

Tabelle 5.3 Ergebnisse des Sichtversuchs (Fraktion $5\text{mm} < x_1 < 2\text{mm}$)

Probe (krautiger Anteil [%])	Feinanteil [%]	Grobanteil [%]	Massenverlust [g]
20	36,8	63,2	4,3
50	32,2	67,8	2,2
80	52,4	47,6	2,7

Der Feingutanteil lag im ersten Versuchsteil bei 36,8%. Der aufgegeben krautige Anteil der definierten Mischprobe lag bei 20%. Daraus ergibt sich ein Fehlkornanteil von 16%. Im zweiten Durchlauf wurde eine Mischung mit 50% krautigem Anteil verwendet. Im Feinanteil befanden sich am Ende des Sichtversuchs 32%. Daraus folgt ein Fehler von 18%. Im letzten Durchgang des ersten Versuchs wurde eine Probe mit 80% krautigem Anteil verwendet. Es befanden sich letztendlich nur 52% im Feinanteil und damit eine Abweichung von 28%.

Für den zweiten Versuch wurde eine engere Korngrößenklasse gewählt, um eine homogene Partikelgrößenverteilung zu gewährleisten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.4 dargestellt. Hierbei wurde eine bessere Trennung erzielt jedoch sind die Abweichungen von der Ausgangsmischung immer noch deutlich.

Tabelle 5.4 Ergebnisse des Sichtversuchs (Fraktion $6\text{mm} < x_2 < 5\text{mm}$)

Probe (Feinanteil[%])	Feinanteil [%]	Grobanteil [%]	Massenverlust [g]
20	27,9	72,1	1,9
50	37,1	62,9	2
80	54,3	45,7	7,9

Der Fehlkornanteil des ersten Durchgangs lag bei 7,9%. Im zweiten Durchgang mit 50% krautigem Anteil stieg der Fehler auf 13%. Im letzten Durchlauf wurde ein Fehlkornanteil von 26% verzeichnet.

In Abbildung 5.3 ist das Ergebnis des zweiten Versuchs mit der 50% Ausgangsmischung dargestellt. Es ist eine Entmischung zu erkennen. Besonders auffällig ist, dass nahezu alle nadelförmigen Blätter in der Grobfraktion landen. Die aus Zeitgründen nicht mehr durchgeführten Biogaspotentialtests zeigen in wieweit die beobachtete Entmischung das Biogaspotential beeinflusst.



Abbildung 5.3 li. Grobfraktion re. Feinfraktion des zweiten Sichtversuchs

5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Trennversuche

Anhand der Literaturrecherche wurden das Sieben und das Sichten als aussichtsreichste Trennverfahren ausgewählt. Sowohl das Sieben als auch das Sichten lieferten in den praktischen Versuchen keine hinreichend genauen Ergebnisse in Bezug auf die Trennung in eine krautige und holzige Fraktion.

Für die praktischen Siebversuche wurden charakteristische Werte ermittelt sowie Verteilungsdicht und -summe Graphisch dargestellt. Auf Grund der Siebrückstände wurde festgestellt, dass keine Fraktionen mit erhöhtem krautigem bzw. holzigem Anteil erzeugt wurden. Deshalb wurde auf aufwendige Biogaspotentialtests verzichtet.

Für die praktischen Sichtversuche wurden zunächst in einem Testlauf die Betriebsparameter ermittelt. Der optimale Volumenstrom wurde zu $12,5\text{m}^3$ bestimmt. Anhand der visuellen Begutachtung der entstandenen Fraktionen wurde eine Entmischung analysiert. Durch die Auswertung der Massenbilanz wurde jedoch festgestellt, dass diese nicht hinreichend genau war. Die Fehlkornanteile lagen zwischen 8 und 28%.

6. Diskussion

Mischgrün fällt jährlich in großen Mengen an, wird bislang aber nur sehr selten energetisch genutzt. Für die optimale Verwertung ist die Zusammensetzung von großer Bedeutung. Diese ist stark von den jahreszeitlichen Schwankungen abhängig. Außerdem stellen Trennverfahren eine Möglichkeit dar das Mischgrün in eine krautige und eine holzige Fraktion zu teilen und die Fraktionen jeweils unterschiedlichen Verwertungswegen zuzuführen. In diesem Kapitel werden die im Hinblick auf die jahreszeitlichen Schwankungen und die Trennversuche gewonnen Ergebnisse diskutiert.

6.1 Jahreszeitliche Schwankungen

Um die jahreszeitlichen Schwankungen zu analysieren, wurden sowohl theoretische Recherchen als auch visuelle Einschätzungen- und praktische Versuche durchgeführt. Die theoretischen Recherchen bezogen sich auf das Pflanzenwachstum und die anfallenden Pflegemaßnahmen.

Die visuelle Einschätzung erfolgte anhand des Mischgrünaufbaus auf dem Abfallwirtschaftszentrum der Firma Buhck in Trittau. Dieser wurde einmal monatlich begutachtet. Mit der visuellen Einschätzung wurde eine Übersicht über die dort befindlichen Materialien erstellt. Dabei erfolgte eine Abschätzung des zu erwartenden Anteils an krautigem und holzigem Material. Die Ergebnisse der visuellen Einschätzung stimmten mit den praktisch ermittelten Werten und dem aus der Literatur zu erwartenden Anfall überein.

Auf dem Abfallwirtschaftszentrum werden sowohl Gartenabfälle aus privaten Haushalten als auch von Garten- und Landschaftsbauern angeliefert. Daher kann davon ausgegangen werden, dass eine repräsentative Mischung der Grünabfälle vorliegt. Da jedoch keine detaillierten Befragungen vorgenommen wurden, ist nicht exakt bekannt woher das Material stammt. Die Mitarbeiter des Abfallwirtschaftshofs bestätigten aber die Vermutung, dass es sich bei den angelieferten Materialien ausschließlich um Abfälle aus privaten Gärten und Garten- Landschaftsunternehmen handelt. Abfälle aus landwirtschaftlichen Betrieben sowie von Pflegemaßnahmen an öffentlichen Flächen, wie z.B. Straßenbegleitgrün, Parkabfälle, oder Knickpflegeabfälle und forstwirtschaftliche Materialien, wurden dort nicht angeliefert.

Einmal im Monat (jeweils zum Ende hin) wurde dem Haufen von März bis Oktober 2011 eine repräsentative Probe von ca. 0,5m³ entnommen und diese per Hand sortiert. Der Verlauf der praktisch über die Handsortierung ermittelten Zusammensetzung der links in Abbildung 6.1 dargestellt ist deckt sich mit dem aus der Literaturrecherche erwarteten Verlauf, welcher rechts abgebildet ist.

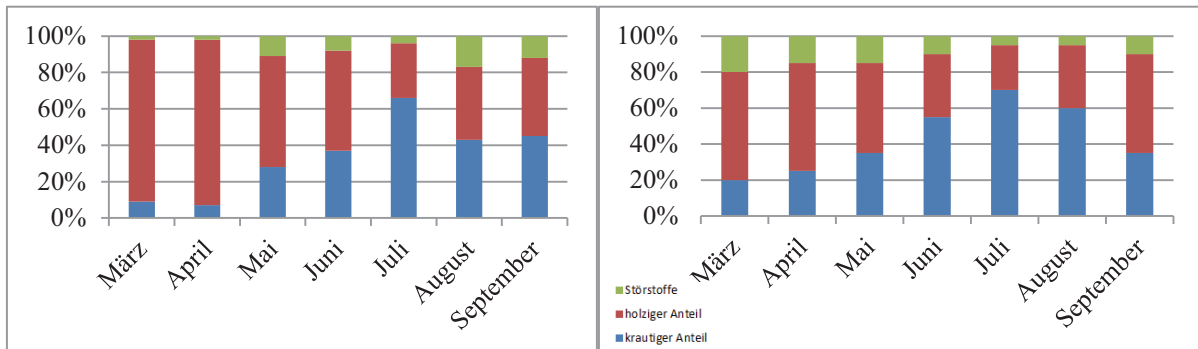


Abbildung 6.1 Vergleich des theoretischen Anfalls (li.) und des praktischen (re.)

Der Verlauf der praktisch ermittelten Werte deckt sich mit den anhand der Literaturrecherche getroffenen Erwartungen. Das Sprunghafte Verhalten der Störstoffe kann nur bedingt über die in der Literaturrecherche gefundenen Aussagen bestätigt werden. Im Frühling ist bei Beginn der Gartenarbeiten, wenn viele Pflanzen mit Wurzeln entfernt werden, ein hoher Erdanteil zu erwarten. Dies konnte mit durch die Praktischen Versuche nicht bestätigt werden. Eine Erklärung hierfür ist, dass die Gartenarbeiten in dem betrachteten Jahr auf Grund der Witterungsverhältnisse erst etwas später einsetzten und so die Störstoffe verspätet eintrafen. Im weiteren Verlauf ist die Abweichung von dem zu erwartendem Verhalten weniger gravierend

Bei der Handsortierung wurden alle Bestandteile einzeln betrachtet, wodurch eine hohe Genauigkeit zu erwarten ist. Auf Grund der gewonnen Fraktionen ist eine maximale Abweichung von 5% zu erwarten. Jedoch kann nicht immer von einer eindeutigen Zuordnung, in die Fraktion holzig und krautig, ausgegangen werde. Stark verholzte aber dennoch grüne Pflanzenteile, wie z.B. Rosen- oder Schilfstiele, sind schwer zuzuordnen. Für krautiges und holziges Material ist eine genauere Einteilung, z.B. anhand des Ligninanteils oder des Wassergehalts sinnvoll. Allerdings gestaltet eine solche Einteilung zukünftige Handsortierungen als problematisch, da diese Kriterien optisch kaum erfasst werden können.

6.2 Energetische Betrachtungen

Mischgrün als organischer Abfallstoff wird bislang hauptsächlich ohne energetischen Nutzen kompostiert also stofflich verwertet. Die thermische Verwertung ist für auf Grund des hohen Aschegehalts des krautigen Anteils nicht immer optimal geeignet. Eine Kombination aus stofflicher und energetischer Verwertung bietet die anaerobe Fermentation, bei der flexibel nutzbares Biogas entsteht und die Nährstoffe in den Rückständen enthalten belieben und weiter genutzt werden können. Um das energetische Potential durch die anaerobe Fermentation zu analysieren, eignen sich Biogaspotentialtests nach VDI-Richtlinie 4630. Die Ergebnisse dieser werden im weiteren Verlauf des Kapitels diskutiert.

Die Biogaspotentiale der gemischten Fraktion lagen zwischen 111 und 234 L_N/kg_{oTS} . Für die krautige Fraktion wurde das Biogaspotential zwischen 188 und 259 L_N/kg_{oTS} ermittelt. Das höchste Biogaspotential im Monat Mai, mit 259 L_N/kg_{oTS} , kann teilweise durch die meteorologischen Umstände des Jahres 2011 erklärt werden. Auf einen sehr warmen und trockenen April folgte ein feuchter Mai, in dem das Pflanzenwachstum einsetzte. Besonders Rasen, mit einem Biogaspotential von bis zu 600 L_N/kg_{oTS} (Westphal, 2010), entwickelt sich zu Beginn der Wachstumsphase sehr schnell und muss dann oft gemäht werden. Deshalb entwickelte die Mischprobe des Monats Mai, auch bei geringem krautigem Anteil, ein hohes Biogaspotential. Außerdem ist bei Pflanzenteilen, wie beispielsweise Heckenschnitte und jungen Äste, die zu der holzigen Fraktion zählen, der Ligno-Cellulose-Komplex noch nicht so weit entwickelt und es können, nicht von diesen gebundenen Substanzen durch die Mikroorganismen abgebaut werden. Das Biogaspotential im Mai sollte erneut getestet werden um Fehler im Versuchsverlauf auszuschließen.

Der Verlauf der restlichen analysierten Monate verhält sich erwartungsgemäß. In Abbildung 6.2 sind die Biogaspotentiale der krautigen und der gemischten Fraktion, den praktisch ermittelten Werten für den saisonalen Anfall gegenübergestellt. Links kann das Biogaspotential der Monate März bis September für beide Fraktionen entnommen werden. Rechts ist der Anteil an krautigem und holzigem Material sowie der Störstoffe für die Monate März bis September abgebildet. In den Frühjahrsmonaten liegen die Biogaspotenziale der krautigen und der gemischten Probe noch weit auseinander. Die krautige Fraktion besitzt hier ca. die doppelte Menge an Biogaspotential. Da sich in den Proben der Monate März und April hauptsächlich schwer abbaubares holziges Material befindet, ist hier auch nur ein sehr geringer Biogasertrag zu erwarten. In den Sommermonaten gleichen sich die Biogaspotentiale der Fraktionen weiter an. Auch das Verhältnis von leicht und schwer abbaubaren Substanzen nähert sich bis Juli immer weiter an. Damit verbunden verkleinert sich die Differenz der Biogaspotentiale der holzigen und krautigen Fraktion. Insgesamt fällt die Differenz deutlich geringer aus als erwartet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass auch krautige Pflanzenteile Lignin enthalten und deshalb schwerer abgebaut werden als erwartet. Außerdem ist bei holzigen Pflanzenteilen in der Wachstumsphase der Ligno-Cellulosekomplex noch nicht so ausgeprägt und deshalb sind leicht abbaubare Stoffe für die

Mikroorganismen zugänglich und können besser als erwartet von den Mikroorganismen verstoffwechselt werden können.

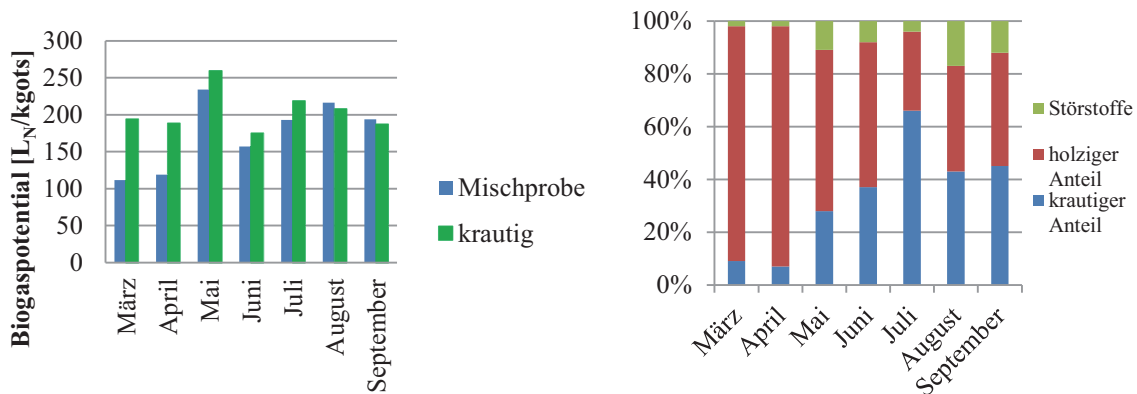


Abbildung 6.2 Gegenüberstellung des Biogaspotentials und des praktischen saisonalen Anfalls

Für die krautige Fraktion ist nach Kapitel 2.1 ein höheres Biogaspotential zu erwarten als tatsächlich ermittelt. Eine große Abweichung zwischen den Biogaspotentialen für die holzige und die krautige Fraktion war nur in den Frühjahrsmonaten festzustellen. Die Differenz zwischen krautiger und holziger Fraktion in den übrigen Monaten hätte höher ausfallen sollen. Ein Grund dafür ist die Einteilung in eine holzige und eine krautige Fraktion. Diese stützt sich nur auf die optische Einschätzung und nicht auf das tatsächlich vorhandene Biogaspotential der einzelnen Materialien.

Zusätzlich zu den in Kapitel 4.3.8 erläuterten Standardabweichungen, kommen weitere Fehlerquellen in Frage. Im Vorfeld wurde die Gärtesttestapparatur einer Dichtigkeitsprüfung nach VDI 4630 unterzogen. Allerdings sind Undichtigkeiten im Testsystem, vor allem durch die Kappen der Testgefäße und über die Schläuche, nicht gänzlich auszuschließen. Bei der Gaserfassung und Messung nach DIN 38414-8 wird bei Niveaugleichheit der Sperrflüssigkeit im Eudiometerrohr und im Niveaugefäß das entwickelte Gasvolumen abgelesen. Für die Proben wurden 800ml Eudiometerrohre mit einer Skalierung von 5ml verwendet. Dabei wurde immer der höhere Wert abgelesen. Die Genauigkeit der Gaserfassung ist daher auf ± 5 ml begrenzt. Eine Einrichtung zur mechanischen Durchmischung ist nach der VDI-Richtlinie nicht zwingend erforderlich. Das Mischgrünsubstrat neigt jedoch zur Bildung einer starken Schwimmschicht, die durch tägliches Schütteln aufgebrochen werden musste. Daher ist eine Behinderung der Ausgasung des gebildeten Biogases durch trockene, inaktive Flotationschichten, die nicht ausreichend resuspendiert werden konnten, eine mögliche Fehlerquelle. Da die gebildete Gasmenge die Kapazität der Gärapparatur übertraf, musste in regelmäßigen Abständen Gas abgelassen werden. Jedes Ablassen stellt einen Eingriff ins System dar und beeinträchtigt den anaeroben Abbauprozess. Die Gärversuche sollen Aussagen über die Abbaukinetik, d.h. den konkreten Gärverlauf, liefern. Daher muss die Probenaufbereitung weitestgehend den späteren Praxisbedingungen entsprechen. Deshalb wurde das gehäckselte Material verwendet, welches eine

starke Heterogenität aufwies. Die großen Unterscheide der Korngröße und die heterogene Zusammensetzung erschweren die Reproduzierbarkeit deutlich.

In Tabelle 6.1 sind die TS und oTS Gehalte aller analysierten Proben dargestellt. Die hohen TS und oTS Gehalte im April sind auf das warme und trockene Wetter in den Tagen vor der Probenahme zurückzuführen. Außerdem wurde die Probe direkt nach den Osterfeiertagen genommen, weshalb davon auszugehen ist, dass das Material einige Tage vor Ort gelagert wurde und deshalb sehr trocken war. Der geringe TS Gehalt im Juli ist auf die Regentage vor der Probenahme zurückzuführen. Die Schwankungen der TS Gehalte beziehen sich auf die Witterungsbedingungen zum Zeitpunkt der Probenahme und die damit verbundene Feuchtigkeit des Materials. Die oTS Gehalte liegen im erwarteten Bereich zwischen 80 und 90%. Die gemischte Fraktion im August besitzt einen etwas niedrigeren oTS Gehalt, was auf einen erhöhten Anteil an anorganischen Störstoffen wie z.B. Erde in der Probe schließen lässt. Ein Zusammenhang zwischen oTS Gehalt und den jahreszeitlichen Schwankungen ist nicht zu identifizieren.

Tabelle 6.1 Gehalt an Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz der untersuchten Proben

Probe	TS [%]	oTS [%]
März_gemsicht	64,13	86,78
März_krautig	64,71	91,82
April_gemsicht	76,89	93,58
April_krautig	82,71	90,97
Mai_gemischt	51,25	80,98
Mai_krautig	58,72	81,62
Juni_gemsicht	56,98	80,23
Juni_krautig	50,61	82,38
Juli_gemischt	47,7	77,69
Juli_krautig	39,34	89,82
August_gemischt	53,63	69,05
August_krautig	43,32	89,28
September_gemsicht	42,87	85,71
September_krautig	48,34	89,02

Bei den untersuchten Proben kam es in Hinblick auf die Verweilzeiten des Batchverfahrens zu keinen großen Abweichungen. Das 1% Kriterium wurde zwischen dem dreiundzwanzigsten und dem fünfundzwanzigstem Tag erreicht. Eine Übersicht der Biogaspotentialkurven und die konkreten Verläufe der einzelnen Proben sind in Anhang II abgebildet.

Der nach Kapitel „4.3.8 Biogaspotenziale von Mischgrün“ maximal erreichte Biogasertrag liegt bei 259,2L_N/kg_{oTS} und wurde für die krautige Fraktion des Monats Mai gemessen. Im Mittel lag der Biogasertrag für den krautigen Teil bei 206,7L_N/kg_{oTS}. In den Monaten Mai, Juni, und Juli lag der Biogasertrag für das Mischsubstrat durchschnittlich bei 195L_N/kg_{oTS}. Für diese Monate kann eine energetische Nutzung durch anaerobe Fermentation angestrebt werden. Allerdings ist zu beachten, dass die Biogaspotentialtests den maximal möglichen Biogasertrag darstellen und in der Praxis geringere Erträge zu erwarten sind. Vergleichswerte des Biogasertrags für gängige Substrate nach

„Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V.“ sind in Tabelle 6.2 dargestellt. Der Biogasertrag von Mischgrün liegt im Vergleich zu Maissilage ungefähr bei einem Drittel. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass Mischgrün nicht speziell angebaut werden muss und deshalb ohne zusätzlichen Energieaufwand zur Verfügung steht.

Tabelle 6.2 Biogasertrag gängiger Substrate

Substrat	Biogasertrag [L _N /kg _{oTS}]
Maissilage	650
Gras	600
Rindergülle	450

Eine energetische Nutzung durch Biogaserzeugung könnte zukünftig zur Energieerzeugung beitragen. Diese muss sich jedoch an den jahreszeitlichen Schwankungen orientieren und deshalb auf den Zeitraum von Mai bis September beschränken. Zusätzlich kann der holzige Anteil des Mischgrüns ganzjährig energetisch durch eine Verbrennung genutzt werden und somit Energie erzeugen.

Auf Grund der geringen Differenz zwischen den ermittelten maximal erreichbaren Biogaspotentialen, der krautigen und der gemischten Fraktion, kann auf eine Trennung verzichtet werden. Die Auswirkungen der Trennung auf den holzigen Anteil sollten ihrerseits noch geprüft werden. Dabei sollten besonders der Aschegehalt sowie die Heizwerte für eine energetische Nutzbarkeit untersucht werden

6.3 Trennverfahren

Für die im Mischgrün enthaltene holzige und krautige Fraktion sind unterschiedliche optimale Verwertungswege bekannt. Um diese Fraktionen aus dem heterogenen Material zu erzeugen, können Trennverfahren eingesetzt werden. Die in Kapitel 5.1 diskutierte Auswahl der Trennverfahren stellte das Siebklassieren und das Sichten als am besten geeignet heraus Trennverfahren. Hierbei sind sowohl die physikalischen Eigenschaften als auch die technische Realisierbarkeit betrachtet.

Durch die Siebklassierung ist es möglich, das heterogene Material nach der Teilchengröße zu trennen. Zuvor sollte hierfür eine heterogene Mischung erzeugt werden, bei der die holzige und krautige Fraktion in unterschiedlichen Korngrößenklassen enthalten ist. Dies ist mit einer Zerkleinerung zu realisieren. Dabei kann ausgenutzt werden, dass das holzige und krautige Material unterschiedliche Elastizität besitzt und deshalb bei der Beanspruchung der Zerkleinerungsmaschine unterschiedliche Teilchengrößen entstehen.

Durch die praktischen Siebversuche wurden keine Fraktionen mit erhöhtem krautigem und holzigem Material erzeugt. Ein Grund für die verfehlte Entmischung bei der Siebklassierung, liefert die nach der Zerkleinerung vorliegende Korngrößenverteilung der einzelnen Fraktionen.

Bei der Zerkleinerung sollten große holzige und kleinere krautige Partikel entstehen, die dann entsprechend ihrer Größe klassiert werden. Dies war letztendlich nicht der Fall, was die Frage nach anderen möglichen Zerkleinerungsaggregaten aufwirft. Nach Raussen, Hackländer und Siepenkothen (Witzenhausen, 2010) konnten zumindest in Bezug auf die holzige Fraktion bessere Ergebnisse mit einer anderen Zerkleinerungsmaschine (Langsamläufer) erzielt werden. Außerdem wurde das Sieb von Hand bewegt, so dass der Prozess nicht kontinuierlich ablaufen konnte und die Reproduzierbarkeit beeinträchtigt war. Dieses Problem könnte mit mechanischen Siebverfahren wie dem Rollen-, Rüttel- oder Luftstrahlsieben behoben werden.

Die Sichtversuche lieferten bessere Ergebnisse als die Siebklassierung, jedoch waren diese ebenfalls nicht hinreichend genau. Besonders die für die Biogaserzeugung relevanten Proben mit hohem krautigem Anteil lieferten Fehlkornanteilen zwischen 26 und 28%. Die Zickzackbauweise des verwendeten Windsichters führt zur schnellen Verstopfung des Sichtraums. Außerdem stellte sich die unzureichende Größe des Geräts als problematisch dar, weil das Material auf sehr geringe Korngrößen zerkleinert werden muss, um die Kapazität des Sichters nicht zu überlasten. Die stufenlose Regelung des Gebläses variierte leicht während der Versuche und verfälscht somit zusätzlich die erzielten Ergebnisse. Die Biogaspotentiale konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr bestimmt werden, weshalb keine Aussagen über den energetischen Nutzen des Trennverfahrens getroffen werden konnten.

Besonders die stark heterogenen Formen, der im Mischgrün enthaltenen Materialien, erschweren eine Trennung deutlich. Außerdem erweisen sich die Dichteunterscheide und die unterschiedliche Teilchengröße nach der Zerkleinerung nicht als ausreichend genaue Merkmale, zur Trennung in eine holzige und eine krautige Fraktion.

7. Zusammenfassung

Die verstärkte Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen trägt zur Einsparung von fossilen Ressourcen und zur Reduktion der CO₂-Emission bei. Im Zuge der immer steigenden Nutzung von Agrarflächen zur Gewinnung von Energiepflanzen entstehen jedoch zunehmend ökosoziale Konflikte. Zum einen entsteht eine Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelerzeugung, zum anderen verursacht der zunehmend monokulturelle Anbau Umweltschäden, wie Bodendegeneration und Eutrophierung, an den Agrarflächen. Die effizientere Ausschöpfung heimischer Bioenergiepotenziale, unter Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen, durch verstärkte Verwendung organischer Rest- und Abfallstoffe, landwirtschaftlicher Koppelprodukte, und von Landschaftspflegematerial (BMW, 2010) steht im Fokus des Energiekonzepts der Bundesregierung. In diesem Sinne verfolgt diese Arbeit das Ziel, Grundlagen für die energetische Nutzung von Mischgrün zu schaffen und so das vorhandene Energiepotential nutzbar zu machen. Speziell sollten der saisonale Anfall von Mischgrün in Bezug auf die Zusammensetzung charakterisiert und die Auswirkungen von Trennverfahren auf die Zusammensetzung geprüft werden. Hierbei lag das Augenmerk auf der Erzeugung einer holzigen und einer krautigen Fraktion, da für diese unterschiedliche Verwertungswege zu bevorzugen sind.

Zunächst wurde anhand einer Literaturrecherche der theoretische saisonale Anfall ermittelt. Im nachfolgenden praktischen Teil wurde der tatsächliche Anfall im Zeitraum von März bis September 2011 analysiert. Hierfür wurde am Ende jedes Monats eine repräsentative Probe auf dem Abfallwirtschaftszentrum der Firma Buhck in Trittau entnommen und untersucht. Es erfolgte, im ersten Schritt der Untersuchung, eine visuelle Einschätzung des dortigen Mischgrünaufkommens. Anschließend wurde die Probe geteilt, zerkleinert und diente nachfolgend als Mischprobe zur Biogaspotentialbestimmung. Der Rest der Probe wurde von Hand sortiert, um die tatsächliche Zusammensetzung zu ermitteln und mit den theoretischen Erkenntnissen zu vergleichen. Das maximale Biogaspotential wurde nach VDI-Richtlinie 4630 bestimmt.

Im zweiten Schritt erfolgte die Prüfung der Auswirkungen von Trennverfahren auf die Zusammensetzung des Mischgrüns. Hierfür wurden zunächst durch einer Literaturrecherche die vielversprechendsten Trennverfahren ermittelt und diese im Hinblick auf die Trennung von Mischgrün bewertet. Als am besten geeignet stellten sich das Sieben und das Sichten heraus. In den Monaten März und November wurden praktische Siebversuche mit zerkleinertem Mischgrün durchgeführt. Um die Genauigkeit der Sichtversuche zu prüfen, wurden definierte Mischproben erstellt und diese mit einem Zickzacksichter getrennt.

Der praktisch bestimmte Verlauf der Mischgrünzusammensetzung über den untersuchten Zeitraum, stimmte mit den aus der Literaturrecherche ermittelten Daten überein. Der krautige Anteil variierte zwischen 10% im März und April bis über 60% im Juli. Die Ergebnisse belegen, dass in den Frühjahrsmonaten eine rein thermische Nutzung durch Verbrennung des überwiegend holzigen Materials sinnvoll ist. Im Zeitraum von Mai bis September sollte auf Grund des hohen krautigen

Anteils, eine Nutzung durch anaerobe Fermentation angestrebt werden. Durchschnittlich lagen die Werte in diesem Zeitraum bei $172\text{L}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$ für die krautige und $206\text{L}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$ für die gemischte Fraktion.

Für die Siebversuche wurde nach der visuellen Einschätzung der erzeugten Fraktionen, angesichts der geringen Entmischung, auf die aufwendigen Biogaspotentialtests verzichtet. Im Verlauf der Sichtversuche konnte eine Entmischung in geringem Maße festgestellt werden, eine signifikante Trennung der Fraktionen konnte jedoch nicht erreicht werden. Für die Trennversuche wurde insgesamt keine deutliche Trennung in eine holzige und eine krautige Fraktion festgestellt.

Als abschließende Erkenntnis bleibt festzuhalten, dass die Ergebnisse der visuellen Sichtung sowie der Handsortierung mit denen aus der Literatur erwarteten Daten übereinstimmen. In den Frühjahrsmonaten März, April und Mai ist mit einem erhöhten Aufkommen von holzigem Material zu rechnen wohingegen in den Sommermonaten Juni, Juli und August mit einem erhöhten krautigem Anteil zu rechnen ist. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass diese Ergebnisse jedoch klimatischen- und Umweltbedingungen unterworfen sind und zeitlich versetzt ablaufen können. Für die Biogaspotentiale der krautigen Fraktion ist mit Werten zwischen 175 und $259\text{L}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$ zu rechnen die Biogaspotentiale der gemischten Fraktion liegen zwischen 111 und $234\text{L}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$. Auf Grund der geringen Differenzen zwischen den Biogaspotentialen der holzigen und der krautigen Fraktion und des energetischen Mehraufwands ist eine Trennung nicht sinnvoll.

8. Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen des saisonalen Anfalls von Mischgrün erfolgten für die Monate März bis September. Für einen vollständigen Überblick ist es jedoch erforderlich den Anfall ganzjährig zu erfassen. Dies gilt sowohl für die visuelle Sichtung als auch für die Trenn- und Biogasversuche. Des Weiteren ist es erforderlich, Wetterdaten und meteorologische Auffälligkeiten messtechnisch zu erfassen und in die Bewertungen mit einfließen zu lassen. Hierfür kann auf die Daten örtlicher Wetterdienste, wie beispielsweise der Wetterstation auf den Gelände der HAW-Hamburg zurückgegriffen werden. Die Probenahme während der praktischen Arbeiten erfolgte einmal monatlich. Um die Veränderungen im Verlauf eines Monats besser abschätzen zu können sollten einige Monate genauer, beispielsweise durch wöchentliche Probenahme, analysiert werden. Eine detaillierte Befragung der Anlieferer, z.B. durch einen Fragebogen, könnte zusätzlich Aufschluss über die genaue Herkunft, der im Mischgrün enthaltenen Materialien geben. So kann zum einen genau eingegrenzt werden, aus welchen Pflegemaßnahmen das Material hervorgeht und zum anderen, auf welchen Flächen (privat, kommerziell, öffentlich) es zurückgeführt werden kann.

Außerdem sollte die Komplexität der Probenahme erhöht werden, indem nicht nur Material des Abfallwirtschaftszentrums in Trittau untersucht wird, sondern Mischgrünproben von verschiedenen Verwertungsunternehmen in die Untersuchung einbezogen werden. Außerdem sollte die Anwendbarkeit auf Gesamtdeutschland geprüft werden, indem beispielsweise in Süd-, Ost- und Mitteldeutschland die gleichen Versuche wiederholt werden.

Das Mischgrün erreicht in seiner derzeitigen Form nur etwa ein Drittel des Biogaspotentials von Maissilage, welches hauptsächlich in Biogasanlagen zum Einsatz kommt. Um den Ertrag zu erhöhen, sollte eine Analyse von einzelnen Pflanzen auf ihr Biogaspotential hin erfolgen. Anhand der so gewonnenen Daten könnte ermittelt werden, welche Pflanzen bzw. Pflanzenteile sich eignen um einen hohen Biogasertrag zu generieren. So könnte in Zusammenhang mit optimierten Sammelwegen ein neuer Stoffstrom entstehen, der ein höheres Biogaspotential liefert. Die Aufteilung in eine holzige und eine krautige Fraktion lieferte nur eine geringe Biogaspotentialsteigerung. Deshalb ist eine Einteilung in gut abbaubare und schlecht abbaubare Substanzen sinnvoller und sollte deshalb in den Vordergrund gestellt werden.

Die bislang bestehenden Sammelwege sollten optimiert werden. So könnte eine Trennung direkt beim Anfall des Materials eine effektivere Nutzung ermöglichen. Das aus den Pflegemaßnahmen resultierende Mischgrün, könnte direkt in gut und schlecht abbaubare Fraktionen getrennt und unterschiedlichen Verwertungswegen zugeführt werden.

Zusätzlich sollten andere Nutzungspfade untersucht werden. Besonders die Möglichkeit der thermischen Verwertung sollte genauer analysiert werden. Die Heizwerte und der Aschegehalt, des

Mischgrüns und der durch die Trennung entstehenden Fraktionen, sollten bestimmt werden um weitere Aussagen über die Verwertungsmöglichkeiten treffen zu können.

Um eine effektivere Trennung zu ermöglichen, sollten zusätzliche Trennverfahren und Trennaggregate getestet werden. Weiter in den Fokus sollten angepasste Trennmerkmale rücken. Dabei sollte nach speziellen Eigenschaften der gut abbaubaren Pflanzen und Pflanzenteile gesucht werden, die für eine Trennung genutzt werden können. Die Aufteilung in eine krautige und eine holzige Fraktion wie sie derzeit besteht, hat sich in dieser Arbeit nicht bewährt und sollte wie bereits beschrieben überarbeitet werden. Um die Trennung effektiver gestalten zu können, sollte außerdem die Zerkleinerung näher betrachtet und andere Zerkleinerungsaggregate getestet werden.

Eine weitere Möglichkeit das Mischgrün energetisch effektiver zu nutzen, stellen mechanische, biochemische und chemische Vorbehandlungen dar. Durch eine enzymatische Vorbehandlung könnte der schwer abbaubare Ligno-Cellulose-Komplex aufgebrochen und die leichter abbaubaren Stoffe für die Mikroorganismen zugänglich gemacht werden. Ultraschall- und Mikrowellenbestrahlung könnte durch die einwirkende Energie den Ligno-Cellulose-Komplex zerstören und so die Abbaubarkeit verbessern. Außerdem kommen, zur effektiveren Biogaserzeugung, Vorbehandlungen mit Stickstoff, Säure, Hochdruck oder hohen Temperaturen in Frage und sollten näher analysiert werden.

Des Weiteren sollte die rein stoffliche Nutzung, wie sie derzeit durch die Kompostierung stattfindet, mit der kombinierten Nutzung von anaerober Fermentation und Kompostierung verglichen werden. Das Mischgrün könnte in den Fermentern einer Trockenfermentationsanlage als Strukturmaterial dienen und anschließend durch eine Kompostierung stofflich genutzt werden.

Schließlich sollte eine ausführliche CO₂ Bilanz erstellt werden. Dabei sollte der gesamte derzeitige Kreislauf, von Beginn des Pflanzenwachstums bis zur Wiederaufbringung des kompostierten Materials, enthalten sein (Life Cycle Assessment). Außerdem sollte der Nutzen durch die Substitution von fossilen Brennstoffen durch die Biogaserzeugung und die damit verbundene CO₂ Einsparung, dem Aufwand durch den Bau und Betrieb der Biogasanlage, gegenübergestellt werden. Im Detail sollte auch die CO₂ Einsparung durch Trennverfahren oder Vorbehandlungsmethoden gegenüber dem dadurch entstehendem Aufwand und der damit verbundenen CO₂ Emission analysiert werden. Neben der CO₂ Bilanz empfiehlt sich auch eine Wirtschaftlichkeitsrechnung, um die Attraktivität für Unternehmen zu steigern.

Literaturverzeichnis

Adwiraah, Helmut, Körner, Ina und Bade, Olaf. 2009. *Energetische und stoffliche Nutzung organischer Abfälle der SRH unter besonderer Berücksichtigung des Klimaschutzes - Erstellung und Bewertung denkbarer Nutzungspfade* -. Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg-Harburg. Hamburg : s.n., 2009. nicht veröffentlicht.

Amon, Thomas. 2005. Biogaserzeugung aus Grünlandbiomasse im Alpenraum. *Landtechnik, Agriculture Engineering*. 2005, Bd. 60.

Amon, Thomas. biogas-infoboard.de. [Online] [Zitat vom: 24. 11 2011.] http://www.biogas-infoboard.de/pdf/Amon_AH_v3.pdf.

Bärtels, Andreas. 1991. *Gartengehölze*. Stuttgart : Eugen Ulmer GmbH & Co, 1991. ISBN 3-8001-6399-3.

Bischofsberger, W., et al. 2005. *Anaerobtechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. ISBN 3-540-06850-3.

BMWi. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. [Online] http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf.

Brauer, Heinz. 1996. *Produktions- und produktintegrierter Umweltschutz*. Heidelberg : Springer, 1996. ISBN 3-540-58059-X.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2008. *Anteil erneuerbarer Energien (EE) am gesamten Primärenergieverbrauch (nach Wirkungsgradmethode)*. Berlin : s.n., 2008.

Bundesministerium für Umweltschutz, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. [Online] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. [Zitat vom: 02. 12 2011.] http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bioabfv_anh1.pdf.

Dornack, Christina. 2001. *Termophile Vergärung von Mischsubstraten*. Dresden : Technische Universität Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, 2001. ISBN 1615-083X.

Europäisches Parlament. BMU. [Online] [Zitat vom: 26. 11 2011.] http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/abfall_verbringunsvo.pdf.

Geradie, M.H. 2003. *The microbiology of anaerobic digesters*. New Jersey : John Willey & Sons Inc., 2003. ISBN 0-471-20693-8.

Guter Rat bei allen Gartenfragen. 2002. Guter Rat bei allen Gartenfragen. *Guter Rat bei allen Gartenfragen*. Genhemigte Sonderausgabe, 30. November 2002, S. 160.

H. Rumpf, K. Schönert. 1972. *Zerkleinern: 2 T.* Weihenheim : Verlag Chemie, 1972, 1972. Dechema-Monographien. Sammelbände von Einzeldarstellungen über Forschung und Entwicklung auf Gebieten des chemischen Apparatewesens. Nr. 1292-1326, Bd. 69.

Hildermann, Swetlana. 2010. *Gasbildungspotential von Grünabfällen*. Hamburg : Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft Technische Universität Hamburg-Harburg, 2010. Bd. Diplomarbeit. nicht veröffentlicht.

Hirschberg, Hans Günther. 1999. *Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau*. Heidelberg : Springer, 1999. ISBN 3-540-60623-8.

Hofmann. 2001. Grundlagen der Biogaserzeugung. [Online] Regierung Niederbayern, 2001. [Zitat vom: 20. 10 2011.] http://wiki.istanbullisesi.net/images/e/e5/Grundlagen_Biogas.pdf.

Hofrich, H. und Steinbüchel, A. 2001. *Biopolymers*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag, 2001. ISBN-3-527-30220-4.

Jaeckel, Erhard. 1983. *Gärtnern nach der Natur*. Stuttgart : Eugen Ulmer GmbH & Co, 1983. ISBN 3-8001-6148-6.

Kaltschmitt, Martin und Hartmann, Hans. 2001, 2009. *Energie aus Biomasse* . [Hrsg.] Hermann Hofbauer. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin , 2001, 2009. ISBN: 978-3-540-85094-6; e-ISBN: 978-3-540-85095-3.

Kern, M., Raussen, T. und Apel, E. 2009. *Energetische und stoffliche Verwertung von Abfallbiomass*. Witzenhausen : Witzenhausen-Institiut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2009. ISBN 978-3-9812405-4-2.

Körner, Ina. 2008. *Stickstoffhaushalt bei der Kompostierung - Bilanzen, Gehalte, Umsetzungs- und Auftragsprozesse*. [Hrsg.] Prof. Dr-Ing. R. Stegmann. Hamburg : s.n., 2008. ISBN 978-3-943-9812867-0-0.

- Lehr, Richard. 1981.** *Taschenbuch für den Garten und Landschaftsbau*. Berlin : Verlag Paul Parey, 1981. ISBN 3-489-62822-5.
- Leschonski, Kurt. 1986.** *Die Technik des Windsichtens*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1986.
- LFU, (Bayrisches Landesamt für Umweltschutz). 2004.** *Biogashandbuch Bayern*. Bayern : Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, 2004.
- livingathome.de. 2000-2011.** livingathome.de. *phaenologischer kalender*. [Online] 2000-2011. http://www.livingathome.de/pflanzen_gaertnern/phaenologischer-kalender/.
- Michels, Bernhard. 2010.** *Gärtnern nach den 10 Jahreszeiten der Natur*. München : BLV Buchverlag & Co. KG, 2010. ISBN 978-3-8354-0630-8.
- nachwachsende-rohstoffe.de.** nachwachsende-rohstoffe.de. [Online] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). [Zitat vom: 30. 11 2011.] http://www.bioenergie-portal.info/fileadmin/bioenergie-beratung/sachsen/dateien/Vortraege/Gasertraege_4.pdf.
- Ottow, Johannes C. G. und Bidlingmaier, Werner. 1997.** *Umweltbiotechnologie*. Stuttgart : G. Fischer, 1997. ISBN 3437252305.
- P., Weiland. 2001.** Grundlagen der Mathangärung- Biologie und Substrate. *Biogas als regenerative Energie- Stand und Perspektive*. Tagung Hannover, 2001, Bd. 1620.
- Pötschkes. 2002.** *Goßes Gartenbuch*. Kaarst : Gärtner Pötschke Verlag, 2002. ISBN 3920362012.
- Raussen, Hackländer und Siepenkothen. 2010.** Konditionierung von Grünabfällen zur regionalen energetischen Nutzung. [Buchverf.] M. Kern K. wiemer. *Bio- und Sekundärstoffverwertung V*. Witzenhausen : Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2010.
- Rechtenbach, Dorothea. 2009.** *Fermentative Erzeugung von Biowasserstoff aus biogenen Roh- und Reststoffen*. Hamburg : Verlag Abfall aktuell, 2009. ISBN 978.3.9812867-1-7.
- Rösch, C. 2005.** Vergleich stofflicher und energetischer Wege zur Verwertung von Bio- und Grünabfällen. *Wissenschaftliche Berichte FZKA 5857*. 2005, S. 269.
- Rumpf, Hans. 1975.** *Mechanische Verfahrenstechnik*. München : Hanser, 1975. ISBN 3446119876.

Stieß, Matthias. 1992. *Mechanische Verfahrenstechnik 1.* Heidelberg New York : Springer Verlag, 1992. ISBN 3-540-55778-4.

VDI-Richtlinie-4630. 2006. *Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung,-Probenahme,- und Stoffdatenerhebung,- Gärversuche.* s.l. : Beuth Verlag, 2006.

Weiler, Elmar und Lutz, Nover. 2008. *Allgemeine und molekulare Botanik.* Stuttgart : Georg Thieme Verlag, 2008. 978-3-13-147661-6.

Westphal, Luise. 2010. *Biogaspotential von Gras und Rasenschnitt -Energetische Verwendung von organischen Reststoffen am Beispiel der grasartigen Bioressourcen im Bezirk Bergedorf-.* Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft, Technische Universität Hamburg-Harburg. Hamburg : s.n., 2010. Diplomarbeit.

Wieczorek, Nils. 2010. Untersuchung der biologischen Umsetzung von Mikroalgen zu Biogas unter thermophilen und mesophilen Bedingungen. Hamburg : Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft, 2010. Bd. Bachelorarbeit, nicht veröffentlicht.

Wiemer, K. und Kern, M. 2010. *Bio- und Sekundärrohstoffverwertung V.* Witzenhausen : Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2010. 3-928673-56-4.

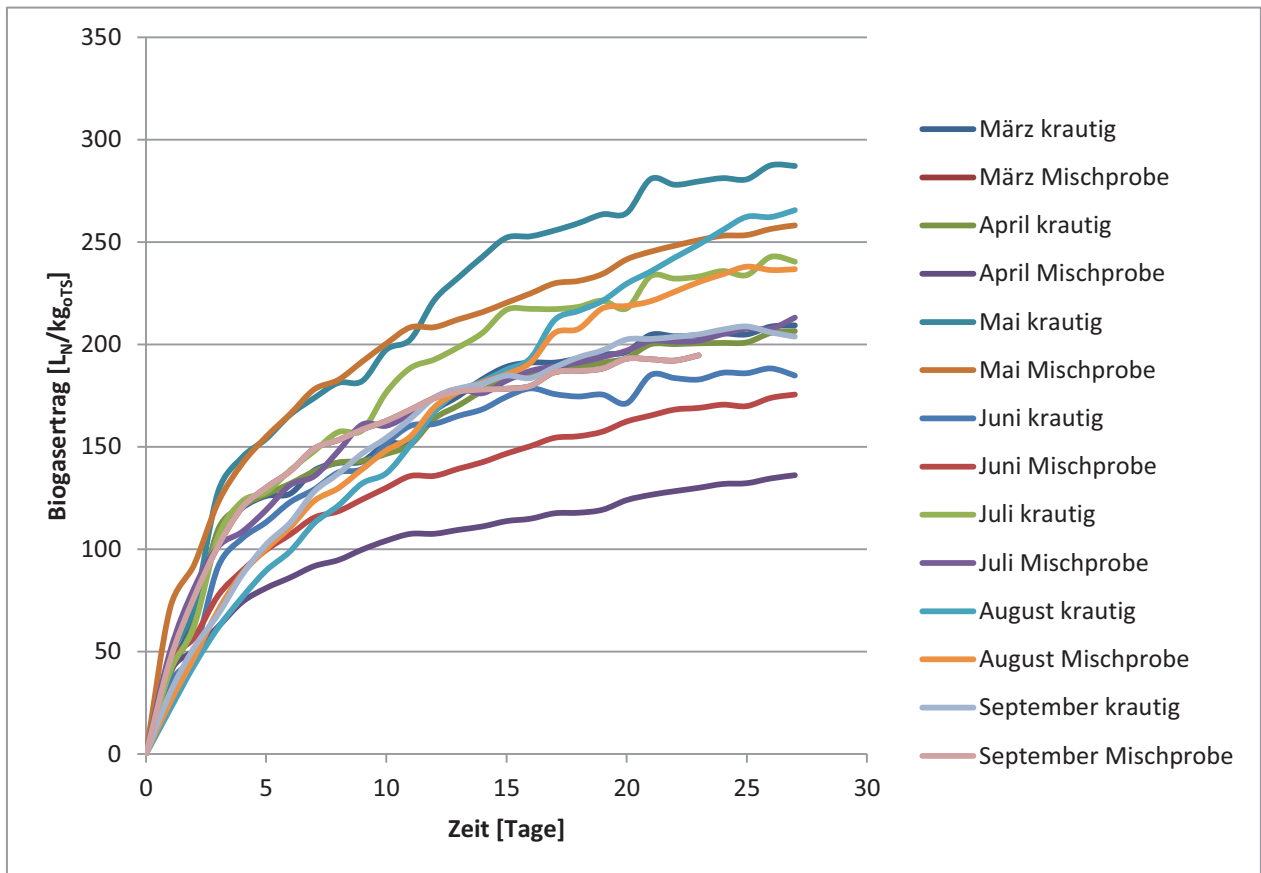
Anhang

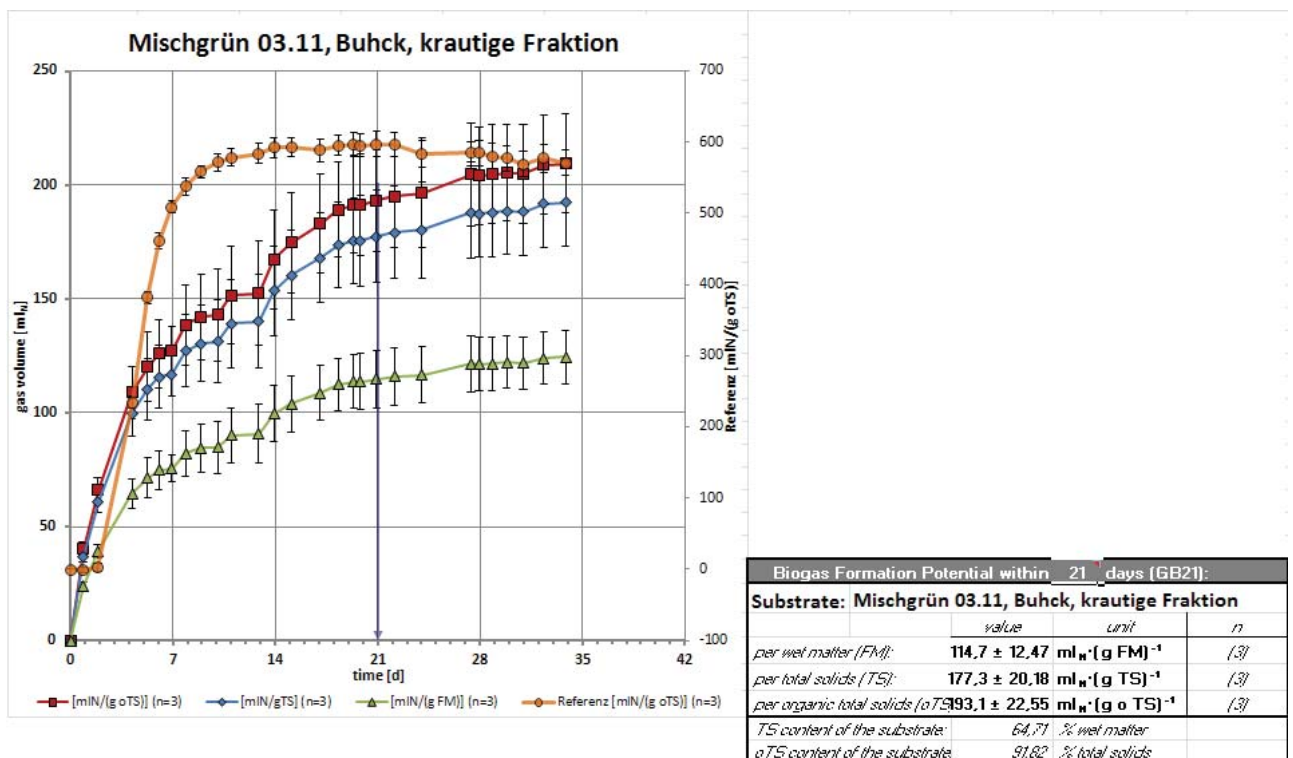
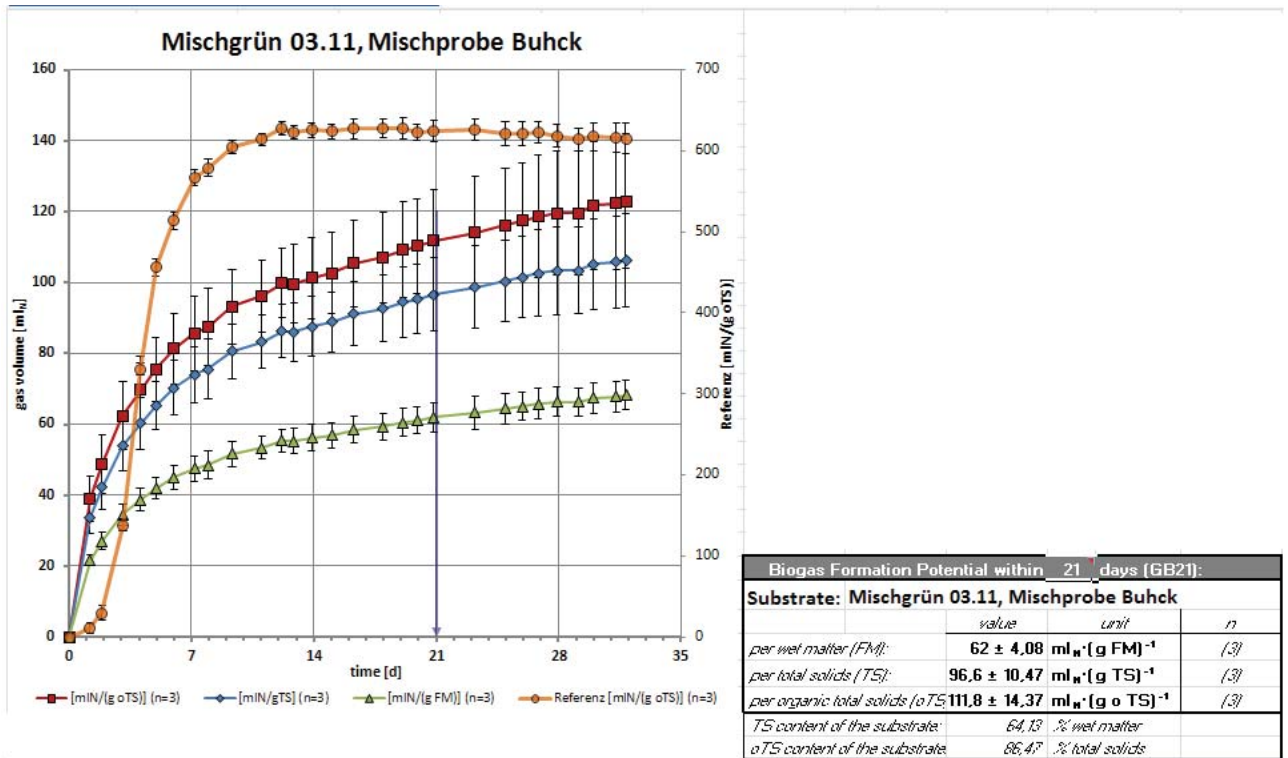
Anhang I: Jahresarbeitstabelle

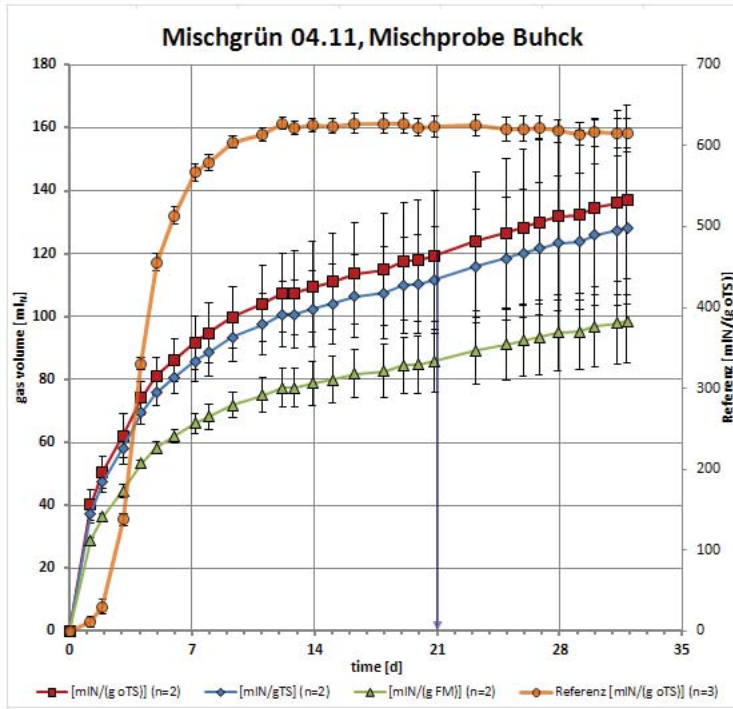
Jahresarbeitstabelle (Guter Rat bei allen Gartenfragen, 2002)

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
besser Monat												
geeigneter												
Vorbereiten												
Bodenanalyse												
Sommerblumen vorkuvertieren												
Gemüse vorkultivieren												
Frühbeenuzung												
Winterschutz												
Pflegen												
Mulchen												
Gründüngung												
Kompostierung												
Pflanzen und jauchen												
Unkrautbekämpfung												
Bewässerung												
Säen ins Freiland												
Einjährige Sommerblumen												
Zweijährige Sommerblumen												
Stauden												
Gemüse												
Pflanzen												
Vorkultivieren Sommerblumen												
Sauden												
Zwiebel- und Knollengewächse												
Ziiergehölzer												
Beerensträucher												
Obstbäume												
Balkonpflanzen												
Anlegen												
Rasen												
Steingarten												
Teich												
Kleinstbiotop												
Hügel- und Hochbeete												
Schneiden												
Hecken												
Rose												
Beerensträucher												
Kernobst												
Steinobst												
Obstpalire												
Erziehungsschnitt (Obstbäume)												
Stauden (zurückschneiden)												

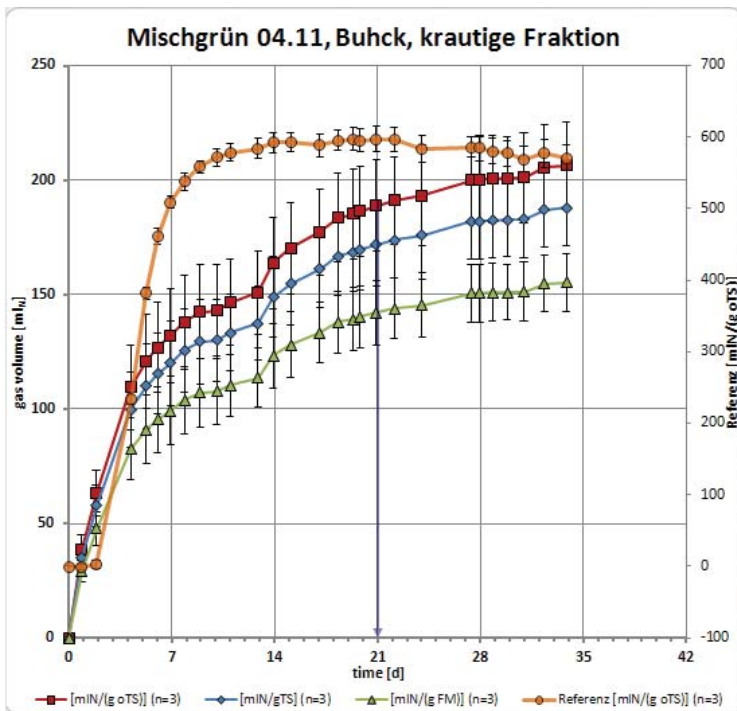
Anhang II: Biogaspotentialtestkurven



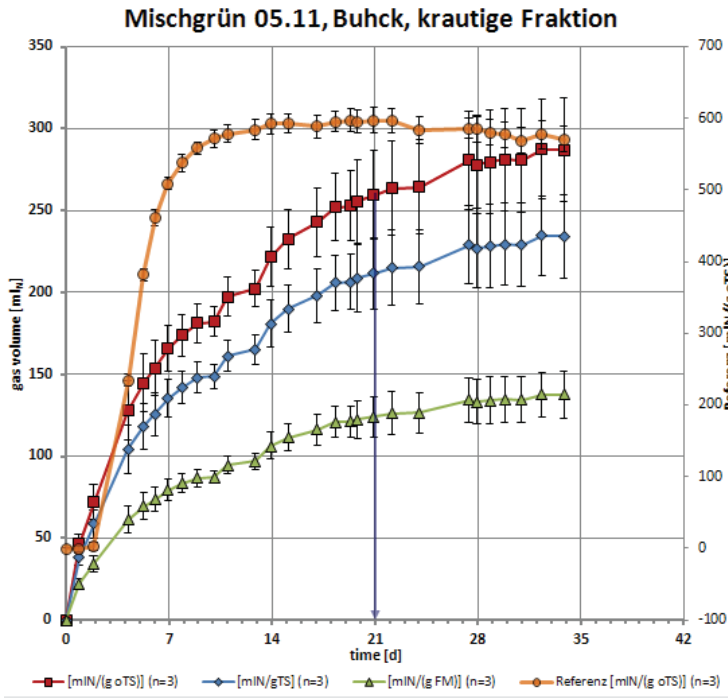




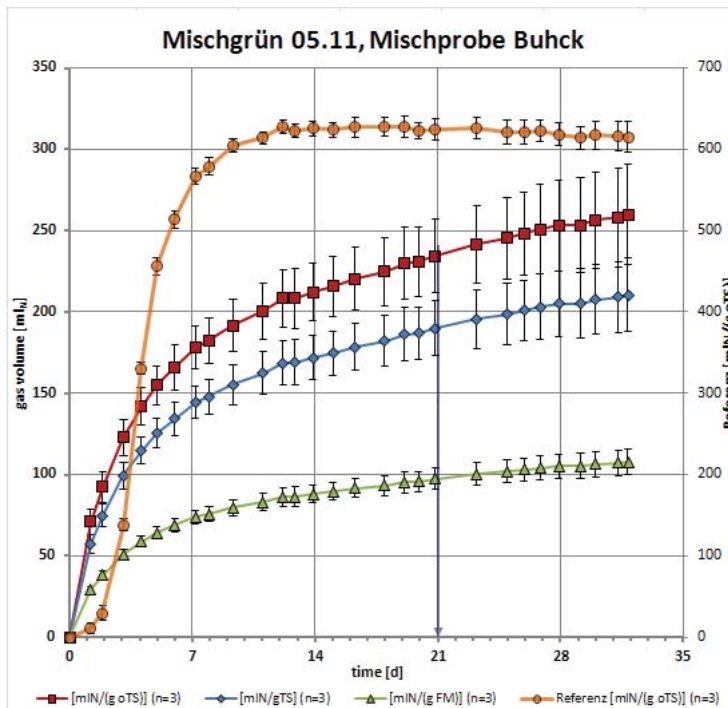
Biogas Formation Potential within 21 days (GB21):			
Substrate: Mischgrün 04.11, Mischprobe Buhck			
	value	unit	n
per wet matter (FM):	85,8 ± 9,9	ml _N ·(g FM) ⁻¹	(2)
per total solids (TS):	111,6 ± 17,02	ml _N ·(g TS) ⁻¹	(2)
per organic total solids (oTS):	119,3 ± 20,83	ml _N ·(g o TS) ⁻¹	(2)
TS content of the substrate:	76,69	% wet matter	
oTS content of the substrate:	93,58	% total solids	



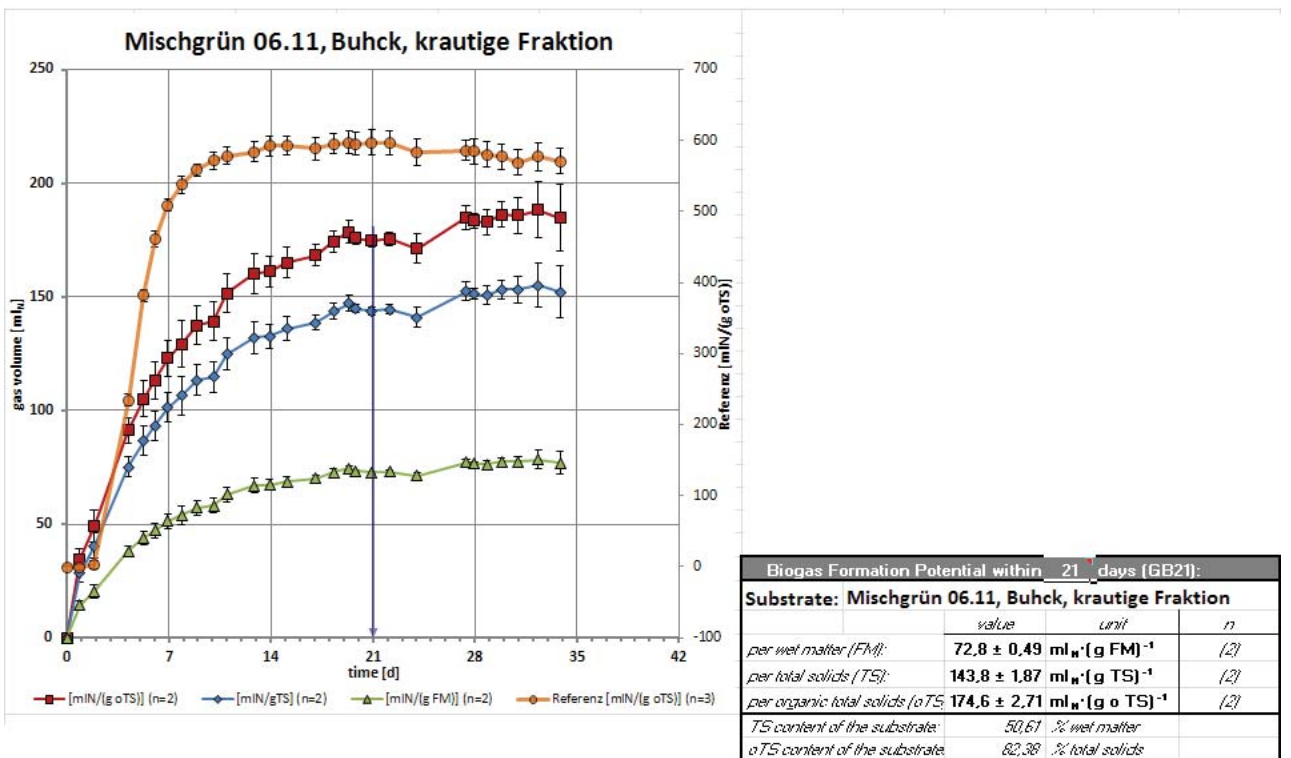
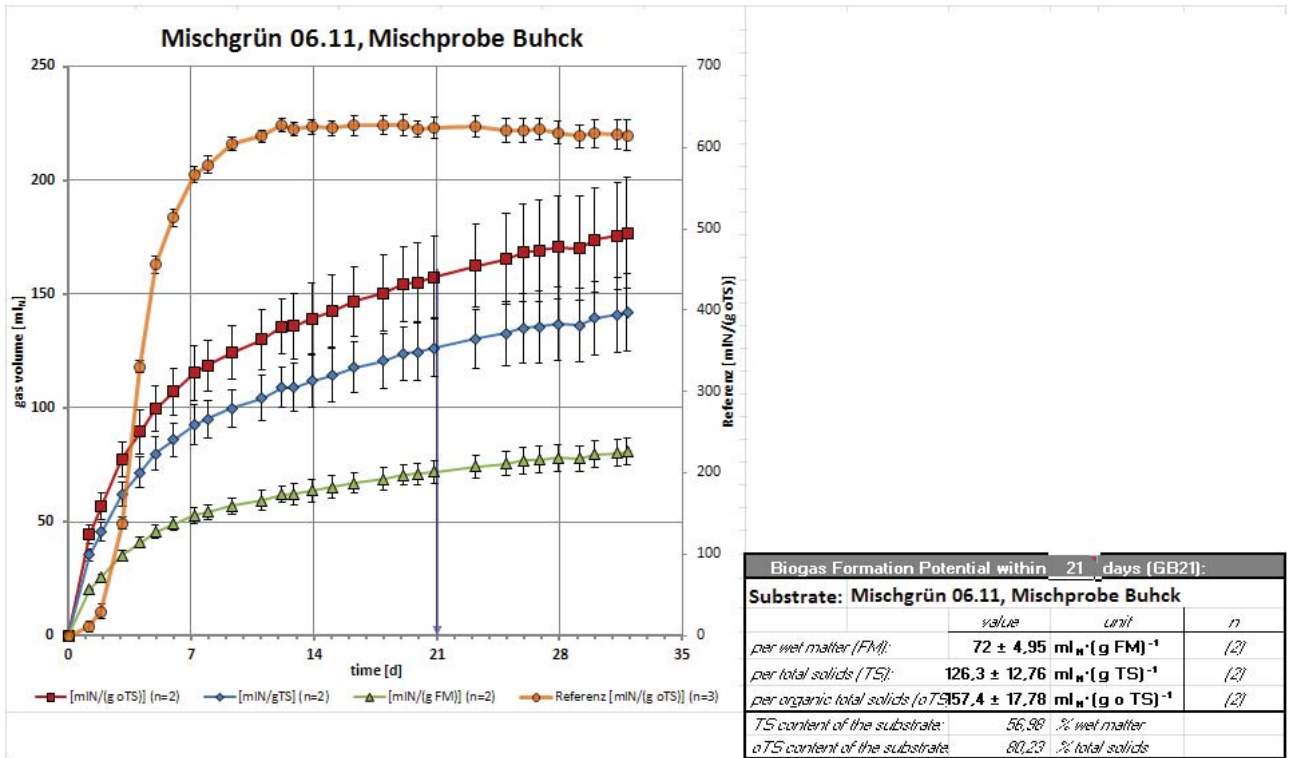
Biogas Formation Potential within 21 days (GB21):			
Substrate: Mischgrün 04.11, Buhck, krautige Fraktion			
	value	unit	n
per wet matter (FM):	142,1 ± 14	ml _N ·(g FM) ⁻¹	(3)
per total solids (TS):	171,8 ± 17,86	ml _N ·(g TS) ⁻¹	(3)
per organic total solids (oTS):	188,9 ± 20,19	ml _N ·(g o TS) ⁻¹	(3)
TS content of the substrate:	82,71	% wet matter	
oTS content of the substrate:	90,97	% total solids	

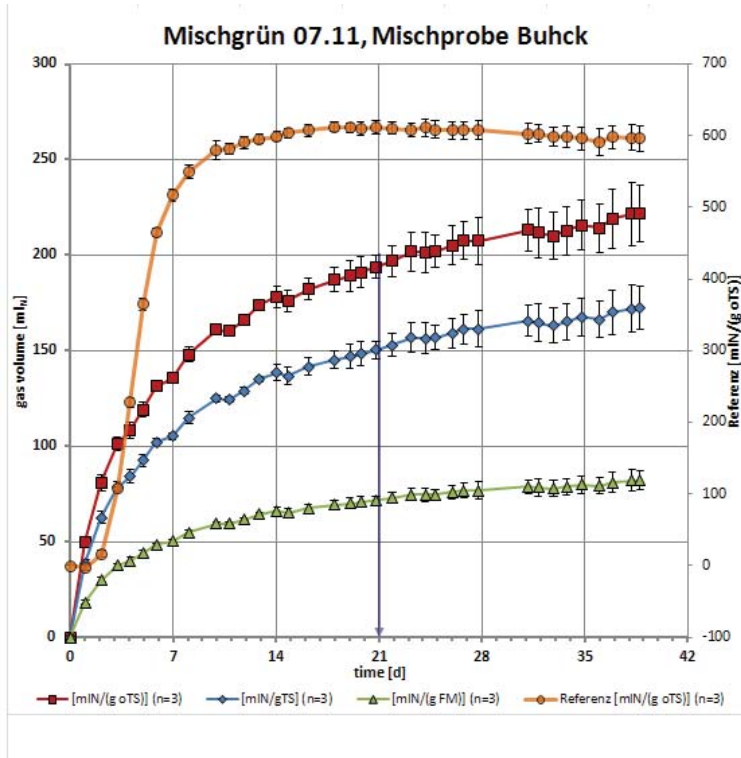


Biogas Formation Potential within 21 days (GB21):			
Substrate: Mischgrün 05.11, Buhck, krautige Fraktion			
	value	unit	n
per wet matter (FM):	124,2 ± 12,28	ml _N ·(g FM) ⁻¹	(3)
per total solids (TS):	211,6 ± 21,82	ml _N ·(g TS) ⁻¹	(3)
per organic total solids (oTS):	259,2 ± 27,17	ml _N ·(g o TS) ⁻¹	(3)
TS content of the substrate:	58,72	% wet matter	
oTS content of the substrate:	81,62	% total solids	

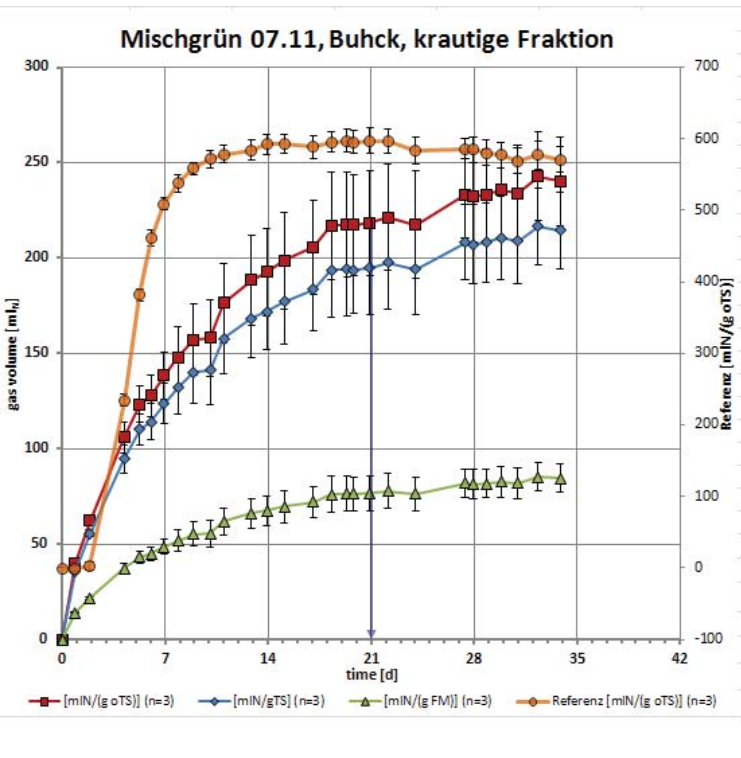


Biogas Formation Potential within 21 days (GB21):			
Substrate: Mischgrün 05.11, Mischprobe Buhck			
	value	unit	n
per wet matter (FM):	97,3 ± 6,51	ml _N ·(g FM) ⁻¹	(3)
per total solids (TS):	189,8 ± 16,77	ml _N ·(g TS) ⁻¹	(3)
per organic total solids (oTS):	234,4 ± 22,63	ml _N ·(g o TS) ⁻¹	(3)
TS content of the substrate:	51,25	% wet matter	
oTS content of the substrate:	80,98	% total solids	

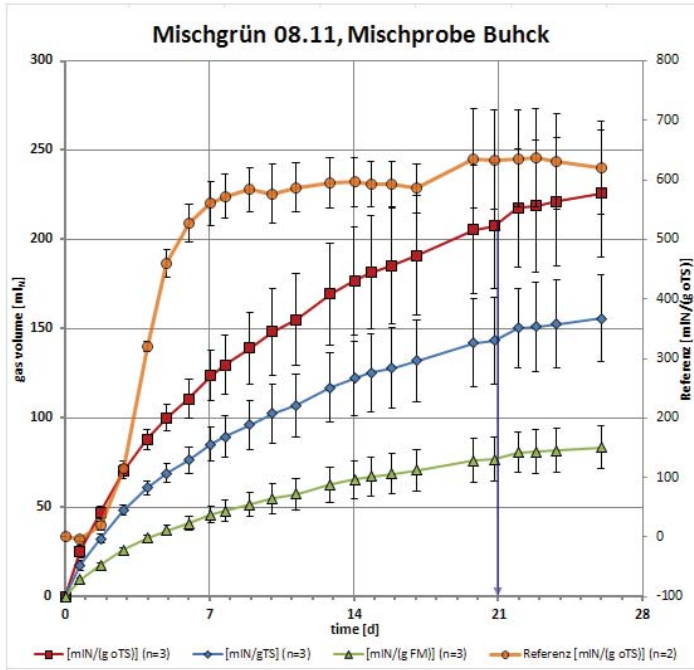




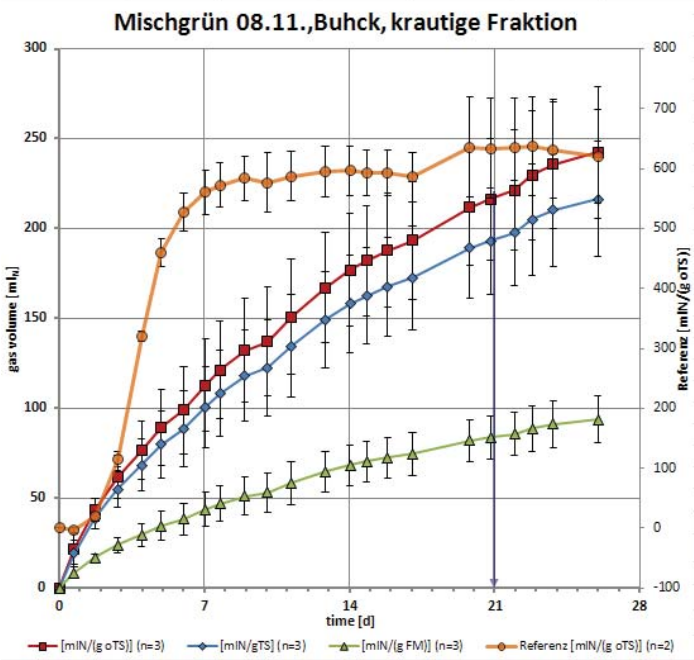
Biogas Formation Potential within 21 days (GB21):			
Substrate: Mischgrün 07.11, Mischprobe Buhck			
	value	unit	n
per wet matter (FM):	71,8 ± 2,03	ml _N ·(g FM) ⁻¹	(3)
per total solids (TS):	150,6 ± 4,58	ml _N ·(g TS) ⁻¹	(3)
per organic total solids (oTS):	193,8 ± 6,04	ml _N ·(g o TS) ⁻¹	(3)
TS content of the substrate:	47,70	% wet matter	
oTS content of the substrate:	77,63	% total solids	



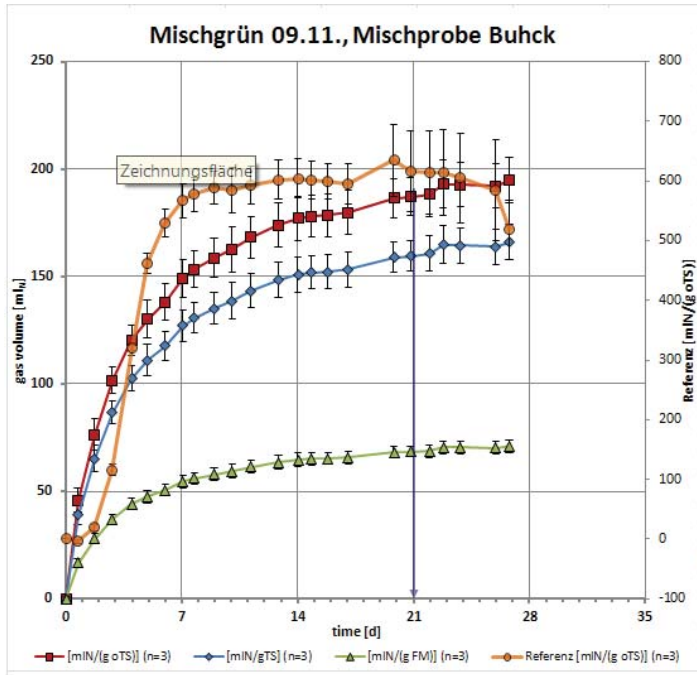
Biogas Formation Potential within 21 days (GB21):			
Substrate: Mischgrün 07.11, Buhck, krautige Fraktion			
	value	unit	n
per wet matter (FM):	76,7 ± 9,2	ml _N ·(g FM) ⁻¹	(3)
per total solids (TS):	194,9 ± 24,28	ml _N ·(g TS) ⁻¹	(3)
per organic total solids (oTS):	218,3 ± 27,74	ml _N ·(g o TS) ⁻¹	(3)
TS content of the substrate:	33,34	% wet matter	
oTS content of the substrate:	89,28	% total solids	



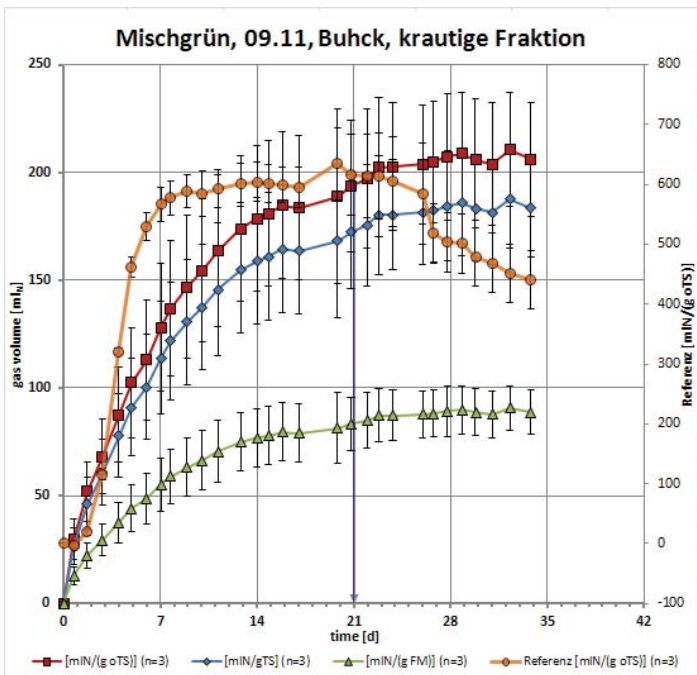
Biogas Formation Potential within 21 days (GB21):		
Substrate: Mischgrün 08.11, Mischprobe Buhck		
	value	unit
per wet matter (FM):	76.9 ± 12.25	$\text{ml}_N \cdot (\text{g FM})^{-1}$
per total solids (TS):	143.3 ± 24.12	$\text{ml}_N \cdot (\text{g TS})^{-1}$
per organic total solids (oTS):	207.6 ± 35.16	$\text{ml}_N \cdot (\text{g o TS})^{-1}$
TS content of the substrate:	53,63	% wet matter
oTS content of the substrate:	69,05	% total solids



Biogas Formation Potential within 21 days (GB21):		
Substrate: Mischgrün 08.11.,Buhck, krautige Fraktion		
	value	unit
per wet matter (FM):	83.7 ± 12.29	$\text{ml}_N \cdot (\text{g FM})^{-1}$
per total solids (TS):	193.2 ± 29.62	$\text{ml}_N \cdot (\text{g TS})^{-1}$
per organic total solids (oTS):	216.4 ± 33.85	$\text{ml}_N \cdot (\text{g o TS})^{-1}$
TS content of the substrate:	43,32	% wet matter
oTS content of the substrate:	89,28	% total solids



Biogas Formation Potential within 21 days (GB21):		
Substrate: Mischgrün 09.11., Mischprobe Buhck		
	value	unit
per wet matter (FM):	$68,4 \pm 2,46$	$\text{ml}_N \cdot (\text{g FM})^{-1}$
per total solids (TS):	$159,5 \pm 6,99$	$\text{ml}_N \cdot (\text{g TS})^{-1}$
per organic total solids (oTS):	$187 \pm 8,8$	$\text{ml}_N \cdot (\text{g o TS})^{-1}$
TS content of the substrate:	42,87	% wet matter
oTS content of the substrate:	85,37	% total solids



Biogas Formation Potential within 21 days (GB21):		
Substrate: Mischgrün, 09.11, Buhck, krautige Fraktion		
	value	unit
per wet matter (FM):	$83,4 \pm 12,22$	$\text{ml}_N \cdot (\text{g FM})^{-1}$
per total solids (TS):	$172,5 \pm 26,55$	$\text{ml}_N \cdot (\text{g TS})^{-1}$
per organic total solids (oTS):	$193,7 \pm 30,5$	$\text{ml}_N \cdot (\text{g o TS})^{-1}$
TS content of the substrate:	48,34	% wet matter
oTS content of the substrate:	89,02	% total solids

Anhang III Ergebnisse der Siebklassierung

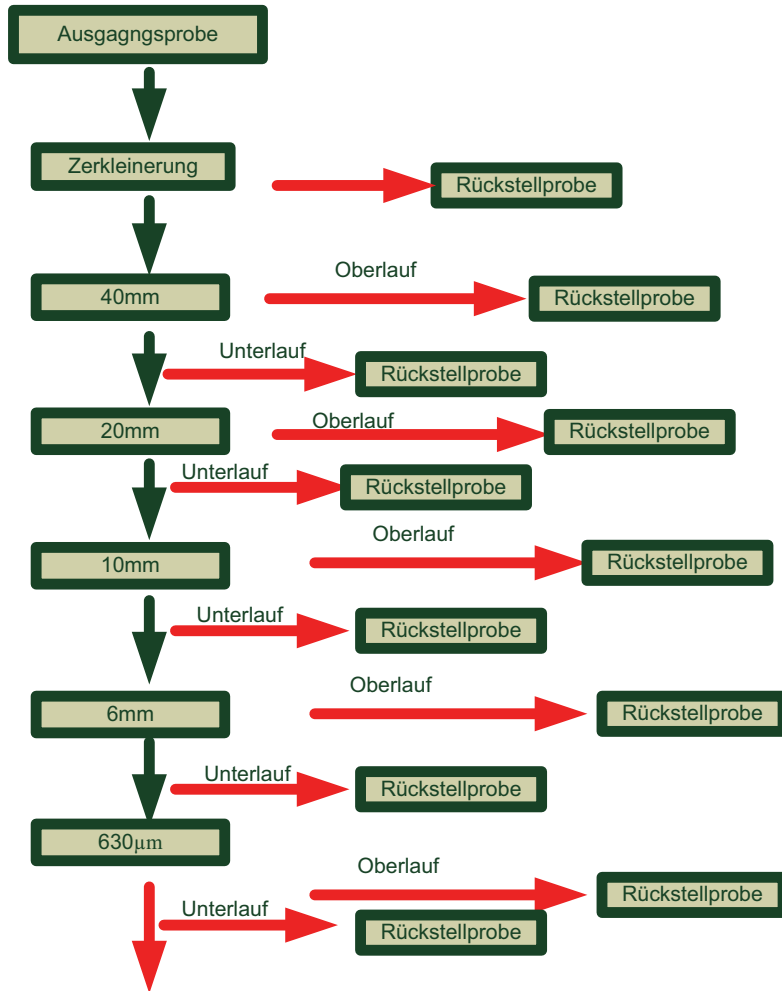
Ergebnisse der Siebklassierung für den Monat März:

Maschenweite [mm]	Siebrückstand[g]	q3	Q3
20	90,19	0,44955638	1
10	31,2	0,15551789	0,55044362
6,3	37,13	0,18507626	0,39492573
5	10,09	0,05029409	0,20984947
0,63	32,01	0,15955538	0,15955538

Siebklassierung für den Monat November:

Maschenweite [μm]	Siebrückstand [g]	Q3	q3
40000	1,12	0,993874894724753	0,00283235970968313
10000	1,56	0,908123420871296	0,0197253622638647
4000	5,14	0,788683868003981	0,129985079533672
1000	3,619	0,395145854069367	0,742059106371374
630	1,542	0,118061404180384	0,243722024125635

Anhang IV Verfahrensschema der Zerkleinerung



Danksagung

Prof. Dr. Ing. Rainer Stank danke ich ganz herzlich für die Betreuung dieser Bachelorarbeit und die mir gegebene Möglichkeit zur selbständigen Bearbeitung meines Themas und der mir zu Teil kommenden Unterstützung. Besonderer Dank gebührt auch meinem Betreuer Dipl. Ing. Helmut Adwiraah für die tatkräftige Unterstützung und die hilfreichen Anregungen. Prof. Dr. Ing. Kerstin Kuchta danke ich herzlich für die Möglichkeit zur Bearbeitung meines Themas im Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft der Technischen Universität Hamburg-Harburg und der umfangreichen Unterstützung die sie mir während meiner Zeit am IUE zukommen ließ. Des Weiteren sei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IUE gedankt, ohne deren Hilfe diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Außerdem möchte ich den Laboringenieuren Dipl. Ing. Wittkowski und Dipl. Ing. Bücke, der Hochschule für angewandte Wissenschaft, danken. Sie eröffneten mir die Möglichkeit ihre Laboreinrichtungen zu nutzen und standen mir dabei hilfreich zur Seite. Herrn Axel Herrfurth danke ich für die nette Zusammenarbeit mit der Firma Buck, bei der ich jeden Monat meine Mischgrünprobe auf dem AWT in Trittau holen konnte.

Ganz besonderer Dank gebührt meiner Freundin die mich zu jederzeit tatkräftig unterstützte und mir liebevoll zur Seite stand. Auch meinen Freunden danke ich für ihre großartige Unterstützung. Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken. Zum einen für die wunderbare Unterstützung aber auch dafür, dass sie mir diese Studium ermöglicht haben und immer für mich da waren.