

# **FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK**

des Fachausschusses Forschung und Lehre der  
Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG)

**604**

Daniel Baumkötter

## **Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Substrate zur Steigerung des Biogasertrages**

Dissertation

Hohenheim 2019



Universität Hohenheim  
Institut für Agrartechnik  
Verfahrenstechnik der Tierhaltungssysteme  
Prof. Dr. Thomas Jungbluth

FH Münster  
Institut für Energie und Prozesstechnik  
Prof. Dr. Christof Wetter

# **Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Substrate zur Steigerung des Biogasertrages**

Dissertation  
zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Agrarwissenschaften (Dr. sc. agr.)

vorgelegt  
der Fakultät Agrarwissenschaften

von  
Daniel Baumkötter, M.Eng.  
aus Münster

2019

Die vorliegende Arbeit wurde am 17.10.2018 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Dekan: Prof. Dr. R. T. Vögele

Berichterstatter: Prof. Dr. T. Jungbluth

Mitberichter: Prof. Dr. C. Wetter

Mündliche Prüfung: Prof. Dr. T. Jungbluth

Prof. Dr. C. Wetter

Prof. Dr. J. Müller

Leitung Kolloquium: Prof. Dr. S. Böttinger

Tag der mündlichen Prüfung: 12.12.2018

Die Förderung erfolgte innerhalb des Projektes Groen Gas – Grünes Gas, im Rahmen des INTERREG IV A-Programms Deutschland-Niederland mit Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE). Kofinanziert wurde es mit Mitteln des Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie der Niederlande, des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr des Landes Niedersachsen, des Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Bauen, Wohnen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen sowie der Provinzen Drenthe, Fryslân, Gelderland, Groningen und Overijssel. Es wurde begleitet durch das Programmmanagement bei der Ems Dollart Region (EDR).

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des Autors urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2019

Im Selbstverlag: Daniel Baumkötter

Bezugsquelle: Universität Hohenheim  
Institut für Agrartechnik -440-  
Garbenstr. 9  
D-70599 Stuttgart  
[opus.uni-hohenheim.de](http://opus.uni-hohenheim.de)

## **DANKSAGUNG**

Ich möchte die Möglichkeit nutzen und den Personen meinen Dank aussprechen, die es mir durch ihre Unterstützung und Förderung ermöglicht haben, diese Arbeit zu verfassen.

Herrn Prof. Dr. Thomas Jungbluth danke ich ganz herzlich für die Betreuung und Annahme als Doktorand an der Universität Hohenheim, das damit entgegengebrachte Vertrauen und die ergebnisorientierte Unterstützung. Ebenfalls danke ich Herrn Dr. Hans Oechsner für die vielen wertvollen Hinweise und Anregungen zur Arbeit. Herrn Prof. Dr. Joachim Müller danke ich für die Mitwirkung bei der mündlichen Prüfung.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Christof Wetter für die hervorragenden Arbeitsbedingungen und die Betreuung der Arbeit. Ohne die langjährige Förderung und sein Vertrauen in mich wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Ein großer Dank gilt Herrn Dr. Elmar Brüggling für die kontinuierliche Unterstützung. Die fortwährende Zusammenarbeit mit vielen wertvollen Ratschlägen und Anmerkungen haben den Weg für diese Arbeit bereitet. Dies gilt in gleicher Weise für Herrn Dr. Marius Kerkerling, der mir als interessierter und hilfsbereiter Diskussionspartner mit fachkundigen Hinweisen stets weitergeholfen hat. Ebenso danke ich allen weiteren aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen im Forschungsteam an der FH Münster für die stets gute Zusammenarbeit und Unterstützung in freundschaftlicher Atmosphäre. Dies gilt selbstverständlich auch für die vielen studentischen Hilfskräfte, bei denen ich mich für die Mithilfe bei den zahlreichen Versuchen für diese Arbeit bedanke.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, die immer an mich glaubt und mich uneingeschränkt unterstützt. Der Zuspruch und die Freude über jeden kleinen Erfolg geben mir immer wieder Kraft.

Daniel Baumkötter

Münster, Januar 2019

---

## INHALTSVERZEICHNIS

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Einleitung  | 1  |
| 1.1   | Problemstellung   | 1  |
| 1.2   | Zielsetzung   | 3  |
| 2     | Wirkungsweisen und Verfahren zur Vorbehandlung  | 4  |
| 2.1   | Wirkung der Vorbehandlung auf den Biogasprozess   | 4  |
| 2.2   | Übersicht der Verfahren zur Vorbehandlung   | 9  |
| 2.3   | Mechanische Vorbehandlungsverfahren   | 11 |
| 2.3.1 | Schneidmühlen   | 12 |
| 2.3.2 | Prallmühlen   | 13 |
| 2.3.3 | Extruder  | 23 |
| 2.3.4 | Nasszerkleinerer  | 25 |
| 2.4   | Thermische und chemische Vorbehandlungsverfahren  | 31 |
| 2.5   | Weitere Vorbehandlungsverfahren   | 37 |
| 2.6   | Schlussfolgerungen  | 40 |
| 3     | Ermittlung geeigneter Substrate   | 46 |
| 4     | Versuchsanlage und –aufbau  | 57 |
| 4.1   | Aufbau und Funktion des Prallreaktors   | 57 |
| 4.2   | Technische Optimierungsmaßnahmen  | 61 |
| 4.3   | Untersuchungen am Prallreaktor  | 64 |
| 5     | Versuche zur mechanischen Vorbehandlung   | 68 |
| 5.1   | Versuchsprogramm  | 68 |
| 5.2   | Beschreibung der untersuchten Substrate   | 70 |
| 5.3   | Partikelgrößenverteilung  | 72 |
| 5.3.1 | Methodik und Durchführung der Partikelgrößenanalyse   | 72 |
| 5.3.2 | Auswertung und Ergebnisdarstellung  | 76 |
| 5.3.3 | Auswertung der Siebanalysen anhand der Verteilungsfunktion nach Rosin, Rammler, Sperling und Bennett (RRSB) | 82 |
| 5.3.4 | Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe mit verschiedenen Substraten   | 87 |

---

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.4   | Ermittlung der Biogaserträge  | 91  |
| 5.4.1 | Durchführung der Batch-Versuche   | 91  |
| 5.4.2 | Ergebnisse der Biogaspotenzialbestimmungen  | 92  |
| 5.5   | Stromverbrauch  | 101 |
| 5.5.1 | Methodik zur Bestimmung des Stromverbrauchs   | 101 |
| 5.5.2 | Ergebnisse der ersten Versuchsreihe mit Triticalestroh und Hafer-<br>Ganzpflanzensilage | 103 |
| 5.5.3 | Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe mit verschiedenen Substraten                       | 111 |
| 5.6   | Vergleichsversuch mit dem Prallreaktor an der Biogasanlage Sehan                        | 116 |
| 5.7   | Versuche mit dem Extruder   | 122 |
| 6     | Auswertung der Untersuchungen   | 130 |
| 6.1   | Energetische Bilanzierung   | 130 |
| 6.2   | Vergleich Partikelgröße zu Energieaufwand und Methanertrag                              | 134 |
| 6.3   | Wirtschaftlichkeitsbetrachtung  | 137 |
| 7     | Diskussion  | 146 |
| 8     | Zusammenfassung   | 159 |
| 9     | Summary   | 161 |
| 10    | Verzeichnisse   | 163 |
| 10.1  | Literatur- und Quellenverzeichnis   | 163 |
| 10.2  | Abbildungsverzeichnis   | 182 |
| 10.3  | Tabellenverzeichnis   | 188 |
| 10.4  | Formelverzeichnis   | 189 |
| 10.5  | Abkürzungsverzeichnis   | 190 |

## Anhang

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Problemstellung

Bei der Klimakonferenz der Vereinten Nationen (UN: engl. United Nations) in Paris 2015 wurde erstmals in einem globalen Abkommen von 195 Staaten das Ziel festgeschrieben, die Erderwärmung bis Ende des 21. Jahrhunderts auf maximal 2,0 °C und wenn möglich auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen [UNFCCC 2015]. Um dieses Ziel zu erreichen, bietet, neben der Einsparung von Energie und Rohstoffen, der Ausbau der regenerativen Energieerzeugung das größte Potenzial.

Die Bundesregierung fördert mit dem Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) bereits seit dem Jahr 2000 in Deutschland den Ausbau der regenerativen Energien und damit eine nachhaltige Energieversorgung. Ein Baustein dabei ist die Erzeugung von Energie aus Biomasse in Biogasanlagen, Biomasseheizkraftwerken und als Biokraftstoff aus Pflanzenöl oder Bioethanol. Dabei hat die Bioenergie Vor- und Nachteile gegenüber den anderen regenerativen Energien. Sie ist vielseitig einsetzbar, als Kraft- und Brennstoff sowohl in fester, flüssiger oder gasförmiger Form. Ein entscheidender weiterer Vorteil ist die vergleichsweise einfache Speicherbarkeit und die damit verbundene Flexibilität bei der Nutzung. Dadurch kann die Bioenergie zum Beispiel beim Ausgleich von Stromerzeugung und -verbrauch auch in Zukunft eine wichtige Rolle einnehmen und somit selbst bei absolut gesehen kleinen Anteilen am Energiemix die Energiewende voranbringen. Als Nachteil wird vor allem die mit dem Ausbau der Bioenergie einhergehende Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen gesehen [LEOPOLDINA 2013]. Die dadurch in der Öffentlichkeit entfachte und zum Teil sehr emotional geführte sogenannte „Teller-Tank-Diskussion“ sorgte für ein schlechtes Image von nachwachsenden Rohstoffen im Allgemeinen und Mais im Besonderen. In Wissenschaft und Politik wird daher häufig der Nutzung von Reststoffen und Abfällen zur Bioenergiebereitstellung der Vorzug gegeben, denn sie gilt als umweltverträglichste Variante der Bioenergie [WBGU 2008].

Die Entwicklung der Biogastechnologie ist eng mit dem EEG verknüpft. Erst durch die darin festgeschriebene Vergütung für den eingespeisten Strom war der rasante Ausbau auf 9.331 Anlagen in Deutschland mit einer arbeitsrelevanten installierten elektrischen Leistung von 3.769 MW<sub>el</sub> im Jahr 2017 möglich [FACHVERBAND BIOGAS 2018]. Mit den Novellierungen des EEG seit dem Jahr 2012 ist der Neubau an Biogasanlagen in Deutschland jedoch deutlich zurückgegangen. Dies lässt sich vor allem mit der geänderten Fördersystematik und

der damit verbundenen Senkung der Vergütungssätze begründen. Ausgenommen davon sind nur die Güllekleinanlagen und Abfallvergärungsanlagen. [SCHEFTELOWITZ ET AL. 2015]

Die derzeit in Deutschland betriebenen landwirtschaftlichen Biogasanlagen vergären mit einem massebezogenem Anteil von etwa 39 % vor allem Silomais und mit 44 % tierische Ausscheidungen in Form von Gülle und Mist zu Biogas. Der Anteil an Zwischenfrüchten, Landschaftspflegematerial und weiteren Reststoffen macht zusammen ca. 4 % aus. Die restlichen 13 % umfassen weitere nachwachsende Rohstoffe wie Grassilage, Getreide und Zuckerrüben. [SCHEFTELOWITZ ET AL. 2015]

Vor dem Hintergrund der kontrovers geführten öffentlichen Diskussion über die Nutzung von Silomais in Biogasanlagen [HEYDEMANN 2011, SCHUH 2011] und den im Trend steigenden Kosten für die Substratbeschaffung [RAUH 2015], kommt der Steigerung der Effizienz bei Biogasanlagen eine immer größere Bedeutung zu. Dabei gibt es Optimierungspotenziale entlang der gesamten Produktionskette. Neben der effizienten Nutzung des Biogases betrifft dies vor allem die eigentliche Produktion. Eine Möglichkeit bietet der verstärkte Einsatz bisher ungenutzter Nebenprodukte aus der Landwirtschaft. Diese finden für gewöhnlich keine Verwendung in verwandten Produktionsbereichen, entschärfen somit Flächen- und Marktkonkurrenzen und können sich im Idealfall ergänzen. Eine verbesserte energetische Nutzung dieser Rohstoffe ermöglicht eine höhere Wirtschaftlichkeit durch vollständigere Substratausnutzung bei gleichzeitiger Reduktion von anfallenden Nebenprodukten, wie Gärresten.

Während die meisten geeigneten Stoffe für die Biogasproduktion bereits verwendet werden, enthalten die verbleibenden, vor allem landwirtschaftlichen Reststoffe wie z.B. Stroh oder Pferdemit, oft hohe Anteile an lignocellulosehaltigen Bestandteilen. Deren Vergärung ist deutlich schwieriger und erfordert eine Aufbereitung, um die organische Substanz für die Umsetzung durch die Mikroorganismen zugänglich zu machen. Zusätzlich kann durch eine entsprechende Vorbehandlung auch die Umsetzungsgeschwindigkeit und der Biogasertrag dieser Stoffe erhöht werden.

Aus der Betreiberbefragung von SCHEFTELOWITZ ET AL. [2015] geht hervor, dass in den Betriebsjahren 2011 bis 2014 etwa 16 % der befragten Betreiber an ihrer Biogasanlage eine Substrataufbereitung nachgerüstet haben und fast 20 % ihre Substrate geändert haben. Dabei werden vor allem mechanische Vorbehandlungstechnologien eingebaut, die nach dem Prinzip der Prallzerkleinerung arbeiten. Alternative Verfahren befinden sich zumeist noch im Pilot- und Demonstrationsstadium und sind daher bedeutend seltener anzutreffen. Viele dieser Verfahren benötigen zudem eine mechanische Zerkleinerung als Vorstufe.

Die am Markt verfügbaren Anlagen zur mechanischen Substratvorbehandlung sind sehr unterschiedlich gestaltet und bislang wurden nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen zum Einfluss der konstruktiven Gestaltung der Prallmühlen auf die energetische Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Vorbehandlung durchgeführt. Hier setzt die vorliegende Arbeit an und führt erstmalig eine systematische Untersuchung der mechanischen Vorbehandlung mittels Prall hinsichtlich des Einflusses auf Biogasertrag und Partikelgrößenverteilung für verschiedene Substrate durch.

## 1.2 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit wird die mechanische Vorbehandlung verschiedener Substrate mit einem Prallreaktor untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird die mechanische Vorbehandlung mit dem Prallreaktor optimiert und bewertet. Dazu soll die optimale Einstellung der mechanischen Vorbehandlung zur effizienten Ausnutzung unterschiedlicher Substrate hinsichtlich maximalen Biogasertrags bei gleichzeitig geringem Energie- und Kostenaufwand ermittelt werden. Folgende Aspekte werden zur Beurteilung der mechanischen Vorbehandlung betrachtet:

- Technische Optimierung und Bewertung der Pralltechnologie
- Effizienz der Zerkleinerung hinsichtlich Stromverbrauch und Partikelgröße
- Wirkung der Zerkleinerung auf den Biogasertrag
- Einsatz verschiedener Substrate

Zu Beginn der Arbeit werden die am Markt verfügbaren Vorbehandlungsverfahren für landwirtschaftliche Biogasanlagen dargestellt. Nach Ermittlung der geeigneten Substrate für die Untersuchungen werden Versuchsanlage und –aufbau beschrieben. Daran schließen die Untersuchungen der mechanischen Vorbehandlung mit dem Prallreaktor an, bei denen die Partikelgrößenverteilung, der Biogasertrag und der Bedarf an elektrischer Energie bestimmt werden. Zusätzlich werden vergleichende Versuche an dem Prallreaktor einer Praxisanlage und einem Laborextruder durchgeführt. Anhand einer Energiebilanz und einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden die Ergebnisse der Untersuchungen ausgewertet.

Das Ziel dieser Arbeit ist somit die Optimierung und Bewertung der Technologie Prallreaktor zur Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Substrate für eine landwirtschaftliche Biogasanlage sowie die Steigerung der Gesamteffizienz des Biogasprozesses. Dies soll durch eine Erhöhung des Biogasertrages der eingesetzten Substrate sowie den Einsatz alternativer Substrate bzw. landwirtschaftlicher Rest- und Abfallstoffe erreicht werden.

## 2 WIRKUNGSWEISEN UND VERFAHREN ZUR VORBEHANDLUNG

Ziel einer Vorbehandlung vor der Vergärung ist in der Regel die Erhöhung des Biogasertrages der eingesetzten Substrate oder die Möglichkeit bisher nicht oder nur in geringen Mengen vergärbare Substrate einsetzen zu können. Vor allem durch den Einsatz lignocellulosehaltiger Rest- und Abfallstoffe aus der Landwirtschaft ergeben sich veränderte Anforderungen an die Vorbehandlung der Substrate. Daher werden in diesem Kapitel die durch die Vorbehandlung erzielbaren Effekte auf die Substrate aus der Literatur zusammengestellt und verschiedene Verfahren zum Aufschluss beschrieben. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der mechanischen Zerkleinerung mittels Prall, da diese Technologie in dieser Arbeit tiefer gehend untersucht wird.

### 2.1 Wirkung der Vorbehandlung auf den Biogasprozess

Ein vermehrter Einsatz lignocellulosehaltiger Reststoffe in Biogasanlagen kann zu einer Reihe verfahrenstechnischer Probleme führen, die durch eine Vorbehandlung gelöst werden können. So kann die Bildung von Schwimmschichten vermieden und der Aufwand für das Pumpen und Rühren gering gehalten werden. [HAEFFNER ET AL. 2010, HASHIMOTO 1983, KALIA UND SINGH 1998, SCHUMACHER ET AL. 2014]. Zudem erfordern Substrate mit hohem Ligningehalten längere Verweilzeiten aufgrund des verlangsamten Abbaus [BRUNI ET AL. 2010a]. Daher wird eine Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Substrate ausdrücklich empfohlen [APPELS ET AL. 2011, SAPCI 2013, WARD ET AL. 2008] bzw. als zwingend notwendig erachtet [BRUNI ET AL. 2010a, CARLSSON ET AL. 2012, FISCHER ET AL. 2013, OECHSNER ET AL. 2014]. SCHUMACHER ET AL. [2014] formulierten folgende Ziele für eine Vorbehandlung:

- Erhöhung des Biogasertrages durch Freilegung der Pflanzenzellen und Vergrößerung der Oberfläche
- Beschleunigung des Abbaus für eine höhere Ausnutzung der Biogasanlage
- Vermeidung von Schwimm- und Sinkschichten
- Verbesserung des Anlagenbetriebs durch einen verminderten Aufwand für das Pumpen und Rühren

Zellwände von Pflanzen bestehen zu wesentlichen Teilen aus Lignocellulose (Abbildung 2-1). Hauptbestandteil der Lignocellulose ist Cellulose, die aus Ketten von Glucose-Molekülen besteht. Zweitgrößte Komponente ist die Hemicellulose. Diese setzt sich aus verschiedenen C5- (Pentosen) und C6-Zuckern (Hexosen) zusammen. Die dritte Komponente Lignin bezeichnet eine Gruppe phenolischer Makromoleküle. Dabei sind diese unter anaeroben Bedin-

ungen, im Gegensatz zu Cellulose und Hemicellulose, nicht mikrobiologisch abbaubar. [RUBIN 2008]

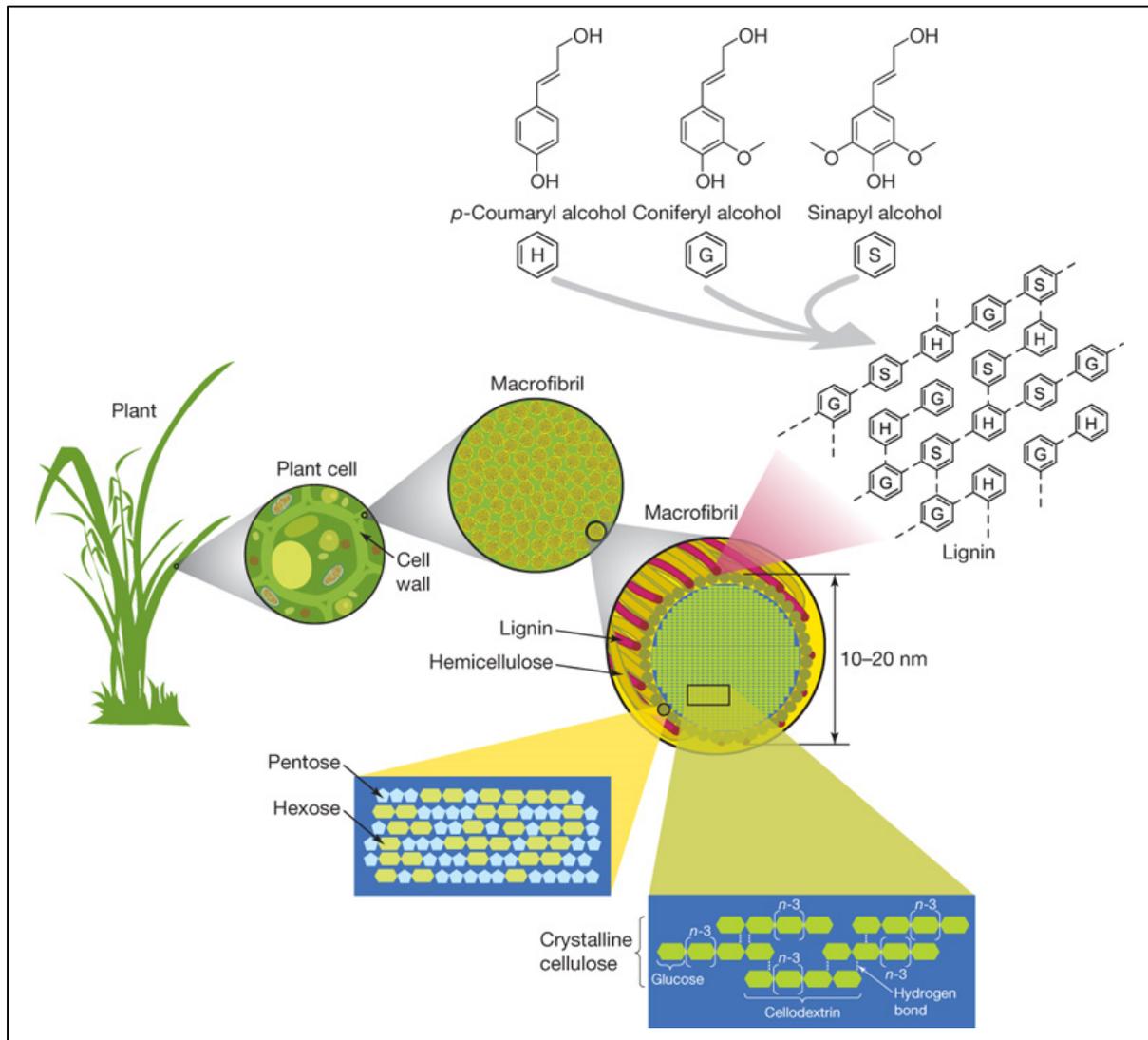


Abbildung 2-1: Struktur von Lignocellulose [RUBIN 2008]

Eine Vorbehandlung hat somit zum einen das Ziel, durch eine Zerkleinerung der faserreichen Substrate die Händelbarkeit aufgrund der geringeren Partikelgröße zu erhöhen und zum anderen die Zellwandstruktur aufzulösen, um den Zellinhalt freizusetzen und die Bestandteile der Lignocellulose für einen mikrobiellen Abbau zugänglich zu machen. Durch den Einsatz von Chemikalien, mechanischer oder thermischer Energie sowie einer Kombination von diesen können die komplexen Verbindungen von Cellulose, Hemicellulose und Lignin aufgeschlossen und die Zuckerpolymere bis in ihre Mono- und Oligomere (C6- und C5-Zucker) zerlegt werden. [KALTSCHMITT ET AL. 2009, LINDORFER ET AL. 2010]

Mit der größeren spezifischen Oberfläche werden die Umsetzungsvorgänge beschleunigt und die bessere Verfügbarkeit der Inhaltsstoffe soll einen höheren Biogasertag generieren. Jedoch

können lange Verweilzeiten im Folgeprozess der Vorbehandlung, wie sie bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen anzutreffen sind, die positiven Effekte wieder aufheben [HJORTH ET AL. 2011]. Das bedeutet, dass zwar eine beschleunigte Biogasbildung durch die Vorbehandlung eintritt, jedoch der erzielbare Biogasertrag konstant bleibt und in der gleichen Höhe auch über eine längere Verweilzeit erreicht werden kann. Neben der Erhöhung der Abbaueffizienz durch einen schnelleren und ergiebigeren Abbau der faserreichen Substrate zu Biogas [STRONG ET AL. 2011] sollten für eine effektive und wirtschaftliche Substratvorbehandlung folgende Ziele verfolgt werden: [TAHERZADEH UND KARIMI 2008]

- Produktion von reaktiven Cellulosefasern für einen enzymatischen Angriff
- Kein Verlust von vergärbaren organischen Substanzen
- Keine Bildung von Prozessinhibitoren
- Minimierung des Energiebedarfs
- Geringe Investitions- und Betriebskosten
- Keine Produktion von unverwertbaren Abfallprodukten
- Einsatz günstiger bzw. Vermeidung des Einsatzes von Chemikalien

Die Wirkung einer Vorbehandlung auf die Vergärbarkeit ist noch nicht abschließend geklärt und auch über die notwendige Intensität sind bislang nur wenige Informationen vorhanden [MÖNCH-TEGEDER 2014]. So halten BRUNI ET AL. [2010b] ebenso wie CARLSSON ET AL. [2012] die Desintegration von Materialien mit geringen Gehalten an Lignin für überflüssig, da eine Deckung des Energiebedarfs für den Aufschluss durch den Mehrertrag nicht immer gegeben ist. Und ZHANG UND BANKS [2013] sehen eine Steigerung der Abbaugeschwindigkeit oberhalb von 15 Tagen Verweilzeit als nicht relevant an. Dabei fällt auf, dass nahezu alle Untersuchungen zur Wirkung einer Vorbehandlung im Labormaßstab durchgeführt wurden, jedoch ist eine vollständige Abbildung der verfahrenstechnischen Veränderungen und Einflüsse im Labormaßstab nicht möglich [MÖNCH-TEGEDER 2014]. Vor allem sind die optimalen Bedingungen im Labormaßstab gegenüber den Praxisanlagen zu berücksichtigen. Auch führt eine Steigerung der Aufbereitungsintensität bzw. Maximierung der spezifischen Substratoberfläche nicht unbedingt zu einer weiteren Verbesserung des mikrobiellen Abbaus [HARTMANN ET AL. 2000, MÖNCH-TEGEDER 2014, SHARMA ET AL. 1988, ZHANG UND BANKS 2013]. Das bedeutet, dass es ein Optimum zwischen Aufbereitungsintensität und Methanertagspotenzial gibt.

In Tabelle 2-1 haben SCHEFTELOWITZ ET AL. die von den Herstellern angegebenen Effekte von Desintegrationsverfahren für den Substrataufschluss bei Biogasanlagen zusammengetra-

gen. Dabei beruhen viele der darin beschriebenen Effekte auf Beobachtungen an einzelnen Anlagen ohne einen größeren Vergleich.

Tabelle 2-1: Überblick der von Firmen angegebenen Effekte von Desintegrationsverfahren für den Substrataufschluss bei Biogasanlagen [SCHEFTELOWITZ ET AL. 2013]

| Kategorie         | Angegebene Effekte  |
|-------------------|---|
| Substrat          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Oberflächenvergrößerung, Vergrößerung der Angriffsflächen für Mikroben</li> <li>- Vergrößerung der Stoffübergangsflächen im Substrat, Erhöhung der Grenzfläche zwischen flüssiger und fester Phase durch Reduktion der Partikelgröße der Biomasse</li> <li>- Veränderung der Partikelstruktur, Veränderung der Partikelgrößenverteilung</li> <li>- Auflösung von Schutzschichten, Aufschluss von Zellulose und Hemizellulose, Freisetzung von einbindenden Ligninschichten (d.h. Nutzung von 5- bis 6-fach Zucker für Methanisierung) (z.B. Verfahren der Bioextrusion)</li> <li>- Zerstörung und Zerkleinerung organischer Zellen, Zerstörung von Zellwänden, Aufschluss der Zellen (z.B. Verfahren der Kavitation / Ultraschall)</li> <li>- Verformung, Destabilisierung und Perforierung der Zellmembranen (z.B. Verfahren der elektrokinetischen Desintegration)</li> <li>- Zerkleinerung von Zusammenballungen (z.B. Aggregate, Kolloide: tote organische Materie, Bakterien), Auflösung von Zellverbänden (z. B. Verfahren der elektrokinetischen Desintegration)</li> </ul> |
| Zellinhaltsstoffe | <ul style="list-style-type: none"> <li>- bessere Herauslösung von Monomeren (wasserlösliche Bestandteile) aus dem Stoffverbund</li> <li>- Zerkleinerung von Makromolekülen, Aufschluss von Zellflocken und langkettigen Molekülen (z.B. Verfahren der Kavitation / Ultraschall)</li> <li>- Freisetzung von gelösten organischen Zellinhaltsstoffen, Freisetzung aktiver Zellinhaltsstoffe, Freisetzung von Enzymen aus geschädigter Zellwand: Amylasen, Xylasen, Pektinasen, Hemizellulasen; Aktivierung von Enzymen und Nährstoffen / Spurenelementen</li> <li>- Enzyme der Zellen gelangen schneller in den Prozess der Hydrolyse</li> </ul>  |
| Mikroorganismen   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bakterien werden „elektrostatisch“ stimuliert, Stimulierung aktiver Mikroorganismen: verstärkte Freisetzung von Exoenzymen (z.B. Verfahren der Kavitation / Ultraschall)</li> <li>- bei Aufschluss von Bakterienzellen: Freisetzung von Endoenzymen und intrazellulärer organischer Komponenten (z.B. Verfahren der Kavitation / Ultraschall)</li> </ul>   |
| Biogasprozess     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Unterstützung oder Realisierung der Hydrolyse</li> <li>- Verbesserung der Prozessstabilität</li> </ul>   |

|  |  |
|--|--|
| Durchmischungsprozess im Reaktor, Verbesserung des Mischverhaltens | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verringerung der Viskosität (d.h. Verbesserung der Fließfähigkeit)</li> <li>- Verbesserung der Rührfähigkeit, reduzierte Rührzeiten, Senkung der Energieeinträge über Rührwerke</li> <li>- Verbesserung des Saugvermögens (d.h. Verbesserung des Anmischens trockener Substrate)</li> <li>- Verbesserung der Homogenisierbarkeit</li> <li>- Verbesserung des Stofftransportes (d.h. Verbesserung der Förderung und Pumpfähigkeit des Substrates)</li> <li>- Vermeidung von Schwimmschichten und Totzonen (d.h. Vergrößerung des nutzbaren Reaktionsraumes)</li> </ul> |
| Verweilzeit  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verringerung der Verweilzeit durch bessere Ausnutzung des Reaktorraumes</li> <li>- schnellerer Abbau der Biomasse (d.h. bessere Gärsubstratumsetzung)</li> <li>- höhere Raumbelastung (d.h. Faulraumeffizienz)</li> </ul>   |
| Substratmengen   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- reduzierte Fütterungszeiten</li> <li>- reduzierte Substratmengen</li> <li>- Einsparung von Substratkosten</li> </ul>  |
| Gärrest  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- geringeres Restgaspotenzial</li> <li>- geringere Trockensubstanzgehalte</li> <li>- Reduktion des organischen Restgehaltes</li> <li>- Schlammreduktion (d.h. Einsparung von Transport- und Entsorgungskosten)</li> <li>- bessere Entwässerbarkeit (z.B. des Klärschlammes, ggf. Gärrestes)</li> <li>- hohes Saug- und Wasserbindevermögen des aufbereiteten Gutes</li> </ul>   |
| Biogasertrag / Methangehalt  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- höhere Biogaserträge (d.h. „quantitative Erhöhung“)</li> <li>- Effekt einer Erhöhung des Methangehaltes ist strittig (d.h. „qualitative Erhöhung des Biogasertrages“)</li> </ul>  |
| Hygienisierung   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- kann bei thermischer Desintegration gewährleistet sein</li> </ul>   |
| Betriebskosten   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vermeidung von Betriebsstörungen</li> <li>- Reduzierung des Verschleißes verursacht durch Störstoffe</li> <li>- Senkung des Eigenenergieverbrauchs der Biogasanlage</li> </ul>  |

---

Einer der am häufigsten genannten positiven Effekte durch eine Vorbehandlung ist die Verringerung der Schwimmschichtbildung und eine Verbesserung der Rührfähigkeit. Allerdings äußert zum Beispiel MÖNCH-TEGEDER [2014] die Vermutung, dass das zerkleinerte Substrat stattdessen zur Sedimentation neigt und sich Ablagerungen am Boden bilden können. Insbesondere bei nachgerüsteten Anlagen zur Desintegration erscheint deshalb die Überprüfung und Anpassung der Rührstrategie in der Biogasanlage als zwingend erforderlich.

Ein weiterer, in der Aufzählung nicht aufgeführter Effekt, ist die Verringerung des Wärmebedarfs zur Beheizung des Fermenters. Als mögliche Gründe dafür werden die Erwärmung der Substrate durch die Vorbehandlung und ein höheres Maß an Reaktionswärme aufgrund der gesteigerten Aktivität der Mikroorganismen genannt. [CLIMENT ET AL. 2007, MÖNCH-TEGEDER 2014]

## 2.2 Übersicht der Verfahren zur Vorbehandlung

Es werden viele verschiedene Verfahren und Technologien zur Vorbehandlung von lignocellulosehaltigen Substraten mit dem Ziel der Biogasgewinnung am Markt angeboten. Diese reichen von der mechanischen Zerkleinerung über einen thermochemischen oder biologischen Aufschluss bis hin zu Verfahren, bei denen das Substrat elektrischen Spannungen oder Ultraschall ausgesetzt wird. Dabei haben all diese Technologien und Verfahren zur Vorbehandlung gemeinsam, dass sie aus anderen Industriebereichen für den Einsatz an Biogasanlagen adaptiert wurden. In der Übersicht in Abbildung 2-2 sind die bekannten Verfahren für die Vorbehandlung von lignocellulosehaltigen Substraten zusammengetragen. Sie sind dabei nach dem Wirkmechanismus in physikalische, chemische und biologische Verfahren gegliedert.

Die größte Verfahrensvielfalt bietet zurzeit die mechanische Zerkleinerung, weshalb diese auch den Stand der Technik im Bereich der Substratvorbehandlung darstellt [SCHEFTELOWITZ ET AL. 2013]. Zudem findet bei zahlreichen weiteren Verfahren in der Regel als vorgelegter Schritt die mechanische Zerkleinerung Verwendung. Aufgrund der Vielzahl an konstruktiv unterschiedlich gestalteten mechanischen Zerkleinerungsanlagen, sind diese in Abbildung 2-2 in Mühlen, Extruder und Zerkleinerer mit rotierenden Messern weiter unterteilt.

Wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist dabei unter anderem die Vorbehandlung von Feststoffen und pumpfähigem Material. Durch diese zwei unterschiedlichen Ansätze zur Vorbehandlung wird auch die Wahl des Einsatzortes der jeweiligen Technologie eingeschränkt bzw. festgelegt. Mit Schneid- und Prallmühlen sowie Extrudern werden feste Substrate, wie z.B. Silagen oder Mist zerkleinert. Diese sind häufig zwischen Feststoffdosierer und der Technik für die Einbringung in den Fermenter gebaut. Dagegen können von den Nasszerkleinerern, zu denen vor allem Zerkleinerer mit rotierenden Messern und Kugelmühlen gezählt werden, ausschließlich pumpfähige Materialien nach der Anmischung bzw. als Rezirkulat aufgeschlossen werden. Dementsprechend stellen Nasszerkleinerer bei fehlender Pumpfähigkeit durch sehr hohe Faseranteile im Substratmix keine Lösung dar.

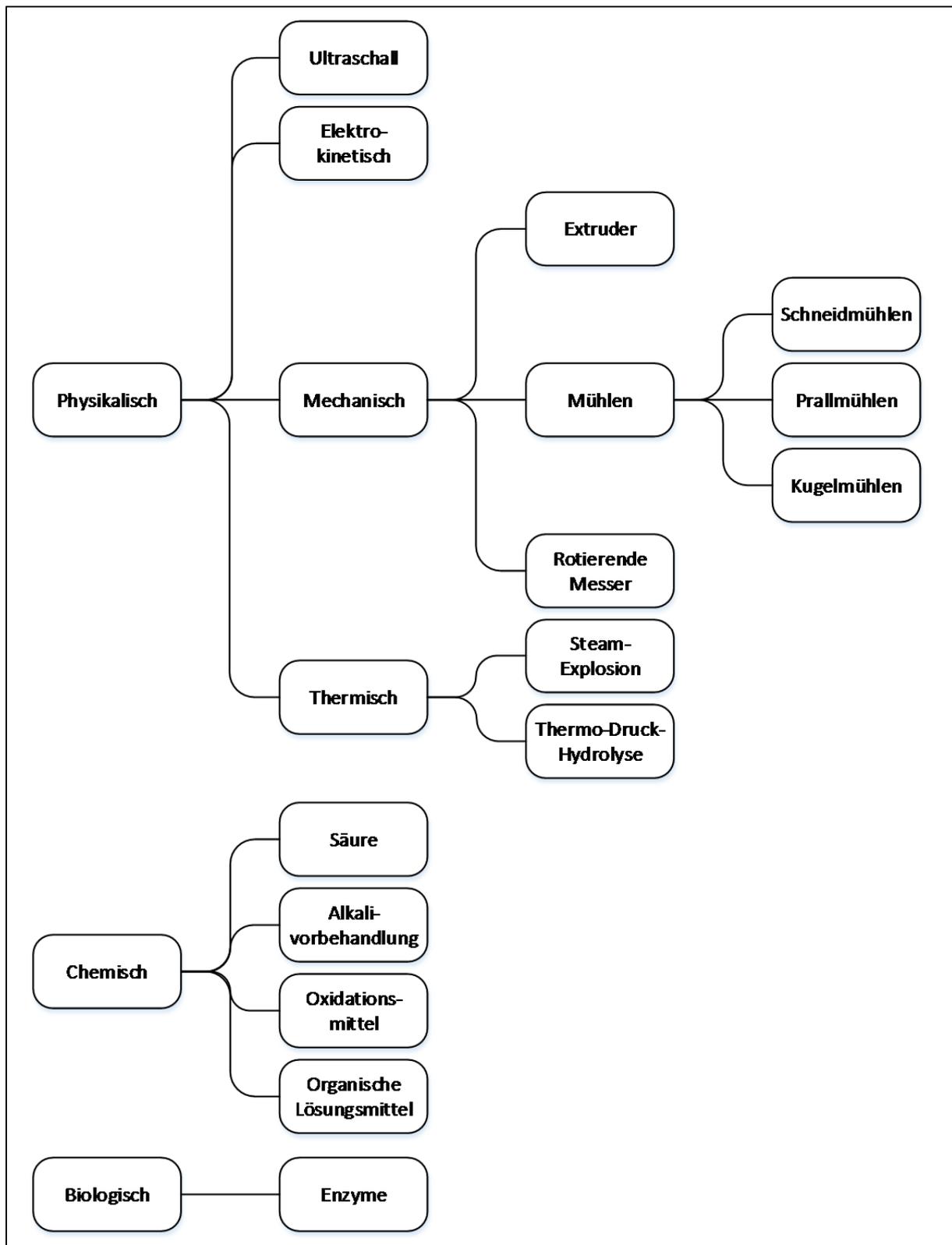


Abbildung 2-2: Übersicht von Techniken zur Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Substrate [nach SCHUMACHER ET AL. 2012]

Neben der mechanischen Zerkleinerung bieten thermische, chemische oder kombinierte Verfahren weitere Optionen zum Aufschluss lignocellulosehaltiger Substrate. Dazu zählen die Steam explosion und Thermodruckhydrolyse sowie die Vorbehandlung mit Säuren, alkali-

schen Lösungen, Oxidationsmitteln und organischen Lösungsmitteln. Erste Verfahren für einen kombinierten thermochemischen Aufschluss sind für die Produktion von Bioethanol aus Lignocellulose entwickelt worden [KALTSCHMITT ET AL. 2009, TAHERZADEH UND KARIMI 2008]. Diese sind bisher jedoch über den Status als Pilot- und Demonstrationsanlagen noch nicht hinaus gekommen. Auch für die Biogasgewinnung wurden bereits Untersuchungen mit den Verfahren Steam explosion und Thermodruckhydrolyse durchgeführt. Dabei wurden zum Beispiel von SCHUMACHER ET AL. [2007] mit Hilfe der Steam explosion und Ertragssteigerungen von bis zu 34 % vielversprechende Ergebnisse ermittelt. Allerdings haben all diese Verfahren den Nachteil, dass sie, nicht nur durch die vorgeschaltete mechanische Zerkleinerung, einen hohen verfahrenstechnischen und energetischen Aufwand bedeuten, der durch einen entsprechenden Mehrertrag gedeckt werden muss. Wenn jedoch eine Minimierung des Aufwandes gelingt, sprechen beispielsweise SCHWARZ und SCHUMACHER ET AL. der thermischen Behandlung das größte praktische Zukunftspotenzial zu [SCHWARZ 2011, SCHUMACHER ET AL. 2014]. Bis dahin jedoch bietet derzeit nur die mechanische Desintegration eine effektive Aufbereitung faserreicher Substrate [LINDMARK ET AL. 2012, OECHSNER ET AL. 2014, SCHUMACHER ET AL. 2014].

Weitere Verfahren sind der Zusatz von Enzymen zur Steigerung der Effizienz der Hydrolysephase und die Behandlung von pumpfähigem Material mit Ultraschall oder elektrischen Spannungen, bei denen die Zellmembranen zerstört werden. Aerobe Vorbehandlungsverfahren, bei denen zum Beispiel die feste Fraktion des Gärrestes mit Pilzen versetzt oder kompostiert und dann in die Biogasanlage zurückgeführt wird, werden nicht betrachtet [SCHOBER UND TRÖSCH 2000]. Nachteile einer aeroben enzymatischen Behandlung sind die hohen Verluste an organischer Trockensubstanz, weshalb diese nur bei Gärresten mit einem hohen Ligningehalt sinnvoll ist [Lindner et al. 2015, Lindner 2016].

In den folgenden Kapiteln werden die Vorbehandlungsverfahren in mechanische, thermochemische und weitere unterteilt eingehender betrachtet. Die thermischen und chemischen Verfahren sind zusammengefasst, da sie von Prinzip und Ablauf her vergleichbar sind.

### **2.3 Mechanische Vorbehandlungsverfahren**

In diesem Kapitel werden Aufbau und Funktionsweise der mechanischen Vorbehandlungsverfahren betrachtet. Dazu wurden diese in die vier Gruppen Schneidmühlen, Prallmühlen, Extruder und Nasszerkleinerer unterteilt. Während mit den Techniken aus den ersten drei Gruppen vor allem Feststoffe zerkleinert werden, fallen unter die Bezeichnung Nasszerkleine-

rer alle Zerkleinerungstechniken, mit denen pumpfähige Substrate aufgeschlossen werden. Dazu zählen vor allem Kugelmühlen und Zerkleinerer mit rotierenden Messern. Wesentliche Effekte der mechanischen Vorbehandlung sind eine Verringerung der Partikelgröße, die Vergrößerung der Oberfläche und eine Verbesserung der Löslichkeit der organischen Bestandteile [BOUGRIER ET AL. 2006, CARLSSON ET AL. 2012, CLIMENT ET AL. 2007].

### 2.3.1 Schneidmühlen

Schneidmühlen zerkleinern das Mahlgut durch Scherwirkung zwischen einem rotierendem Messer (Rotor) und einer feststehenden Gegenschneide (Stator). Das Material fällt durch einen Schacht in den Mahlraum, den es nach der Zerkleinerung durch ein Sieb wieder verlässt. Der Feinheitsgrad des zerkleinerten Materials wird dabei durch die Maschenweite des Siebes bestimmt. Abbildung 2-3 zeigt den schematischen Aufbau einer Schneidmühle. [HÖFFL 1986, IGNATOWITZ 1997]

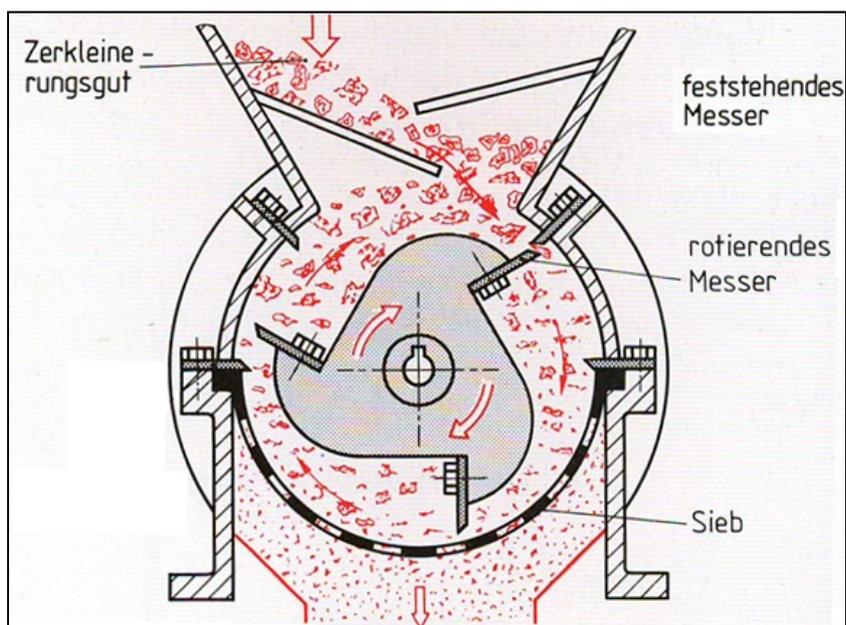


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung einer Schneidmühle [IGNATOWITZ 1997]

Schneidmühlen eignen sich besonders für verholzte Materialien wie zum Beispiel Stroh. Diese lassen sich gut schneiden, während feuchte und elastische Substrate, beispielsweise Grassilage, durch die Zwangsführung zu Verstopfungen neigen. Zudem sind Schneidmühlen empfindlich gegenüber Störstoffen wie zum Beispiel Steinen. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Fasern nur geschnitten bzw. abgelängt werden. Es kommt weniger zu einem Aufschluss des Lignocelluloseverbundes. In der Praxis werden Schneidmühlen bei der Zerkleinerung von Biomasse für Stroh, Holz und Lebensmittelabfälle eingesetzt. [HÖFFL 1986, RUMPF 1975]

### 2.3.2 Prallmühlen

Das Prinzip der mechanischen Zerkleinerung durch Prall beruht auf der mehrfachen Prallbeanspruchung eines Stoffes bei hohen Umdrehungszahlen, wodurch das Material an den natürlichen Bruchkanten bricht. Die mehrfache Prallbeanspruchung resultiert aus dem Aufprallen auf die Prallorgane des Rotors, auf Flächen im Mahlraum und aus dem gegenseitigen aufeinanderprallen der Partikel. In der Recyclingtechnik wird dieser Effekt bei der Aufbereitung und Trennung von Verbundwerkstoffen häufig genutzt. Ein weiterer Effekt besteht darin, dass die Stoffe regelrecht auseinander gerissen werden, wodurch vor allem lignocellulosereiche Materialien an den Bruchenden zerfasern. Gegenüber der Zerkleinerung durch Schnitt weist das Mahlgut daher bei gleicher Feinheit eine größere Oberfläche auf. [HÖFFL 1986, RUMPF 1975]

Zentrales Bauteil einer Prallmühle ist der mit hoher Geschwindigkeit drehende Rotor. Dieser kann vertikal oder horizontal eingebaut werden und an ihm können in unterschiedlicher Anzahl Leisten, Platten, Hämmer, Stifte oder Ketten als Prallorgane angebracht sein. Neben dem Rotor kann auch der Mahlraum durch Einbauten oder über die Geometrie verschieden konstruiert werden. Je nach Materialeigenschaften und gewünschter Feinheit wird das zerkleinerte Gut über Siebe oder eine periodisch öffnende Auswurfklappe ausgeschleust. Aufgrund dieser zahlreichen Varianten werden Prallmühlen unterschiedlichster konstruktiver Gestaltung für verschiedene Mahlgüter angeboten. In Abbildung 2-4 ist eine Prallmühle schematisch dargestellt. [PAHL ET AL. 1993, RUMPF 1975]

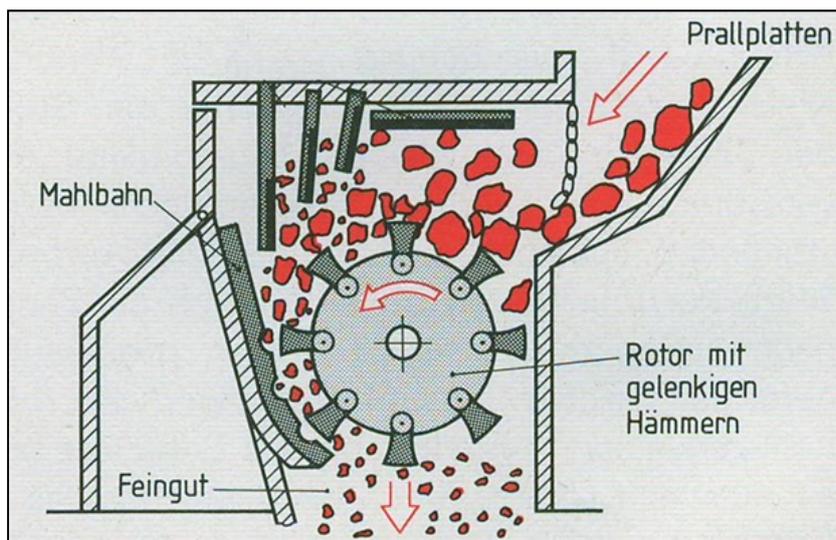


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung einer Prallmühle [IGNATOWITZ 1997]

In Prallmühlen können auch nasse Stoffe aufgeschlossen werden. Bei einigen Anlagen besteht sogar die Möglichkeit, gasförmige oder flüssige Medien direkt in den Prallraum einzubringen.

Dadurch kann die Zerkleinerung hinsichtlich Aufschlussgrad, Energieverbrauch und Sicherheit verbessert werden. Nachteilig sind ein höherer Verschleiß der Prallorgane und die Verunreinigung bzw. Verdünnung des Mahlguts. [PAHL ET AL. 1993]

Durch die häufig massive Bauweise der Prallmühlen, sind diese gegenüber Störstoffen vergleichsweise unempfindlich. So werden zum Beispiel Steine als Fremdkörper einfach mit zermahlen. Trotzdem sollte aus Verschleißgründen darauf geachtet werden, möglichst wenige Störstoffe einzutragen. [WEBER 2012]

Mit den Prallmühlen werden vor allem Feststoffe vorbehandelt, wodurch auch der Standort nach dem Feststoffdosierer festgelegt ist. Die Zuführung wird dabei über Förderbänder oder Förderschnecken realisiert. In Abhängigkeit von der Betriebsweise, wird beim kontinuierlichen Betrieb die Substratzuführung über die Stromaufnahme der Prallmühle gesteuert oder beim Batchbetrieb über die eingestellte Masse einer Charge. Das zerkleinerte Material wird dann entweder über eine Stopfschnecke direkt in den Fermenter oder in die Anmischeinheit gefördert.

Im Folgenden werden verschiedene mechanische Zerkleinerungsmaschinen, die für die Vorbehandlung von festen Substraten zur Biogasproduktion angeboten werden, vorgestellt. Diese unterscheiden sich von der konstruktiven Gestaltung zum Teil deutlich, zählen jedoch alle zur Gruppe der Prallmühlen. Darunter fallen unter anderem die Ausprägungen als Prallzerkleinerer, Querstromzerspaner und Hammermühlen. Ebenfalls kann der in dieser Arbeit verwendete Prallreaktor der Fa. Schäfer Elektrotechnik und Sondermaschinen GmbH dieser Gruppe zugeordnet werden. Dieser wird später in Kapitel 4.1 detailliert beschrieben. Der Prallreaktor wird in abgeänderter Form auch von der BTS Biogas GmbH unter dem Namen „BIOaccelerator“ angeboten. Dieser hat eine elektrische Leistung  $90 \text{ kW}_{el}$  und wird bei einer Drehzahl von  $1.480 \text{ U/min}$  betrieben. Der Durchsatz liegt in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt bei 4 bis  $9 \text{ t/h}$  und die Wartungskosten werden mit  $0,50 \text{ €/t}$  angegeben. [BTS BIOGAS O.J.a] In Tabelle 2-2 sind die Prallmühlen zur Vorbehandlung fester Substrate aufgeführt, die im Verlauf des Kapitels vorgestellt werden. Zusätzlich wurden für eine erste Einordnung der Prallmühlen die drei Unterscheidungskriterien Betriebsweise, Aufhängung des Werkzeuges und ob mit einer Gegenschneide gearbeitet wird angegeben.

Tabelle 2-2: Prallmühlen zur Vorbehandlung fester Substrate

| <b>Prallmühle</b>  | <b>Betriebsweise</b> | <b>Aufhängung<br/>Werkzeuge</b> | <b>Gegen-<br/>schneide</b> |
|--|----------------------|---------------------------------|----------------------------|
| „Prallreaktor“ von der Fa. Schäfer Elektrotechnik und Sondermaschinen GmbH | Durchfluss / Batch   | Starr                           | Ohne                       |
| „Rotacrex“ von der Fa. Bomatic Umwelt- und Verfahrenstechnik GmbH          | Durchfluss           | Beweglich                       | Mit / Ohne                 |
| „Limator“ von der Fa. Lindner-Recyclingtechnik GmbH                        | Durchfluss           | Beweglich                       | Ohne                       |
| Querstromzerspaner „Bio-QZ“ von der Fa. Andritz MeWa GmbH                  | Batch                | Beweglich                       | Ohne                       |
| Querstromzerspaner „X-chopper“ von der Fa. Xergi A/S                       | Batch                | Beweglich                       | Ohne                       |
| „Prallzerkleinerer HPZ“ von der Fa. Huning Maschinenbau GmbH               | Durchfluss           | Starr und Beweglich             | Ohne                       |
| „Biocutter“ von der Fa. Huning Maschinenbau GmbH                           | Durchfluss           | Beweglich                       | Ohne                       |
| „Biogrinder“ von der Fa. BHS-Sonthofen GmbH                                | Durchfluss           | Beweglich                       | Mit                        |
| „Optimatic Hammermühle“ von der Fa. Huning Maschinenbau GmbH               | Durchfluss           | Beweglich                       | Mit / Ohne                 |
| Mobile Hammermühle „AK 510 BioPower“ von der Fa. Doppstadt Calbe GmbH      | Durchfluss           | Beweglich                       | Ohne                       |

### **Bomatic Rotacrex**

Der Prallzerkleinerer „Rotacrex“ von der Fa. Bomatic wird auch als „PlanET Rotacrex“ von der Fa. PlanET Biogastechnik GmbH vertrieben. Und der „BIO accelerator“ von der Fa. BTS Biogas GmbH weist ebenfalls eine sehr große Ähnlichkeit zum Rotacrex auf.

Beim Rotacrex fällt das zu zerkleinernde Material von oben in den runden Prallraum, an dessen Boden sich der Rotor mit den Schlagwerkzeugen bei hoher Geschwindigkeit dreht. Die beiden Prallplatten sind beweglich gelagert, um bei Störstoffen zurückschwenken zu können. Auf zwei Ebenen darüber befinden sich jeweils vier kleinere Prallwerkzeuge, die wie Reißzähne geformt sind. Diese sind ebenfalls beweglich montiert und sollen den Gutstrom gleichmässigen und vorzerkleinern. Das zerkleinerte Material verlässt dann über eine variable Austragsöffnung die Maschine. Dabei wird über einen hydraulischen Schieber die Höhe des Spalts der Austragsöffnung eingestellt. Je kleiner die Öffnung, desto länger verbleibt das

Material in der Maschine und wird feiner zerkleinert. Allerdings nehmen dann Stromverbrauch sowie Verschleiß zu und der Durchsatz verringert sich. Betrieben wird die Maschine kontinuierlich, prinzipiell ist jedoch auch ein Chargenbetrieb möglich. Je nach Durchmesser des Prallraums (750, 1.200 und 1.600 mm) liegt die elektrische Antriebsleistung zwischen 30 und 200 kW<sub>el</sub>, die Drehzahl des Rotors zwischen 1.200 und 900 U/min und der Durchsatz zwischen 1 und 20 t/h. [BOMATIC O.J.]

Eine Besonderheit bzw. Weiterentwicklung der Anlage von PlanET, siehe Abbildung 2-5, sind eine Umluftführung und gezackte Bleche auf dem Rotor. Die gezackten Bleche sollen im Mist enthaltene Strohblätter abscheiden, indem diese an den Zacken hängen bleiben und sich um die Bleche wickeln. Ohne diese Abscheidung führten die Strohblätter zu Problemen bei der Zerkleinerung und bei den nachgelagerten Fördereinrichtungen. Bei der Umluftführung verbindet ein Rohr den Raum hinter der Auswurföffnung mit dem Einwurfschacht, wodurch der Luftstrom zirkulieren kann. Zudem sind die Verschleißplatten von außen verschraubt, wodurch die Schraubverbindungen nicht mit dem Substrat in Kontakt kommen.



Abbildung 2-5: Rotacrex von PlanET

Der von PlanET modifizierte Rotacrex wird mit einer Drehzahl von 1.100 U/min betrieben. Er wird in zwei Leistungsklassen mit 55 und 75 kW<sub>el</sub> installierter elektrischer Leistung angebo-

ten und hat einen Stromverbrauch von ca. 11 – 13 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub>. Nach etwa 2.000 t Substrat werden die Prallplatten gewechselt. [NEUMANN 2015b]

Demgegenüber wird der BIOaccelerator<sup>z</sup> von BTS Biogas mit einer elektrischen Leistung von 75 und 90 kW<sub>el</sub> angeboten. Der Durchsatz wird mit 4 – 9 t/h angegeben und die Drehzahl beträgt ebenfalls 1.100 U/min. Für die Wartungskosten werden in Abhängigkeit der zerkleinerten Substratmenge 1,00 €/t veranschlagt. [BTS BIOGAS O.J.a, BTS BIOGAS O.J.b]

### **Lindner Limator**

Der „Limator“ der Fa. Lindner ist dem Rotacrex sehr ähnlich aufgebaut und von der Funktionsweise identisch. Auch bei ihm ist der Prallraum rund und als Prallelemente sind am Rotor zwei drehend gelagerte Prallplatten befestigt. Über den Prallplatten befinden sich ebenfalls jeweils vier zweireihig angeordnete sogenannte „Multitools“ für grobes Vorbrechen. Der Prallraum hat einen Durchmesser von 1.200 mm und die Drehzahl kann zwischen 600 und 1.000 U/min eingestellt werden. Als Antrieb werden zwei Motorvarianten mit 75 oder 90 kW<sub>el</sub> elektrischer Leistung angeboten. Die Höhe der Austragsöffnung wird über einen elektrisch betriebenen Schieber stufenlos eingestellt. Abhängig von Substrat, Trockensubstanzgehalt und Betriebsweise kann ein Durchsatz von 3 bis 20 t<sub>FM</sub>/h erzielt werden. [LINDNER O.J., MEDER 2014]

Beim Probetrieb des Limators an einer Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW<sub>el</sub> wurde Rinder- und Geflügelmist im Nebenstrom zerkleinert. Die Versuchsanlage hatte eine elektrische Antriebsleistung von 90 kW<sub>el</sub> und erreichte einen Durchsatz zwischen 15 und 18 t<sub>FM</sub>/h. Als Stromverbrauch wurden etwa 10 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> Substrat angegeben. Der Betreiber der Biogasanlage berichtete von kürzeren Rührzeiten in der Biogasanlage, vor allem im vorgeschalteten Hydrolysebehälter. Zudem ist die eingespeiste Strommenge bei gleichbleibendem Substrateinsatz um bis zu 7 % gestiegen, wodurch der Substrateinsatz verringert werden konnte. Für eine entsprechende Zerkleinerungsanlage ist mit Investitionskosten von etwa 100.000 € für den Limator und ca. 25.000 € für die Einbindung zu rechnen. Die jährlichen Verschleißkosten werden mit etwa 1.000 €/a veranschlagt. In Abbildung 2-6 ist der Limator unter anderem mit Blick in den Innenraum abgebildet. [SCHUBERT 2014]



Abbildung 2-6: Limator der Fa. Lindner [LINDNER O.J.]

### Querstromzerspaner

Eine besondere Form der Prallzerkleinerer stellt der Querstromzerspaner dar. Dieser zerfasert mit zwei am Rotor befestigten Ketten als Prallorgane die Biomasse. Es gibt eine ganze Reihe von Herstellern für Querstromzerspaner aus der Recyclingtechnik, die diese jedoch nicht explizit für den Einsatz zur Zerkleinerung von Biomasse für die Vergärung bewerben. Daher werden im Folgenden die Querstromzerspaner BIO-QZ der Fa. Andritz MeWa und der X-chopper von der Fa. Xergi betrachtet.

Beide Querstromzerspaner haben einen runden Prallraum, mit  $55 \text{ kW}_{el}$  die gleiche elektrische Antriebsleistung und außer den Ketten keine zusätzlichen Einbauten. Die Prallketten beim BIO-QZ bestehen aus jeweils drei einfachen Kettengliedern, an dessen äußersten Kettenglied zusätzlich eine Stahlplatte angeschweißt ist. Demgegenüber bestehen die Ketten beim X-Chopper aus zwei Gliedern. Das äußere ist eine Stahlplatte mit Augenring und das innere besteht aus zwei Haken, mit denen es als Verbindungsglied zum Rotor dient. Der Durchsatz beim BIO-QZ wird mit 5 bis  $20 \text{ t}_{FM}/\text{h}$  und der Stromverbrauch mit 3 bis  $11 \text{ kWh}_{el}/\text{t}$  in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt angegeben. Für den X-chopper werden eine etwas engere Bandbreite von 6 bis  $9 \text{ t}_{FM}/\text{h}$  beim Durchsatz und von 7 bis  $10 \text{ kWh}_{el}/\text{t}$  beim Stromverbrauch angegeben. Die Haltedauer der Prallketten wird mit 250 bis 1.000 t veranschlagt und beim BIO-QZ wird mit 10 bis 25 Cent/ $\text{t}_{FM}$  an Verschleißkosten kalkuliert. In Abbildung 2-7 ist der Innenraum des BIO-QZ von MeWa und des X-Choppers von Xergi zu sehen. [NEUMANN 2012, XERGI O.J.]



Abbildung 2-7: Querstromzerspaner der Fa. MeWa (links) und der Fa. Xergi (rechts) [XERGI 2015]

Bei den Untersuchungen zur Zerkleinerung von Pferdemist mit dem Querstromzerspaner BIO-QZ an der Universität Hohenheim ermittelte MÖNCH-TEGEDER die optimale Aufbereitungszeit im Chargenbetrieb mit 15 Sekunden. Dabei schwankte der spezifische Stromverbrauch in Abhängigkeit von Substrat und Aufbereitungszeit zwischen 10,7 und 20,5 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> Substrat. Zudem konnte die Methanausbeute beim Pferdemist durch die Zerkleinerung um etwa 10 % gesteigert werden. [MÖNCH-TEGEDER 2014]

### Huning Prallzerkleinerer HPZ

Wie bereits bei der Beschreibung der konstruktiven Gestaltung des Rotacrex und des Limator gezeigt, können die Prallelemente auch auf mehreren Ebenen übereinander angeordnet werden. So bietet zum Beispiel die Fa. Huning den Prallzerkleinerer HPZ mit starren Schlägern oder Ketten auf mehreren Ebenen an. Dabei können auf jeder Ebene zwei oder vier Prallorgane angebaut werden. Die Besonderheit dieser Maschinen besteht in dem optionalen Zwischenboden, wodurch sich eine zweistufige Zerkleinerung ergibt. Abbildung 2-8 zeigt die Prallräume der Prallzerkleinerer HPZ 1200 und HPZ 900.



Abbildung 2-8: Prallzerkleinerer HPZ 1200 (links) und HPZ 900 (rechts) der Fa. Huning [HUNING O.J.a]

Beide Maschinen sind mit starren Prallelementen auf mehreren Ebenen und mit einem Zwischenboden ausgestattet. Der im linken Bild abgebildete Prallzerkleinerer HPZ 1200 hat im unteren Teil zwei Prallplatten und im oberen Teil auf zwei Ebenen jeweils vier Schlagelemente. Demgegenüber zerkleinert der im rechten Bild dargestellte Prallzerkleinerer HPZ 900 das Material mit starren Schlägern auf insgesamt vier Ebenen und jeweils vier Schlägern pro Ebene. Die Anlagen werden mit Antriebsleistungen zwischen 75 und 110 kW<sub>el</sub> angeboten. [HUNING O.J.a]

### **Huning Biocutter**

Eine weitere Konfiguration stellt der Biocutter der Fa. Huning dar. Dieser zerkleinert die Biomasse durch vertikal rotierende Messer auf mehreren Ebenen. Die Besonderheit dieser Anlage ist die Zwangsführung der Substrate durch das Zerkleinerungsaggregat. Dabei wird das Substrat mit einer Förderschnecke von der Seite in den Biocutter gedrückt und nach der Zerkleinerung seitlich wieder auf eine Spirale ausgetragen. Der Biocutter wird mit Antriebsleistungen zwischen 22 und 75 kW<sub>el</sub> angeboten. Die 84 Schneidmesser sind zum Schutz vor Störstoffen pendelnd gelagert. Optional kann die Maschine mit federnd gelagerten Gegen-schneiden aufgerüstet werden. Der spezifische Stromverbrauch beträgt 18 bis 20 kWh<sub>el</sub>/t und der Durchsatz liegt in Abhängigkeit vom Substrat zwischen 6 und 8 t/h. Die Standzeit der Messer wird mit ca. 800 Betriebsstunden angegeben. [HUNING 2011, NEUMANN 2012]

### **BHS Sonthofen Biogrinder**

Beim Biogrinder der Fa. BHS Sonthofen besteht der vertikale sternförmige Rotor aus einer oder zwei Ebenen mit je bis zu sechs drehbar gelagerten starren Schlägern als Zerkleinerungswerkzeug sowie zwei Einweiserflügel zur Ablenkung des Materials in den Bereich der Schläger. Das Material wird im kontinuierlichen Betrieb mittig von oben zugeführt, zwischen den Prallelementen und den festen Statorleisten am Gehäuse zerkleinert und verlässt den Prallraum über eine Öffnung im Boden. Der Biogrinder wird in zwei Größen mit einem Rotordurchmesser von 780 und 1.000 mm angeboten. Als Antriebsleistungen stehen 37 und 45 kW<sub>el</sub> für die kleinere sowie 55 und 75 kW<sub>el</sub> für die größere Maschine zur Auswahl. Durch einen Frequenzumrichter können verschiedene Drehzahlen eingestellt werden. Der maximale Durchsatz wird mit 4 bis 8 t/h für die kleinere und 6 bis 12 t/h für die größere Anlage angegeben. Die Besonderheiten des Biogrinder gegenüber den anderen Prallmühlen sind der fehlende Freiraum zwischen Rotor und Einlassöffnung sowie der enge Abstand zwischen den Zerkleinerungswerkzeugen und den Statorleisten, wodurch neben Prallkräften auch Scherkräfte auf das zu zerkleinernde Material einwirken. [BHS-SONTHOFEN 2014a] Dabei wurden in von

der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) wissenschaftlich begleiteten Untersuchungen bei der Zerkleinerung von Roggen-Ganzpflanzensilage mit dem Biogrinder wurde eine Steigerung von 30 % beim Methanertrag von 318,0 auf 456,5 l<sub>N</sub>/kg<sub>oTS</sub> erzielt [WEBER 2012]. Abbildung 2-9 zeigt den Biogrinder mit geöffnetem Deckel und Sicht in den Prallraum.



Abbildung 2-9: Biogrinder der Fa. BHS Sonthofen [BHS-SONTHOFEN 2014b]

### **Hammermühle**

Ein klassischer und sehr weit verbreiteter Typ einer Prallmühle ist die Hammermühle. Darin dreht sich ein Rotor in der horizontalen Ebene mit pendelnd aufgehängten Hämmern oder Messern. Das Material verbleibt solange im Prallraum, bis es die über ein Sieb am Ausgang eingestellte Partikelgröße erreicht. In der Landwirtschaft wird dieser Mühlentyp bevorzugt für das Mahlen von Getreide und Körnermais verwendet. Für langfaserige Stoffe ist der Einsatz dieses Mühlentyps eher unüblich. Ebenfalls von der Fa. Huning wird eine Hammermühle unter der Bezeichnung Optimatic für die Zerkleinerung von festen Substraten mit einer Antriebsleistung zwischen 22 und 75 kW<sub>el</sub> angeboten. Beim Durchmesser der Mahlkammer kann

zwischen 800 und 1.200 mm gewählt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, einen Stator mit federnd gelagerter Schneide einzubauen. [HUNING O.J.b]

Größere Bedeutung für die Substratvorbehandlung haben nicht stationäre, sondern mobile Hammermühlen, auch Shredder genannt. Diese werden vor allem in der Aufbereitung von Altholz und Bioabfällen eingesetzt und sind potenziell auch für die Zerkleinerung von Biogassubstraten geeignet. Bei der Größe dieser Geräte kommt eine tägliche Substrataufbereitung nicht in Frage, weshalb auf Vorrat für mehrere Tage aufbereitet werden muss. Folge ist jedoch, dass nach der Aufbereitung ein sehr schneller aerober Abbau mit Selbsterwärmung einsetzt. Dies wiederum führt zu Verlusten an leicht abbaubarer organischer Trockensubstanz, die für die Biogasgewinnung nicht mehr zur Verfügung steht. [MÖNCH-TEGEDER 2014] In der Praxis werden Shredder vor allem aufgrund der variablen Einsatzmöglichkeiten sowie der kurzen Behandlungszeit bei großen Mengen eingesetzt. [JENZ 2012, SCHIRMACHER-ROHLEDER 2016, SEGGER-HARBERS 2016, ZEYN O.J.]

Es gibt eine Reihe von Anbietern für mobile Hammermühlen zur Altholz- und Bioabfallaufbereitung. Nachfolgend wird dafür beispielhaft die mobile Hammermühle AK 510 BioPower der Fa. Doppstadt, siehe Abbildung 2-10, vorgestellt. Angetrieben wird die Maschine von einem Dieselmotor mit einer Nennleistung von 375 kW und die Drehzahl des Rotors kann zwischen 850 und 1.000 U/min eingestellt werden. Der Durchmesser der Schlegeltrommel beträgt 1.100 mm und an dem Rotor sind 36 Schlegel angebracht. Die Schlegel sind freischwingend angebracht, einzeln auswechselbar und haben ein Gewicht von jeweils 14,5 kg. Zur Einstellung der Ausgangspartikelgröße können für den Siebkorb Maschenweiten zwischen 30 und 400 mm gewählt werden. Dieser kann in einem Stück getauscht werden und dient gleichzeitig als Prallplatte. Zusätzlich ist noch ein Magnetabscheider integriert. [DOPPSTADT O.J.]



Abbildung 2-10: Mobile Hammermühle AK 510 BioPower der Fa. Doppstadt [DOPPSTADT O.J.]

### 2.3.3 Extruder

Bei der Extrusion werden Stoffe von Schnecken unter Druck durch eine Öffnung gepresst. Extruder werden in vielfältiger Art und Weise vor allem in der Kunststoff- und Lebensmittelindustrie eingesetzt [VAUCK UND MÜLLER 2000]. Die Fa. Lehmann UMT GmbH hat dieses Verfahrensprinzip für die Aufbereitung von biogenen Stoffen unter der Bezeichnung „Bioextrusion“ adaptiert. Bei der Bioextrusion wird feste Biomasse zwischen zwei gegenläufigen Schnecken durch Quetschen und Reiben zerkleinert. Zudem wird das Material durch den Wechsel zwischen hohen Drücken und Temperaturen sowie Entspannungszonen belastet, wodurch ein Aufschluss der Lignocellulose erfolgt. [CAMIRE 1998, HJORTH ET AL. 2011, LEHMANN UND FRIEDRICH 2012]

Bezüglich der Bauform können Extruder in Ein- und Doppelschneckenextruder unterteilt werden. Wobei Doppelschneckenextruder noch einmal in Gleich- und Gegenläufer unterschieden werden können. Für die Bioextrusion werden gegenläufige Doppelschneckenextruder verwendet, weshalb sich die folgenden Ausführungen auf diese Bauform beschränken. [GREIF ET AL. 2004]

Wesentliches Bauteil des Extruders sind die gegenläufigen Schnecken, die schwimmend gelagert das zu zerkleinernde Material durch den Extruder fördern. Die Schnecken sind geometrisch in die drei Abschnitte Eintrag, Verdichtung und Zerfaserung sowie Austrag unterteilt. Der Eintragsabschnitt, der unter dem Einfülltrichter liegt, zieht das zugegebene Material ein und fördert es in den Verdichtungsabschnitt. Dabei wird das Substrat bereits grob zerkleinert. Ab dem Verdichtungsabschnitt wird das Material in C-förmigen Kammern, die durch die Schnecken und das umgebene Gehäuse begrenzt werden, weiter durch den Extruder gefördert. Dabei verengen sich die Schneckengänge, wodurch das Material verdichtet wird. Mit dem ansteigenden Druck erhöht sich auch die Temperatur im Substrat. Zudem ändert sich aufgrund der ineinandergreifenden Schnecken ständig die Größe der Kammern, was eine stetige Änderung des Drucks, der auf das Substrat einwirkt, zur Folge hat. Zum Schluss gelangt das Material in die Austragszone, die die Aufgabe hat, die aufgeschlossene Biomasse durch eine definierte Öffnung zu pressen. An dem Auswurf können optional formgebende Werkzeuge befestigt werden, mit denen das Material kompaktiert werden kann. Bei einer Verstopfung des Extruders wird durch einen Rückwärtslauf der Schnecken überschüssiges Material wieder zurück in Richtung Einzug gefördert, wodurch mit Demontagen verbundene Reinigungen entfallen. Abbildung 2-11 zeigt den geöffneten hinteren Teil der Schnecken des Laborextruders der FH Münster. [GREIF ET AL. 2004, HJORTH ET AL. 2011]



Abbildung 2-11: Blick auf die Schnecken des Laborextruders der FH Münster von der Fa. Lehmann UMT GmbH

Die Schnecken des Bioextruders werden mit jeweils einem Motor angetrieben. Der Bioextruder wird von der Fa. Lehmann in vier Baugrößen mit Antriebsleistungen von zweimal  $22 \text{ kW}_{\text{el}}$  bis zweimal  $55 \text{ kW}_{\text{el}}$  angeboten. In Abhängigkeit von Substrat und Trockensubstanzgehalt sind der mögliche Durchsatz mit bis zu  $9 \text{ t}_{\text{FM}}/\text{h}$  und der Stromverbrauch mit 5 bis  $12 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  angegeben. Durch den Aufschluss mit dem Extruder erwärmt sich das zu zerkleinernde Material und weist am Auslass eine Temperatur von ca.  $50 \text{ °C}$  auf. Bei Versuchen zur Aufbereitung von Stroh mit dem Extruder konnten LEHMANN UND FRIEDRICH [2012] den Methanertrag um 21 % von 441 auf  $535 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTR}}$  steigern. Die Standzeit der Schnecken liegt bei etwa 1.600 Betriebsstunden und die Verschleißkosten werden mit  $1 \text{ €t}_{\text{FM}}$  kalkuliert. Zum Schutz des Extruders vor Störstoffen ist eine vorgelagerte Abscheidung notwendig. [LEHMANN O.J., NEUMANN 2012, RUDOLPH 2013]

Neben der Fa. Lehmann bietet auch die Fa. BTS Biogas GmbH den Extruder unter der Bezeichnung „BIOaccelerator<sup>SM</sup>“ an. Beim Antrieb stehen Leistungen zwischen  $55$  und  $74 \text{ kW}_{\text{el}}$  zur Auswahl und die Schneckendrehzahl beträgt  $86 \text{ U}/\text{min}$ . Der mögliche Durchsatz wird in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt und der Anlagengröße mit 4 bis  $9 \text{ t}/\text{h}$  angegeben. Die Wartungskosten werden mit  $1,50 \text{ €t}$  kalkuliert. [BTS BIOGAS O.J.a]

### 2.3.4 Nasszerkleinerer

Unter der Gruppe Nasszerkleinerern werden alle Zerkleinerungsanlagen für pumpfähige Substrate zusammengefasst. Wie bereits beschrieben, gibt es zwei Ansätze Nasszerkleinerer in einer Biogasanlage einzubinden. Im ersten Ansatz wird der Nasszerkleinerer hinter der Anmischeinheit installiert und zerkleinert die Substratmischung im Pumpstrom auf dem Weg in den Fermenter. Beim zweiten Ansatz wird Substrat aus dem Fermenter oder Nachgärer entnommen, aufgeschlossen und wieder zurückgeführt. [HARTMANN ET AL. 2000] Gegenüber vorgeschalteten Mühlen für Feststoffe kann so der gesamte Substratstrom behandelt werden. Zu den Nasszerkleinerern werden in dieser Arbeit Mazerator, Rotorrechen und Unihacker von Börger, Gorator, Kreis-Dissolver, Röring PlurryMaxx, Tietjen Imprasyn sowie die Kugelmühle gezählt und im Folgenden beschrieben.

#### Mazerator

Ein Mazerator, auch Schneidsieb oder Lochscheiben-Zerkleinerer genannt, besteht aus einer gelochten Siebplatte und einer rotierenden Schneideinheit. Die Schneideinheit ist dabei ein Halter mit zwei bis vier Flügeln, die als Messer dienen. Das Substrat wird durch das Sieb mit den rotierenden Messern gepumpt und dadurch zerkleinert. Die Nasszerkleinerung dient dabei auch zum Schutz vor Verstopfungen der Pumpen und Ventile. Meist ist zudem eine Störstoffabscheidung mittels Schwerkraft integriert. [HAFFNER ET AL. 2010, HARTMANN ET AL. 2000]

Mazeratoren sind auch an Biogasanlagen weit verbreitet und es gibt eine große Zahl von Herstellern. Speziell für Biogasanlagen bieten zum Beispiel die Fa. Vogelsang unter dem Namen RotaCut, die Fa. Börger unter dem Namen Multichopper oder die Fa. Netzsch unter dem Namen M-Ovas Mazeratoren für Biogasanlagen an. Häufig werden diese auch in einer Einheit mit einer Pumpe vertrieben. Zusätzlich gibt es bei den Herstellern die Mazeratoren in unterschiedlichen Ausführungen hinsichtlich der Betriebsparameter. So bietet die Fa. Vogelsang ihren RotaCut für maximale Durchflussmengen von 90 bis 750 m<sup>3</sup>/h an. Dazu stehen Schneidsiebe mit einem verfügbaren Kugeldurchgang zwischen 4 und 38 mm und Antriebsleistungen von 1,1 bis 15 kW<sub>el</sub>, zur Verfügung. In Abhängigkeit von der Antriebsleistung kann zudem die Drehzahl der rotierenden Schneideinheit zwischen 66 und 330 U/min eingestellt werden. In Abbildung 2-12 ist ein RotaCut der Fa. Vogelsang als Vertreter für einen Mazerator dargestellt. [BÖRGER O.J.a, NETZSCH O.J., VOGELSSANG O.J.a]



Abbildung 2-12: RotaCut der Fa. Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH als Beispiel für einen Mazerator [VOGELANG O.J.a]

### **Ein- und Zweiwellen-Zerkleinerer**

Bei Zweiwellen-Zerkleinerer handelt es sich um rotierende ineinandergreifende Messerscheiben, durch die der Substratstrom gepumpt und dadurch zerkleinert wird. Die Umfangsgeschwindigkeiten sind dabei ebenso wie die Messergestaltung variabel. Beispiele für Zweiwellen-Zerkleinerer sind der Unihacker der Fa. Börger oder der XRipper der Fa. Vogelsang. Bei beiden Maschinen handelt es sich um einen Doppelwellen-Zerkleinerer auf Basis einer Drehkolbenpumpe. Demgegenüber wird bei Einwellen-Zerkleinerern die Substratmischung durch schräg angeordnete Gegenschnitten gepumpt und die enthaltenen Feststoffe durch die rotierenden Messer zerkleinert. Ein Beispiel für einen Einwellen-Zerkleinerer ist der Rotorrechen der Fa. Börger. Die Durchsatzmenge wird je nach Baugröße beim Unihacker mit bis zu 320 m<sup>3</sup>/h und beim Rotorrechen mit bis zu 800 m<sup>3</sup>/h angegeben. In Abbildung 2-13 sind der Unihacker und der Rotorrechen mit Blick in den Innenraum zu sehen. [BÖRGER O.J.b, BÖRGER O.J.c, VOGELANG 2014]

### **Gorator**

Der Gorator besteht aus einem zylindrischen Gehäuse, in dem eine auf einer Welle schräg angeordnete elliptische Scheibe rotiert. Dabei ist die Scheibe an den Kanten gezahnt und greift berührungslos in geringem Abstand in die ebenfalls verzahnten Elemente an der Innenseite des Gehäuses. Vier dieser Elemente bilden einen Zylinder, den Stator. Durch die Scher-

spannungen an der Zahngeometrie werden die enthaltenen Feststoffe zerkleinert und das gesamte Substrat durchmischt. Das Element vor dem Auslass, bzw. Druckstutzen, ist zusätzlich mit definierten Öffnungen (Spalten oder Bohrungen) in den Nuten versehen, durch die das zerkleinerte Substrat in die weiterführende Rohrleitung gefördert wird. Gröberes Material verbleibt demnach so lange im Gorator, bis die über die Spaltweite eingestellte Partikelgröße erreicht wurde. Durch die Rotation der Scheibe ist der Gorator wie eine Pumpe in der Lage, das zerkleinerte Substrat weiter zu fördern. Abbildung 2-14 zeigt den Aufbau des Gorators. [HOELSCHERTECHNIC 2016, RUDOLPH 2012]

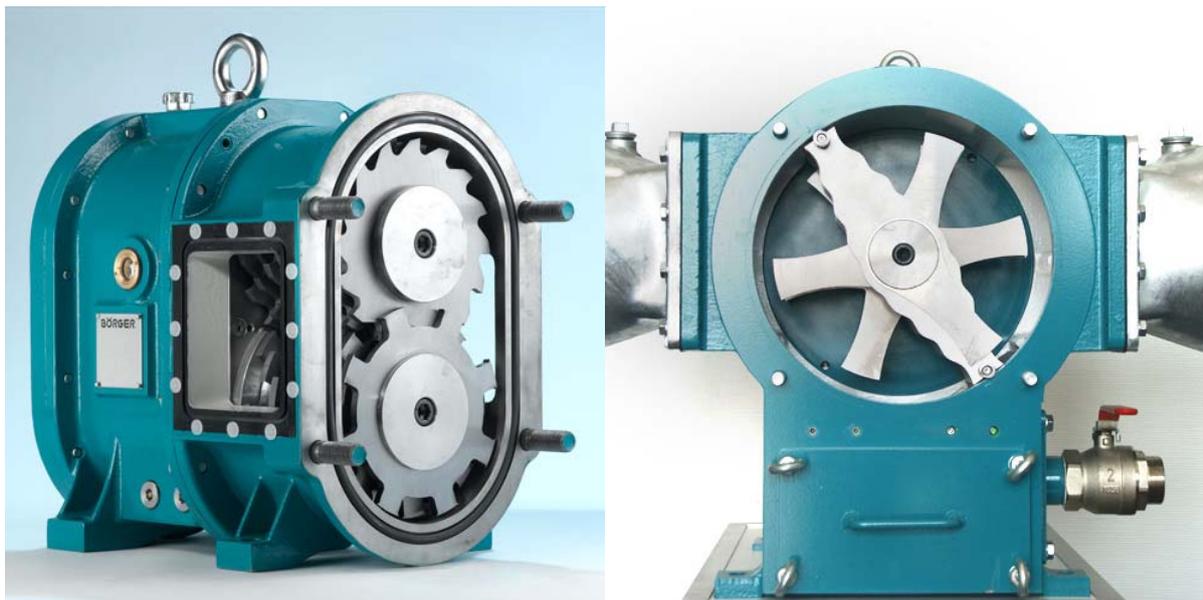


Abbildung 2-13: Unihacker (links) und Rotorrechen (rechts) der Fa. Börger GmbH [BÖRGER O.J.b, BÖRGER O.J.c]

Hergestellt wird der Gorator wird von der Fa. hoelschertechnik-gorator GmbH & Co. KG und über die Fa. PlanET Biogastechnik GmbH für die Anwendung an Biogasanlagen vertrieben. Ursprünglich wird der Gorator in der Chemie- und Papierindustrie eingesetzt. Der von PlanET angebotene Gorator wird mit einer Drehzahl von 1.500 U/min und einem Spalt von 1 mm zwischen Rotor und Stator betrieben. Bei den Öffnungen am Ausgang werden standardmäßig Spalten mit einer Weite von 12 mm verwendet, wobei auch andere Maße möglich sind. Die Antriebsleistung beträgt  $22 \text{ kW}_{el}$  und der Durchsatz beträgt maximal  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ . Der Energiebedarf wird in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt des Substrates mit 3 bis  $6 \text{ kWh}_{el}/\text{t}_{FM}$  angegeben. Ebenfalls Substratabhängig werden die Wartungskosten mit 2.000 bis  $6.000 \text{ €a}$  kalkuliert. Aufgrund der Anfälligkeit gegenüber Störstoffen, wird der Gorator in der Regel an einer Biogasanlage hinter dem Fermenter eingebunden und das zerkleinerte Substrat entweder zurückgeführt oder den Nachgärer gefördert. [BÖYER UND SANDER 2011, HOELSCHERTECHNIC 2016, NEUMANN 2012, RUDOLPH 2012]

### Kreis-Dissolver

Beim Kreis-Dissolver der Fa. Wilhelm Niemann GmbH & Co. handelt es sich um einen Rührbehälter, in dem sich eine sternförmige Messerscheibe mit sechs Zacken schnell dreht. Diese an einer senkrechten Rührwelle angebrachte Messerscheibe dreht mit hohen Drehzahlen und setzt dabei den gesamten Inhalt in Bewegung. Dadurch wird die Substratmischung durchmischt und zerkleinert. Entwickelt wurde der Kreis-Dissolver zum Dispergieren in der Farben-, Lack- und chemischen Industrie. Der Kreis-Dissolver wird auch von der Fa. EnviTec Biogas AG für Biogasanlagen vertrieben und ersetzt den Anmischbehälter. Abbildung 2-14 zeigt den Kreis-Dissolver der Fa. Niemann. Als einziges Verschleißteil sollte die Messerscheibe für ca. 200 € alle zwei bis vier Monate gewechselt werden. Der Stromverbrauch wird bei einem Substratmix aus Mais, Schweinegülle und Rindermist mit  $9,6 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{TS}}$  angegeben. [ENVITEC O.J., NEUMANN 2012]

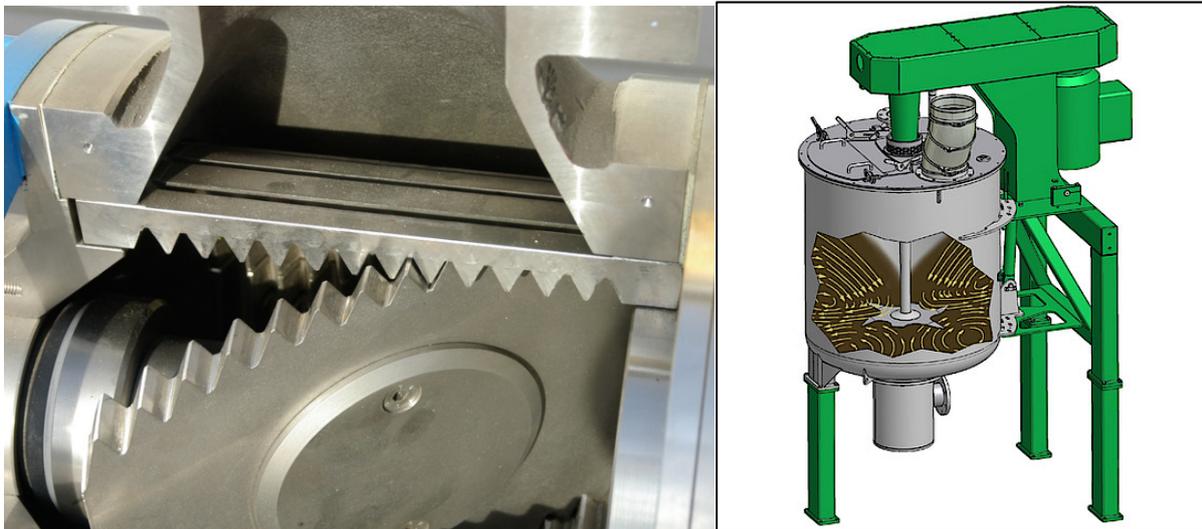


Abbildung 2-14: Gorator der Fa. hoelschertechnik-gorator GmbH & Co. KG (links) [PLANET O.J.] und Kreis-Dissolver der Fa. Wilhelm Niemann GmbH & Co. (rechts) [NIEMANN O.J.]

### Röring PlurryMaxx

Der PlurryMaxx der Fa. Röring besteht aus einem senkrechten Zylinder mit einem Durchmesser von 500 mm und einer Messerwelle mit bis zu drei übereinander angeordneten Messerscheiben. Die Messerscheiben rotieren mit  $3.000 \text{ U/min}$  frei und ohne Gegenschneiden im Zylinder, in dem das Substrat von unten nach oben durch die Anlage strömt. Dabei verspricht der Anbieter auftretende Kavitationseffekte, die den Aufschluss unterstützen. Die Anlage hat eine Antriebsleistung von  $37 \text{ kW}_{\text{el}}$  und wird mit einem Durchsatz von  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  angeboten. [RÖRING O.J.]

## **Tietjen Imprasyn**

Beim Imprasyn der Fa. Tietjen Verfahrenstechnik GmbH handelt es sich um eine Hammermühle mit integrierter Animpfung eines biologischen Additivs. Das biologische Additiv besteht aus Spurenelementen, Enzymen, Pilzen sowie Methanbakterien und wird als flüssiges Konzentrat verwendet. Bei einer installierten Biogasanlagenleistung von  $1 \text{ MW}_{\text{el}}$  wird eine tägliche Additivmenge von 20 l/d zu einem Wert von ca. 80 € benötigt. Die Anlage wird in zwei Baugrößen mit einer Antriebsleistung von 37 und  $75 \text{ kW}_{\text{el}}$  angeboten. Der Durchsatz wird mit 10 bis  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  bzw. 15 bis  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  und der Stromverbrauch mit 2 bis  $4 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$  angegeben. Die Investitionskosten für den Imprasyn liegen bei 80.000 bzw. 170.000 € und die Verschleißkosten werden mit 10 bis  $35 \text{ Ct}/t_{\text{FM}}$  kalkuliert. [JENSEN 2012, NEUMANN 2012, TIETJEN O.J.]

## **Kugelmühlen**

Kugelmühlen zählen laut PAHL vom Aufbau zu den einfachsten Mühlen. Die daraus resultierende einfache Bedienung und hohe Betriebssicherheit gelten als Vorteile für diesen Mühlen-typ. Rotierende Kugelmühlen bestehen aus einem zylindrischen Rohr, in dem sich die Mahlkörper und das Mahlgut befinden. Durch Drehen des Rohres bewegen sich die Mahlkörper und zerkleinern das Mahlgut durch Schlag und Reibung zwischen den Mahlkörpern sowie zwischen Mahlkörper und Wand des Rohres. Dadurch stellen Mahlkörper und Panzerung des Mahlraums die wesentlichen Verschleißteile dar. Als Mahlkörper kommen verschiedene Formen, wie zum Beispiel Kugeln, Zylinder oder auch Stäbe zur Verwendung. Dabei können die Mahlkörper aus den unterschiedlichsten Materialien gefertigt sein. Mit der Größe der Oberfläche des Mahlkörpers wachsen auch die Kontaktfläche und die Masse zur Übertragung der Energie an das Mahlgut. Über die Zusammensetzung hinsichtlich Größe, Form und Material können die Mahlkörper auf das Mahlgut und die gewünschte Mahlfeinheit eingestellt werden. Auch die Panzerung des Mahlraums kann durch ihre Form und Anordnung unterschiedlich gestaltet werden. Dabei können stufenförmige, gewellte, gerippte oder glatte Oberflächen entstehen. Befüllt werden Kugelmühlen durch eine zentrale Öffnung an der Stirnwand des Rohres. Der Austrag wird abhängig von der Bauform durch Schlitze in der Rohrwand oder durch eine Öffnung in der gegenüberliegenden Stirnwand realisiert. Gefüllt wird die Kugelmühle zu 20 bis 35 % mit Mahlkörpern und zu 15 bis 25 % mit Mahlgut. Die Drehzahl der Mahltrommel wird so gewählt, dass die gewünschte rollende und/oder fallende Bewegung der Füllung eintritt. [PAHL ET AL. 1993, VAUCK UND MÜLLER 2000]

Von der Fa. Geisberger wird eine Kugelmühle unter der Bezeichnung „PÜROTOR® 1.0“ zur Mahlung pumpfähiger Substrate an einer Biogasanlage angeboten. Dabei wird das Mahlgut von der Anmischung durch die Kugelmühle in den Fermenter gepumpt oder aus dem Fermenter entnommen und in den Nachgärer zurückgeführt. Die Kugelmühle wird mit einer Antriebsleistung zwischen 2,2 und 4,0 kW<sub>el</sub> angeboten. Bei einem maximalen Feststoffanteil von bis zu 15 % kann ein Durchsatz von 2 bis 15 t<sub>FM</sub>/h erzielt werden. Als Mahlkörper kommen 100 Stahlkugeln mit jeweils 3 kg zum Einsatz und die Panzerung ist glatt ausgeführt. Die Mahltrommel wird mit einer Drehzahl zwischen 7 und 15 U/min betrieben, wodurch sich eine rollende Bewegung der Mahlkörper einstellt. Abbildung 2-15 zeigt die Kugelmühle der Fa. Geisberger mit einer Stahlkugel. [GEISBERGER 2013, NEST O.J.]



Abbildung 2-15: Kugelmühle der Fa. Geisberger Gesellschaft für Energieoptimierung mbH

LINDNER ET AL. [2015] haben in Untersuchungen zur Aufbereitung von Gärresten mit einer Kugelmühle im Labormaßstab positive Effekte auf die Methanausbeute ermittelt. So wurde zum Beispiel für einen Gärrest auf Basis von Heu und Stroh nach fünf Minuten Behandlungszeit eine Methanertragssteigerung von bis zu 17 % erzielt. Ein Vorteil der mechanischen Gärrestaufbereitung mit der Kugelmühle gegenüber der Vorbehandlung von Silagen sind dabei die fehlenden Verluste an flüchtigen Fettsäuren und Alkoholen, da diese im Gärrest nicht mehr vorhanden sind [LINDNER 2016].

## 2.4 Thermische und chemische Vorbehandlungsverfahren

Viele Verfahren zum thermochemischen Aufschluss haben ihren Ursprung in der Zellstoffindustrie. Im Bereich der Bioenergie werden diese Verfahren vor allem für die Gewinnung von Alkoholen aus lignocellulosehaltigen Rohstoffen eingesetzt [TAHERZADEH UND KARIMI 2008]. Bisher wurden entsprechende Konzepte dazu jedoch nur als Pilotanlagen realisiert. Häufig dient der thermochemische Aufschluss dabei als Vorstufe für eine enzymatische Hydrolyse. Die Verfahren lassen sich in die folgenden fünf Gruppen unterteilen:

- Thermische Vorbehandlung
- Säurekatalysierte Vorbehandlung
- Alkalivorbehandlung
- Vorbehandlung mit Oxidationsmitteln
- Vorbehandlung mit organischen Lösungsmitteln

Wesentliche Einflussfaktoren für diese thermochemischen Vorbehandlungsverfahren sind Behandlungszeit, Temperaturniveau und Druck sowie Rohmaterialpartikelgröße [LINDORFER ET AL 2010]. Für die Gewährleistung der richtigen Rohmaterialpartikelgröße ist eine mechanische Zerkleinerung als Vorstufe unerlässlich. Dabei gilt es, den optimalen Bereich dafür zu ermitteln, um den Aufwand für die Zerkleinerung klein zu halten [BALLESTEROS ET AL. 2002]. Ein weiterer relevanter Faktor ist der Trockensubstanzgehalt. So konnte in den Untersuchungen von WETTER ET AL. [2013] Getreidestroh nur mit einem Trockensubstanzgehalt von ca. 15 % TS thermisch vorbehandelt werden. Bei Silagen, wie zum Beispiel Maissilage, war eine Verdünnung mit Wasser dagegen nicht nötig. Im Folgenden werden die einzelnen Verfahren detaillierter vorgestellt.

### Thermische Vorbehandlungsverfahren

Bei der thermischen Vorbehandlung wird die Biomasse mit Wasserdampf direkt oder indirekt unter Druck erhitzt und dann schlagartig entspannt. Dieses auch Steam Explosion genannte Verfahren wird bei Drücken von ca. 10 bis 25 bar und Temperaturen von ca. 180 bis 220 °C durchgeführt. Durch die Erhitzung unter Druck werden die organischen Säuren von der Hemicellulose abgetrennt. Diese dienen als Katalysator einer Hydrolyse, die vor allem die Hemicellulose betrifft, weshalb dieser Vorgang auch Autohydrolyse genannt wird. Unterstützt wird dieser Effekt durch das Absinken des pH-Wertes von Wasser bei hohen Temperaturen. Druck und Temperatur werden über einen Zeitraum von etwa 20 Minuten gehalten und am Ende wird der Druck schlagartig auf Umgebungsdruck abgesenkt. Das Wasser in den Poren der Lignocellulose verdampft und die Biomassestrukturen brechen durch die Expansion auf.

Gleichzeitig kühlt das Material schnell ab, wodurch die thermische Hydrolyse gestoppt wird. Die in Mono- und Oligomere hydrolysierte Hemicellulose geht im kondensierenden Wasser in Lösung und liegt damit in einer für die Enzyme zugänglichen Form vor. Abbildung 2-16 zeigt hydrolysierte Maissilage nach einer thermischen Vorbehandlung mit Wasserdampf. [BALLESTEROS ET AL. 2006, BROWNELL AND SADDLER 1986, KALTSCHMITT ET AL. 2009, LASER ET AL. 2002, LORA AND WAYMAN 1978, MOSIER ET AL. 2005]



Abbildung 2-16: Maissilagehydrolysat nach Dampfvorbehandlung [DIETZ UND BOLES 2013]

SCHWARZ hat in der Übersicht in Abbildung 2-17 die Effekte bei unterschiedlichen Temperaturen zusammengestellt. Nach dieser Übersicht liegt der Bereich für einen thermischen Aufschluss zwischen 150 und 190 °C. Darunter findet kein signifikanter Aufschluss von Lignocellulose statt und darüber nimmt die Bildung von Hemmstoffen zu und es treten erste pyrolytische Effekte auf. [SCHWARZ 2011]

| 70 – 120 °C  | 150 – 190 °C  | 220 – 250 °C   | > 250 °C  |
|--|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hygienisierung</li> <li>- kein signifikanter Aufschluss von Lignocellulose</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auflösung von Hemicellulose</li> <li>- Auflösung von Lignin ab 160 °C</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verstärkte Bildung von Hemmstoffen (Phenole, heterozyklische Verbindungen, Furfural)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pyrolytische Effekte</li> <li>- Beginn von Verschwelung und Vergasung</li> </ul> |

Abbildung 2-17: Effekte der Behandlung von Biomasse bei unterschiedlichen Temperaturen [SCHWARZ 2011]

Wie die Einordnung der Temperaturen von KALTSCHMITT [2009] und SCHWARZ [2011] zeigen, gibt es eine gewisse Bandbreite der Prozessbedingungen bei der thermischen Vorbehandlung. Diese betreffen neben Temperatur und Druck auch die Behandlungsdauer. In Tabelle

2-3 sind Prozessbedingungen bei thermodruckmechanischen Vorbehandlungsversuchen für unterschiedliche lignocellulosehaltige Substrate aus der Literatur aufgeführt.

Tabelle 2-3: Prozessbedingungen bei thermodruckmechanischen Vorbehandlungsversuchen aus der Literatur [nach LINDORFER ET AL 2010]

| <b>Biomasserohstoff</b>        | <b>Druckniveau</b>               | <b>Dampfparameter</b> | <b>Behandlungsdauer</b> | <b>Referenz</b> |
|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| Weizenstroh                    | 1,5–2,2 MPa                      | 200–220 °C            | 3–33 min                | [1]             |
| Weizenstroh                    | 1,5 MPa                          | k. a.                 | 4,5 min                 | [2]             |
| Sonnenblumenhalme              | 4,12 MPa max. des Druckbehälters | 180–230 °C            | 5 min                   | [3]             |
| Zuckerrohbagasse               | k. A.                            | 188–234 °C            | 0,5–44 min              | [4]             |
| Maisstängel                    | 1,5 MPa                          | 198 °C                | 1,5 min                 | [5]             |
| Maisstängel                    | k. A.                            | 190–220 °C            | 3–5 min                 | [6]             |
| Maisstängel                    | k. A.                            | 180–220 °C            | 5 min                   | [7]             |
| Getreidestroh                  | k. A.                            | 200–220 °C            | 1,2–5 min               | [20]            |
| Abessinischer Senf (Rückstand) | k. A.                            | 190–210 °C            | 4–8 min                 | [21]            |
| Weizenstroh                    | k. A.                            | 160–200 °C            | 5–20 min                | [10]            |
| Stroh und Maissilage           | 0,6 MPa                          | 160 °C                | 45 min                  | [11]            |

k. A.: keine Angaben

[1] SUN ET AL. 2004; [2] HONGZHANG ET AL. 2007; [3] RUIZ ET AL. 2008; [4] KAAR ET AL. 1998; [5] CHEN ET AL. 2005; [6] DATAR ET AL. 2007; [7] ZIMBARDI ET AL. 2007; [8] VIOLA ET AL. 2008; [9] BALLESTEROS ET AL. 2002; [10] LINDORFER ET AL. 2010; [11] WETTER ET AL. 2013

In den Untersuchungen wurde das Druckniveau zwischen 0,6 und 4,12 MPa bei einer Temperatur von 160 bis 234 °C eingestellt. Am stärksten variierte jedoch die Behandlungsdauer von 0,5 bis zu 45 Minuten. Vor dem Hintergrund der benötigten Prozessenergie ist vor allem bei Druck und Temperatur ein niedriges Niveau anzustreben [WETTER ET AL 2013].

Vorteil der thermischen Vorbehandlung ist, dass ein Substrataufschluss ohne den Einsatz von Chemikalien möglich ist. Zudem kann als Prozessenergie die Abwärme der Blockheizkraftwerke an der Biogasanlage genutzt werden. Eine Herausforderung stellt jedoch die verfahrenstechnische Realisierung dar. Vor allem ein kontinuierlicher Prozess ist technisch anspruchsvoll. [WETTER ET AL 2013]

Es gibt bereits erste Anbieter für Module zur thermischen Vorbehandlung von Substraten für Biogasanlagen, wie zum Beispiel die Firmen R. Scheuchl GmbH, Cambi oder HoSt Bioenergie. Dabei handelt es sich jedoch weniger um Verfahren der Steam Explosion, als vielmehr um eine Thermische Hydrolyse bzw. eine Thermodruckhydrolyse, bei denen auf den Prozessschritt der schlagartigen Entspannung verzichtet wird. [CAMBI O.J., HOST O.J., SCHEUCHL O.J.]

### **Säurekatalysierte Vorbehandlung**

Die Säurekatalysierte Vorbehandlung läuft im Prinzip wie die thermische Vorbehandlung ab, mit dem Unterschied, dass mit der Zugabe von Säure die Hydrolyse beschleunigt wird. Dabei treten die gleichen Effekte wie bei der Steam Explosion auf. Für die Zugabe der Säure gibt es zwei Varianten. Zum einen die Zugabe verdünnter Säure zur Biomasse vor dem Erhitzen und zum anderen das Versetzen des Wasserdampfes mit Säure während der direkten Erhitzung des Materials. Als Säuren können Schwefelsäure, Salzsäure und Phosphorsäure eingesetzt werden. Zudem besteht die Möglichkeit den Dampf auch mit gasförmigem Schwefeldioxid zu versetzen. Nach der Entspannung und vor der weiteren Nutzung wird die Suspension abgekühlt und neutralisiert. Dazu wird in der Regel Calciumcarbonat, Ammoniumhydroxid oder Natriumhydroxid eingesetzt. [DUFF AND MURRAY 1998, GREGG AND SADDLER 1996, KALTSCHMITT ET AL. 2009]

Die einzusetzende Menge an Säure ist vom Ligningehalt im Substrat abhängig. Eine weitere Besonderheit der säurekatalysierten Vorbehandlung ist die Möglichkeit, in einem weiteren Verfahrensschritt Lignin gezielt abzutrennen [SHEVCHENKO ET AL. 1999]. Nachteil dieses Verfahrens gegenüber der rein thermischen Vorbehandlung ist der zusätzliche Verbrauch an Chemikalien, die niedrigen Trockensubstanzgehalte aufgrund der Verdünnung sowie die erhöhten Salzgehalte der Suspension durch die zugegebenen Säuren und Neutralisierungsmittel. Zudem besteht die Gefahr von Hydrolyseverlusten und der Inhibitorenbildung (z.B. Phenole) [JORGENSEN ET AL. 2007].

Bei einer Fortführung der Behandlung mit Säure hydrolysieren die Anteile Cellulose und Hemicellulose vollständig. Alle bisherigen industriellen Verfahren zur Verzuckerung von Lignocellulose basieren auf diesem Prinzip der sauren Hydrolyse. Das Material wird entweder mit konzentrierter Säure bei Umgebungstemperatur oder mit verdünnter Säure bei etwa 200 °C behandelt. Häufig wird der Prozess dazu mehrstufig ausgelegt. Als Säure werden in der Regel Salz- oder Schwefelsäure verwendet. Nach der Abkühlung am Ende des Prozesses wird die Suspension neutralisiert oder die Säure zurück gewonnen. Abbildung 2-18 zeigt ein

Weizenstrohydrolysat nach der Vorbehandlung mit konzentrierter Salzsäure. [KALTSCHMITT ET AL. 2009]



Abbildung 2-18: Weizenstrohydrolysat nach Vorbehandlung mit konzentrierter Salzsäure [DIETZ UND BOLES 2013]

### **Alkalivorbehandlung**

Bei der alkalischen Vorbehandlung wird die zerkleinerte Biomasse mit einer Lauge versetzt und bei einer Temperatur von 85 – 150 °C über eine Stunde bis zu mehreren Tagen gekocht. Dafür einsetzbare Basen sind Ammoniak, Natronlauge, Calciumcarbonat und Calciumhydroxid. Die alkalische Vorbehandlung wirkt dabei auf zwei Weisen. Das Fett der Zellmembran reagiert mit den Hydroxid-Ionen, wodurch die Zellmembran zerstört wird. Gleichzeitig entwickelt sich ein hoher osmotischer Druck, der ein Austreten der Zellinhaltsstoffe forciert und somit ebenfalls die Zellen zerstört. Eine Besonderheit der alkalischen Vorbehandlung ist der teilweise Verbrauch der Lauge während der Reaktion. Beim Einsatz von Ammoniak hingegen ist eine Rückgewinnung möglich, wodurch der Einsatz dieser Chemikalie verringert werden kann. [KALTSCHMITT ET AL. 2009, KIM AND HOLTZAPPLE 2005, MOSIER ET AL. 2005]

### **Vorbehandlung mit Oxidationsmitteln**

Die Vorbehandlung mit Oxidationsmitteln wird auch „Nasse Oxidation“ genannt. Hierbei soll der Zellaufbruch durch Radikalbildung erzielt werden. Als Oxidationsmittel können dafür Wasserstoffperoxid und Ozon eingesetzt werden. Diese werden während einer drucklosen thermischen Behandlung bei 180 – 200 °C zugegeben. Dabei beträgt die Behandlungsdauer fünf bis 15 Minuten. Die Besonderheit und gleichzeitig Nachteil bei diesem Verfahren besteht in der unspezifischen Wirkung der Oxidationsmittel, wodurch hohe Hydrolyseverluste wahrscheinlich sind. [JORGENSEN ET AL. 2007, VIDAL UND MOLINIER 1988]

### **Vorbehandlung mit organischen Lösungsmitteln**

Die Verfahren zur Vorbehandlung mit organischen Lösungsmitteln werden auch als „Organosolv-Verfahren“ bezeichnet. Das Prinzip dieser Verfahren besteht in der Lösung des Ligninanteils im Lösungsmittel. Dadurch entsteht eine flüssige Phase mit gelöstem Lignin und Hemicellulosezuckern sowie eine cellulosereiche feste Phase. Als Lösungsmittel kommen vor allem Alkohole wie Ethanol, Methanol, Aceton, Ethylenglykol, Triethylenglykol und Tetrahydrofurfuryl-Alkohol in Frage. Durch höhere Temperaturen oder den Zusatz von Katalysatoren kann zusätzlich die Autohydrolyse der Hemicellulose gefördert werden. Ausbeute und Zusammensetzung der Lösungs- und Feststoffphase hängen dabei von Temperatur (155 – 205 °C), Reaktionszeit (0,5 – 1,5 h) sowie Katalysator- und Lösungsmittelkonzentration (25 – 75 %) ab. Eine Besonderheit bei diesen Verfahren ist die Möglichkeit, Lignin durch Unterschreiten der Löslichkeit abzutrennen. [KALTSCHMITT ET AL. 2009, PAN ET AL. 2007]

Die Fa. Maxbiogas GmbH entwickelt zurzeit eine Lignin-Extraktions-Anlage (LX-Anlage), bei der diese Form der Vorbehandlung scheinbar zu Grunde liegt. In dieser Anlage wird Lignin aus dem Gärrest chemisch abgetrennt und der aufgeschlossene Rest wieder in den Fermenter zurückgeführt. Zudem wird die Abwärme der Blockheizkraftwerke an der Biogasanlage als Prozessenergie benötigt. Für das so gewonnene Lignin besteht dann die Möglichkeit der Vermarktung als Chemikalie. [STREFFER 2011]

### **Fazit**

Die vorgestellten thermischen und chemischen Aufschlussverfahren sind grundsätzlich zur Vorbehandlung geeignet, stellen jedoch in der technischen Umsetzung eine Herausforderung dar. Vom Funktionsprinzip her wird neben dem Aufschluss der Lignocellulose hauptsächlich die Hemicellulose hydrolysiert und dadurch eine größere Ausbeute an Zuckern aus dieser erzielt. Somit sind diese Verfahren vor allem für den Aufschluss stark faserhaltiger Stoffe mit großen Anteilen an Hemicellulose geeignet. Die großtechnische Umsetzung gelang bisher nur in Pilotanlagen. Deshalb gibt es auch kaum Angaben zur Energieeffizienz oder zur Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren. In der folgenden Auflistung sind die Vor- und Nachteile eines thermochemischen Aufchlusses noch einmal zusammengefasst [nach SCHWARZ 2011]:

#### Vorteile

- Relativ schneller Aufschluss
- Spaltung der Lignocellulose
- Abtrennung von Lignin vielfach möglich

### Nachteile

- Technisch sehr anspruchsvoll (Korrosion, Arbeitssicherheit)
- Benötigt größere Mengen Energie
- Verluste bei der Ausbeute möglich
- Entsorgungsprobleme (Restchemikalien, Aufsalzung im Gärrest)
- Oft entstehen unerwünschte Nebenprodukte, beispielsweise Phenole, Furfural oder Hydroxymethylfural (HMF) → beeinträchtigen anschließende Fermentation [HENDRICKS UND ZEEMAN 2009]
- Erzeugung von nicht oder schwer verwertbaren Reaktionsprodukten möglich

## **2.5 Weitere Vorbehandlungsverfahren**

Zu den weiteren Vorbehandlungsverfahren werden die aus der Übersicht in Abbildung 2-2 verbliebenen Technologien gezählt. Diese sind die Behandlung mit Ultraschall, elektrischen Spannungen und die Behandlung durch Zugabe von Enzymen. Während Enzyme an unterschiedlichen Orten im Biogasprozess zugegeben werden können, werden mit Ultraschall und elektrischen Spannungen ausschließlich pumpfähige Substrate behandelt.

### **Ultraschall**

Bei der Vorbehandlung mittels Ultraschall werden Kavitationseffekte erzeugt, die zu einem Aufschluss des Substrates führen sollen. Unter Kavitation wird Bildung und Zerfall von Dampfblasen in einer Flüssigkeit bei Unterdruck verstanden. Diese Dampfblasen können unter anderem in der Unterdruckphase einer Schallwelle entstehen. Bei der Implosion der Blasen treten kurzzeitige lokale Druckstöße bis 4.500 bar und Temperaturspitzen von bis zu 5.000 K auf. Daraus folgen hohe lokale Scherkräfte im Substrat, die zur Zerstörung der Zellstrukturen führen. Diese Kavitationseffekte entstehen vor allem im niedrigen Ultraschallfrequenzbereich von 20 bis 40 kHz. [ATCHLEY AND CRUM 1988, MÜLLER ET AL. 2000, NEIS ET AL. 1997]

Zwei Anbieter für entsprechende Anlagen zur Ultraschallintegration sind die Fa. Weber Entec GmbH & Co. KG und die Fa. Ultrawaves Wasser & Umwelttechnologien GmbH. Bei beiden Anlagen wird zur Vermeidung von Verstopfungen ein Mazerator vorgeschaltet. Da durch die Ultraschallbehandlung auch die für die Vergärung notwendigen Organismen geschädigt werden, wird häufig nur ein Teilstrom behandelt. Die Ultraschallanlage von Ultrawaves hat eine Anschlussleistung von 5 kW<sub>el</sub> für eine Biogasanlage mit einer installierten

elektrischen Leistung von 500 kW<sub>el</sub> und der spezifische Stromverbrauch wird mit 3 bis 5 kWh<sub>el</sub>/m<sup>3</sup> Substrat angegeben. Mit dieser Anlage kann ein Volumenstrom zwischen 0,6 und 2,0 m<sup>3</sup>/h behandelt werden. Dabei sollte der Trockensubstanzgehalt der Substratmischung unter 10 % TS liegen. Wesentliches Verschleißteil sind die Schwinggebilde, die 20.000 Schwingungen pro Sekunde erzeugen. Nach zwei Jahren müssen diese ausgetauscht werden. Der BioPush Ultraschallreaktor von Weber Entec hat eine Anschlussleistung von 2 kW<sub>el</sub> pro Einheit und der jährliche Stromverbrauch wird für eine Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW<sub>el</sub> mit ca. 26.000 kWh<sub>el</sub>/a angegeben. Die Standzeit der Reaktoren liegt bei voraussichtlich drei Jahren und es können Substratmischungen mit einem Trockensubstanzgehalt von bis 15 % TS aufgeschlossen werden. [NEUMANN 2012, ULTRA-WAVES O.J., WEBER ENTEC O.J.]

### Elektrokinetische Desintegration

Bei der elektrokinetischen Desintegration wird das Substrat durch ein elektrisches Feld gepumpt. Dieses bewirkt bei Erreichen einer kritischen Feldstärke eine Perforation der Zellmembran, die zur Zerstörung der Zelle führt. Die Höhe der kritischen Feldstärke und somit des Energieeintrags ist vom Substrat abhängig. Bautechnisch werden entsprechende Anlagen in Form von Rohren mit längs durchlaufenden Elektroden realisiert. Wie bei der Ultraschallbehandlung wird auch bei der elektrokinetischen Desintegration in der Regel ein Nasszerkleinerer vorgeschaltet. Abbildung 2-19 zeigt als Beispiel für eine elektrokinetische Desintegrationsanlage den BioCrack der Fa. Vogelsang. [INNOVUM O.J., KOPFLOW ET AL. 2004, LIEBICH 2015]



Abbildung 2-19: BioCrack der Fa. Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH [VOGELSANG O.J.b]

Die einzelnen Module des BioCrack bestehen aus 1,5 m langen Edelstahlrohren DN 150 mit Kunststoffummantelter Elektrode, die eine Spannung von 30 bis 100 kV erzeugt. Die Anschlussleistung eines Moduls beträgt 35  $W_{el}$  und es werden etwa drei bis vier Module für eine Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500  $kW_{el}$  benötigt. Je nach Baugröße und Trockensubstanzgehalt kann der Durchsatz bis zu 80  $m^3/h$  betragen, wobei der Trockensubstanzgehalt 15 % TS nicht überschreiten sollte. Der spezifische Strombedarf wird von EFFENBERGER UND LEBUHN mit 4,4  $kWh_{el}/t$  angegeben [EFFENBERGER UND LEBUHN 2011]. Für eine BioCrack-Anlage bestehend aus drei Modulen und einer Pumpe werden Investitionskosten von 45.000 € veranschlagt und die Verschleißkosten für die Module werden als vernachlässigbar bezeichnet. [LIEBICH 2015, NEUMANN 2012, VOGELSANG O.J.b]

### **Enzymatische Vorbehandlung**

Durch die Zugabe von Enzympräparaten sollen die Geschwindigkeit und Abbaurate der Hydrolyse im Biogasprozess gesteigert werden, um den Biogasertrag zu erhöhen. Daneben zielt die Enzymzugabe auch auf eine Verbesserung der Fließ- und Rührfähigkeit der Substratmischung ab. Eingesetzt werden können die Enzyme bereits während der Silierung, direkt vor dem Biogasprozess oder während des Biogasprozesses [SCHIMPF 2014]. In der Regel werden Mischungen aus verschiedenen Enzymen verwendet, die durch das „Schlüssel-Schloss-Prinzip“ alle eine eigene Wirkung haben. Zudem wurde festgestellt, dass durch die Verwendung von Enzymmischungen Synergieeffekte auftreten, die ihre Effekte gegenüber der Verwendung als einzelnes Enzym verstärken. [TELSCHOW UND GATZ 2015, WETTER ET AL. 2015]

Bisher konnte in wissenschaftlichen Untersuchungen, in der Regel im Labormaßstab, kein eindeutiger positiver Einfluss auf die Höhe des Methanertrags einheitlich belegt werden. Während zum Beispiel HEIERMANN ET AL. [2014] und BRULÉ ET AL. [2011] weder eine signifikante Steigerung noch eine Beschleunigung der Biogasproduktion feststellen konnten, berichtet SCHIMPF [2014] von einer geringen Steigerung bei Mais- und Roggensilage und WETTER ET AL. [2015] zumindest von einer Beschleunigung der Biogasproduktion. Sowohl HEIERMANN ET AL. [2014] als auch SCHIMPF [2014] empfehlen die Zugabe und Optimierung der Enzymzugabe in den der Methanisierung bzw. dem Fermenter vorgelagerten Stufen.

Demgegenüber berichten Anlagenbetreiber sowie Hersteller und Vertreiber von Enzympräparaten durchaus von Erfolgen beim Einsatz von Enzymen. So wird von Stabilisierungen des Biogasprozesses und damit einhergehenden Ertragssteigerungen beim Gasertrag berichtet. Zudem sank die Viskosität, woraus niedrigere Stromverbräuche für Rühr- und Pumpvorgänge resultierten. [TELSCHOW UND GATZ 2015, GERHARDT ET AL. 2007] Zum Beispiel ergaben sich

in einem Monitoring von 30 Biogasanlagen Biogasmehrerträge von bis zu 30 % beim Einsatz von Enzymen [GERHARDT ET AL. 2007].

Durch die bereits sehr vielen bekannten Enzyme und ihre immer substratspezifische Wirkung ergibt sich eine große Bandbreite an einsetzbaren Enzymen. Zusammen mit den widersprüchlichen Ergebnissen der bekannten Untersuchungen zum Einfluss der Zugabe von Enzympräparaten auf den Biogasprozess bleibt ein entsprechender Forschungsbedarf bestehen.

## **2.6 Schlussfolgerungen**

Die auftretenden Effekte und der Erfolg einer Vorbehandlung sind sowohl von der Art des Vorbehandlungsverfahrens als auch von der Substratcharakteristik abhängig, wodurch es immer noch eine Herausforderung ist, das passende Vorbehandlungsverfahren zu einem Substrat zu ermitteln [CARLSSON ET AL. 2012, LINDMARK ET AL. 2012, SCHUMACHER ET AL. 2014]. Zudem ist es unwahrscheinlich, dass sich ein Verfahren für alle Arten an Biomasse durchsetzen wird [AGBOR ET AL. 2011]. Jedes Verfahren zur Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Biomasse hat Vor- und Nachteile, die in Tabelle 2-4 aufgeführt sind. In Abhängigkeit vom Anwendungsfall ist somit für jede Biomasse das geeignete Vorbehandlungsverfahren durch Versuche zu bestimmen.

Wesentlicher Nachteil aller Verfahren ist, dass die Mehrzahl der in der Literatur veröffentlichten Ergebnisse auf Untersuchungen im Labormaßstab beruhen [CARLSSON ET AL. 2012]. Zudem sind nur wenige Informationen zu Energiebilanzen und Wirtschaftlichkeit in der Literatur verfügbar [LINDMARK ET AL. 2012]. Dies zeigt den Bedarf an Untersuchungen zu Vorbehandlung im Praxismaßstab sowie die Optimierung und Bewertung der Verfahren hinsichtlich ihrer Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit.

Im Vergleich aller Verfahren stellt die mechanische Vorbehandlung die Methode mit dem geringsten technischen Aufwand dar. So können diese Verfahren auch bei Bestandsbiogasanlagen ohne großen Aufwand nachgerüstet und in den Prozessablauf der Biogasanlage eingebunden werden. Zudem scheint sie aufgrund der langen Verweilzeiten im Biogasprozess ausreichend zu sein. Darüber hinaus ist den meisten Verfahren eine mechanische Zerkleinerung vorgeschaltet. Neben dem Energieverbrauch und den Kosten besteht auch bei der Gestaltung der Zerkleinerungsmaschinen noch Optimierungspotenzial [SCHELL UND HARWOOD 1994, SCHUMACHER ET AL. 2014]. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie weit die einzelnen Substrate zerkleinert werden sollten. Trotz der zahlreichen Untersuchungen gibt es in der Literatur nur wenige Angaben zum Optimum der Zerkleinerungsintensität bzw. Partikelgröße

hinsichtlich eines maximalen bilanziellen energetischen Mehrertrags [APPELS ET AL. 2011]. Somit besteht selbst bei den mechanischen Vorbehandlungsverfahren, die bisher am weitesten verbreitet sind und die die allgemein anerkannten Regeln der Technik darstellen [LINDMARK ET AL. 2012, SCHUMACHER ET AL. 2014], noch Forschungsbedarf. Aufgrund der Verbreitung der Anlagen und den noch offenen Fragestellungen kann die Untersuchung der mechanischen Vorbehandlung zudem die größte Wirkung entfalten.

Tabelle 2-4: Vor- und Nachteile verschiedener Methoden zur Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Biomasse [nach ALVIRA ET AL. 2010]

| <b>Vorbehandlungsverfahren</b> | <b>Vorteile</b>   | <b>Nachteile</b>   |
|--------------------------------|---|--|
| Mechanisch                     | - Verringerung des Polymerisationsgrades  | - Hoher Energieverbrauch   |
| Thermisch                      | - Auflösung der Hemicellulose<br>- Kosteneffizient<br>- Höherer Ertrag an Glucose und Hemicellulose | - Bildung toxischer Komponenten möglich<br>- Verluste bei der Ausbeute möglich   |
| Konzentrierte Säure            | - Hoher Ertrag an Glucose<br>- Bei Umgebungstemperatur  | - Hohe Kosten für Säure<br>- Korrosionsgefahr                                    |
| Verdünnte Säure                | - Geringe Korrosionsgefahr<br>- Geringe Bildung von Inhibitoren                                     | - Bildung schwer verwertbarer Reaktionsprodukte<br>- Geringe Zuckerkonzentration |
| Alkali                         | - Vergrößerung der Oberfläche<br>- Geringe Bildung von Inhibitoren                                  | - Wenig effizient bei hohen Ligningehalten<br>- Hohe Kosten für Chemikalien      |
| Oxidation                      | - Geringe Bildung von Inhibitoren<br>- Geringer Energiebedarf                                       | - Hohe Kosten für Oxidationsmittel   |
| Organosolv                     | - Abtrennung von Lignin möglich   | - Hohe Kosten<br>- Lösungsmittel müssen zurückgewonnen werden                    |
| Biologisch                     | - Abbau von Lignocellulose<br>- Geringer Energieverbrauch   | - Niedrige Hydrolyserate   |

Die in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Maschinen zur mechanischen Zerkleinerung von festen Substraten für die Biogasproduktion weisen einige Unterschiede in der konstruktiven Gestaltung und der Betriebsweise auf. Teilweise können diese auch bei den einzelnen Anlagen in Abhängigkeit vom Substrat individuell angepasst werden. Dazu sind in Tabelle 2-5 die ver-

fügbaren Kenndaten zu Durchsatz, Antriebsleistung, Stromverbrauch und Verschleiß für die in diesem Kapitel vorgestellten stationären Prallmühlen zusammengetragen. Bei den Daten handelt es sich um Angaben für bestimmte Substrate und Substratmischungen. Daher ist eine direkte Vergleichbarkeit der Werte untereinander nur bedingt gegeben. Zudem fehlen für eine aussagekräftige Bewertung umfangreiche Betrachtungen zu Energiebilanz und Wirtschaftlichkeit.

Tabelle 2-5: Kenndaten der betrachteten stationären Prallmühlen

|                                  | <b>Durchsatz</b> | <b>Leistung</b>    | <b>Stromverbrauch</b> | <b>Verschleiß</b>                     | <b>Referenz</b> |
|----------------------------------|------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------|
|                                  | $t_{FM}/h$       | $kW_{el}$          | $kWh_{el}/t_{FM}$     |                                       |                 |
| Schäfer Prallreaktor             | 2 – 6            | 45                 | 3 – 15                |                                       | [1]             |
| BTS BIO accelerator <sup>f</sup> | 4 – 9            | 90                 |                       | Wartungskosten<br>0,50 €/t            | [2]             |
| PlanET Rotacrex                  |                  | 55 / 75            | 11 – 13               |                                       | [3]             |
| BTS BIO accelerator <sup>z</sup> | 4 – 9            | 75 / 90            |                       | Wartungskosten<br>1,00 €/t            | [4]             |
| Lindner Limator                  | 3 – 20           | 75 / 90            | ca. 10                | Verschleißkosten<br>1.000 €/a         | [5]             |
| MeWa BIO-QZ                      | 5 – 20           | 55                 | 3 – 13                | Verschleißkosten<br>10 bis 25 Ct/t    | [6]             |
| Xergi X-chopper                  | 6 – 9            | 55                 | 7 – 10                | 250 – 1.000 $t_{FM}$<br>Kettenwechsel | [7]             |
| Huning HPZ                       |                  | 75 – 110           |                       |                                       | [8]             |
| Huning Biocutter                 | 6 – 8            | 22 / 75            | 18 – 20               | Standzeit Messer<br>ca. 800 h         | [9]             |
| BHS Biogrinder                   | 4 – 8<br>6 – 12  | 37 / 45<br>55 / 75 |                       |                                       | [10]            |
| Huning Optimatic                 |                  | 22 / 75            |                       |                                       | [11]            |

FM: Frischmasse

- [1] SCHÄFER 2014; [2] BTS BIOGAS O.J.a; [3] NEUMANN 2015b;  
 [4] BTS BIOGAS O.J.a, BTS BIOGAS O.J.b; [5] MEDER 2014, SCHUBERT 2014;  
 [6] NEUMANN 2012, MÖNCH-TEGEDER 2014; [7] XERGI O.J.; [8] HUNING O.J.a;  
 [9] HUNING 2011, NEUMANN 2012; [10] BHS-SONTHOFEN 2014a; [11] HUNING O.J.b

Der Durchsatz der betrachteten Prallmühlen wird von den Herstellern mit bis zu  $20 t_{FM}/h$  kalkuliert. Dabei liegt die elektrische Antriebsleistung zwischen 22 und 110  $kW_{el}$  und der spezifische Stromverbrauch wird in Abhängigkeit von Substrat und Trockensubstanzgehalt mit 3 bis 20  $kWh_{el}/t_{FM}$  angegeben. Am besten schneiden in dieser Betrachtung beim Stromverbrauch der Prallreaktor von Schäfer und der Querstromzerspaner BIO-QZ von MeWa ab. Vor allem dem spezifischen Energiebedarf und dessen Optimierung kommt aus wirtschaftlicher Sicht bei Auswahl und Weiterentwicklung der mechanischen Zerkleinerung größte Bedeutung zu [PAHL ET AL. 1993].

In der Theorie der mechanischen Verfahrenstechnik sind „für die Funktion und das gewünschte Mahlergebnis bei Prallmühlen die Umfangsgeschwindigkeit, die Mahlspalte zwischen Rotor und Stator, die Form, die Größe und die Anzahl der Zerkleinerungswerkzeuge, die Mahlgutkonzentration im Mahlraum, die Temperatur und die Feuchtigkeit des Trägergases und die Art der Beeinflussung von Verweilzeit und Endfeinheit durch die Klassiervorrichtung wesentlich“ [PAHL ET AL. 1993 nach RUMPF 1975]. Daher sind in der Aufzählung in Tabelle 2-6 die Bandbreiten bei den Betriebsparametern und der konstruktiven Gestaltung der wesentlichen Bauteile dargestellt. Die Aufzählung zeigt die große Vielfalt bei der konstruktiven Gestaltung der betrachteten Prallmühlen, woraus sich folgende Fragestellungen ergeben:

- Sind die zum Teil komplexen und mit vielen Einbauten versehenen Konstruktionen notwendig oder genügt ein eher einfach gehaltener Aufbau?
- Welche Einstellungen sind wesentlich für den Erfolg der Zerkleinerung hinsichtlich eines maximalen Biogasertrages?
- Ist ein kontinuierlicher oder ein chargenweiser Betrieb effektiver?
- Wie intensiv muss hinsichtlich Dauer, Partikelgröße und Intensität zerkleinert werden um ein optimales Ergebnis zu erzielen?
- Besteht ein Zusammenhang zwischen dem Ergebnis der Zerkleinerung und dem Biogasertrag?
- Welchen Einfluss haben verschiedene Substrate auf Einstellungen und Gestaltung?  
Wo bestehen dabei Abhängigkeiten?

Zu diesen Fragestellungen sind in der Literatur so gut wie keine Antworten zu finden. Bis auf die Ergebnisse von MÖNCH-TEGEDER [2014], der für den Aufschluss von Pferdemist in einem Querstromzerspaner im Chargenbetrieb eine optimale Behandlungszeit von 15 Sekunden ermittelt hat, gibt es keine vergleichbaren Erkenntnisse. Daher sollen im Rahmen der Untersuchungen in dieser Arbeit diese Forschungsfragen bearbeitet werden.

Tabelle 2-6: Bandbreite der konstruktiven Gestaltungsmerkmale der Prallmühlen für Biogassubstrate und Vergleich mit der Versuchsanlage Prallreaktor

| <b>Merkmal</b>               | <b>Bandbreite</b>  | <b>Prallreaktor</b>   | <b>Referenz</b>   |
|------------------------------|--|---|-------------------|
| Gestaltung Rotor             | - 1 – 4 Ebenen<br>- 2 – 4 Prallwerkzeuge je Ebene<br>- Einweiserflügel<br>- Vertikal – Horizontal                              | - 1 Ebene<br>- 2 Prallwerkzeuge   | [1-13]            |
| Prallorgane                  | - Aufhängung:<br>• Starr<br>• Pendelnd<br>- Form:<br>• Platten<br>• Stäbe<br>• Hämmer<br>• „Reißzähne“<br>• Ketten<br>• Messer | - Starre Befestigung<br>- Verschiedene Anstellwinkel (60°, 75°, 90°)<br>- Platten                           | [1-13]            |
| Drehzahl                     | 600 – 1.200 U/min  | - 0 – 3.500 U/min   | [1-8]             |
| Durchmesser Prallraum (rund) | 700 – 1.600 mm   | - 600 mm  | [1, 2, 5, 12, 13] |
| Gestaltung Prallraum         | - Unterschiedliche Höhe<br>- Glatte Wände<br>- Statorleisten<br>- Abstand Prallorgan zu Wand/Stator<br>- Siebkorb              | - 10-eckig<br>- 6 Seiten mit Sieb<br>- Kein Stator<br>- Abstand Pallelement zu Sieb einstellbar (2 – 53 mm) | [1-13]            |
| Betriebsweise                | Batch und kontinuierlich   | Batch und kontinuierlich  | [1-13]            |
| Auslassöffnung               | - Sieb<br>- Regelbarer Schieber<br>- Auswurfklappe<br>- Fixierte Größe   | - Sieb<br>- Auswurfklappe   | [1-13]            |
| Antriebsleistung             | 22 – 200 kW <sub>el</sub>  | 9,5 kW <sub>el</sub>  | [1-13]            |
| Durchsatz                    | bis zu 20 t <sub>FM</sub> /h   | bis zu 200 kg <sub>FM</sub> /h  | [1-8, 12]         |
| Stromverbrauch               | 3 – 20 kWh <sub>el</sub>   |   | [3, 6-9]          |
| Sonstige Gestaltungsmerkmale | - Gezacktes Blech auf Rotor<br>- Umluftführung<br>- Zwischenboden  | - Umluftführung   | [3, 10]           |

FM: Frischmasse

- [1] BTS BIOGAS O.J.a, SCHÄFER 2014; [2] BOMATIC O.J.; [3] NEUMANN 2015b;  
 [4] BTS BIOGAS O.J.a, BTS BIOGAS O.J.b; [5] MEDER 2014, LINDNER O.J.; [6] SCHUBERT 2014;  
 [7] XERGI O.J.; [8] NEUMANN 2012; [9] MÖNCH-TEGEDER 2014; [10] HUNING O.J.a;  
 [11] HUNING 2011; [12] BHS-SONTHOFEN 2014a; [13] HUNING O.J.b

Eine für die Versuche geeignete Technik stellt der Prallreaktor dar. Dieser bietet im Vergleich zu den anderen mechanischen Aufbereitungsverfahren den größten Umfang an möglichen Einstellungen, weshalb diese in Tabelle 2-6 zum Vergleich mit angegeben sind. Dadurch wird deutlich, welche konstruktiven Gestaltungsvarianten und Betriebsparameter der mechanischen Zerkleinerungsanlagen mit Hilfe des Prallreaktors abgebildet und untersucht werden können.

Diese Flexibilität bei den Bauteilen und Betriebsparametern zusammen mit den potenziell niedrigen Stromverbräuchen machen den Prallreaktor für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit besonders geeignet. Daher werden die Untersuchungen zur mechanischen Vorbehandlung hinsichtlich der genannten Forschungsfragen mit dem Prallreaktor durchgeführt. Als Ergebnis werden grundsätzliche Aussagen zu Gestaltung und Betrieb von mechanischen Zerkleinerungsanlagen erwartet, die auch auf vergleichbare Zerkleinerungsaggregate übertragen werden können.

### 3 ERMITTLUNG GEEIGNETER SUBSTRATE

Dieses Kapitel befasst sich mit der Substratauswahl für die Untersuchungen der mechanischen Vorbehandlung mit dem Prallreaktor. Dazu werden die Anforderungen an die Untersuchungs-substrate definiert, potenziell geeignete landwirtschaftliche Roh-, Rest- und Abfallstoffe ermittelt und schließlich die Substrate mit modellhaftem Charakter für die Versuche in dieser Arbeit ausgewählt.

Für die systematischen Untersuchungen der mechanischen Vorbehandlung mit dem Prallreaktor sollen Substrate mit modellhaftem Charakter ermittelt werden. Ziel ist es, einzelne Substrate auszuwählen, deren Untersuchungsergebnisse mit hoher Wahrscheinlichkeit auch auf vergleichbare Substrate übertragen werden können, um somit ein möglichst breites Spektrum an potenziellen Einsatzstoffen abdecken zu können. Dementsprechend kommen für diesen Zweck vor allem Substrate in Betracht, die überregional und zeitlich unbegrenzt anfallen, bzw. lagerfähig sind. Zudem sollten diese Substrate in größerer Menge bei gleichbleibender Qualität über den gesamten Versuchszeitraum verfügbar sein. Folgende Anforderungen sollten die Substrate somit erfüllen:

- Wenige Substrate mit modellhaftem Charakter zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf vergleichbare Substrate
- Überregionaler und zeitlich unbegrenzter Anfall
- Hohe Verfügbarkeit bei gleichbleibender Qualität

Zur Biogaserzeugung sind eine Vielzahl von lignocellulosehaltigen Roh-, Rest- und Abfallstoffen aus der Landwirtschaft einsetzbar. Grundsätzlich geeignet sind z.B. Stroh und weitere Erntereste, Gräser, Zwischenfrüchte, mehrjährige Pflanzen sowie Halmgut aus der Landschaftspflege und Mist aus der Tierhaltung [KALTSCHMITT ET AL. 2009]. Durch die unterschiedliche Beschaffenheit dieser Substrate ergeben sich auch unterschiedliche Anforderungen an die Vorbehandlungstechnologie. Lignocellulosehaltige Rohstoffe wie Stroh und Gras haben aufgrund der höheren Ligningehalte eine auf die Trockensubstanz bezogene geringere spezifische Biogas-Ausbeute als stärke- und zuckerhaltige Rohstoffe. Allerdings weisen diese dafür auch einen bedeutend niedrigeren Marktpreis auf.

In Tabelle 3-1 sind die landwirtschaftliche Flächennutzung und die anfallenden Mengen an Ernteresten in der Landwirtschaft für 2014 in Deutschland dargestellt. Diese wurden über die vom Statistischen Bundesamt erhobenen Erntemengen und dem mittleren Haupternteprodukt-Nebenernteprodukt-Verhältnis aus der Düngeverordnung bestimmt.

Tabelle 3-1: Landwirtschaftliche Flächennutzung und Anfall von Ernterestmengen in Deutschland für das Jahr 2014 [DESTATIS 2014, DÜV 2017]

|   | <b>Anbau-<br/>fläche</b> | <b>Ernte-<br/>menge</b> | <b>TS-Gehalt<br/>Ernterest</b> | <b>HNV</b> | <b>Ernte-<br/>restmenge</b> |
|---|--------------------------|-------------------------|--------------------------------|------------|-----------------------------|
|   | [1.000 ha/a]             | [1.000 t/a]             | [% TS]                         | [1:x]      | [1.000 t/a]                 |
| <b>Landwirtschaftlich genutzte Fläche</b> | <b>16.725</b>            |                         |                                |            |                             |
| <b>Ackerland</b>                          | <b>11.869</b>            |                         |                                |            |                             |
| Getreide                                  | 5.980                    | 46.868                  |                                |            | 42.578                      |
| Weizen                                    | 3.220                    | 27.785                  | 86                             | 0,8        | 22.228                      |
| Roggen                                    | 630                      | 3.854                   | 86                             | 0,9        | 3.469                       |
| Triticale                                 | 418                      | 2.972                   | 86                             | 0,9        | 2.675                       |
| Wintergerste                              | 1.228                    | 9.496                   | 86                             | 0,7        | 6.647                       |
| Sommergerste                              | 346                      | 2.067                   | 86                             | 0,7        | 1.447                       |
| Hafer                                     | 138                      | 694                     | 86                             | 1,1        | 763                         |
| Körnermais / CCM                          | 481                      | 5.142                   | 86                             | 1,0        | 5.142                       |
| Hülsenfrüchte                             | 84                       | 284                     | 86                             | 1,0        | 284                         |
| Raps                                      | 1.394                    | 6.247                   | 86                             | 1,7        | 10.620                      |
| Sonnenblumen                              | 20                       | 46                      | 86                             | 2,0        | 92                          |
| Kartoffeln                                | 245                      | 11.607                  | 15                             | 0,2        | 2.321                       |
| Zuckerrüben                               | 373                      | 29.748                  | 18                             | 0,7        | 20.824                      |
| Silomais                                  | 2.093                    | 99.204                  |                                |            |                             |
| Getreide zur Ganzpflanzenernte            | 88                       | 2.606                   |                                |            |                             |
| Leguminosen zur Ganzpflanzenernte         | 274                      | 2.134                   |                                |            |                             |
| Feldgras                                  | 347                      | 2.798                   |                                |            |                             |
| Gemüse und Erdbeeren                      | 132                      | 3.824                   |                                |            |                             |
| Sonstige Kulturen                         | 358                      |                         |                                |            |                             |
| <b>Dauergrünland</b>                      | <b>4.651</b>             | <b>32.393</b>           |                                |            |                             |
| Wiesen                                    | 1.830                    | 12.885                  |                                |            |                             |
| Weiden                                    | 2.620                    | 19.508                  |                                |            |                             |
| Sonstiges Dauergrünland                   | 201                      |                         |                                |            |                             |
| <b>Dauerkulturen</b>                      | <b>203</b>               |                         |                                |            |                             |
| <b>Sonstige Flächen</b>                   | <b>2</b>                 |                         |                                |            |                             |

TS: Trockensubstanz; HNV: Haupternteprodukt-Nebenernteprodukt-Verhältnis;  
CCM: Corn-Cob-Mix (Mais Korn-Spindel-Gemisch)

Aufgrund dieser Betrachtung liegt das größte Potenzial der Ernterestmengen bei Getreidestroh mit etwa 43 Mio. t/a. Gefolgt von den Zuckerrübenblättern mit ca. 20 Mio. t/a, dem Rapsstroh mit rund 10 Mio. t/a und dem Maisstroh mit etwa 5 Mio. t/a. Insgesamt belaufen sich die Ernterestmengen auf rund 77 Mio. t/a. Der davon tatsächlich nutzbare Anteil hängt jedoch von den jeweiligen Bergequoten der Erntereste ab. Im Folgenden werden die einzelnen Ernte-

reste näher betrachtet. Die als Ganzpflanze geernteten Ackerfrüchte wie Silomais oder Gras werden dabei nicht betrachtet, da bei diesen Kulturen in der Regel keine Erntereste anfallen.

### **Gemüse und Dauerkulturen**

Bei Gemüse und Dauerkulturen, wie zum Beispiel im Hopfenanbau, sind die nutzbaren Mengen an Ernteresten im Regelfall sehr gering und ihr Einsatz als Substrat in Biogasanlagen ist im Einzelfall zu prüfen. Zudem fallen die Erntereste häufig nur regional und zeitlich begrenzt an und sind meist relativ feucht, wodurch bei einer Lagerung mit damit verbundenen Schwierigkeiten zu rechnen ist. [KALTSCHMITT ET AL. 2009]

### **Hackfrüchte**

Die beim Zuckerrübenanbau anfallende Blattmasse ist erheblich. Sie hat mit etwa 11 bis 18 % TS einen niedrigen Trockensubstanzgehalt und ist grundsätzlich silierfähig, es ist jedoch der anfallende Sickersaft zu beachten [KALTSCHMITT ET AL. 2009, ZAUNER UND KÜNTZEL 1986]. Zum Teil werden die Blätter nach Silierung auch als Futtermittel verwendet. Allerdings sind neue Erntemaschinen in der Regel nicht mehr in der Lage das Blatt zu bergen. Technisch verfügbar sind nach SCHATTAUER UND WILFERT [2003] lediglich 33 bis 50 % der anfallenden Blattmasse.

Der Anfall an Kartoffelkraut als Ernterest ist mit einem Haupt- zu Nebenernteprodukt-Verhältnis von 0,2 gegenüber 0,7 bei den Zuckerrüben deutlich geringer. Grundsätzlich ist das Kartoffelkraut zur Vergärung in Biogasanlagen geeignet, jedoch ist der technische Aufwand für eine Bergung sehr groß. [KALTSCHMITT ET AL. 2009]

### **Getreidestroh**

Stroh als Reststoff fällt beim Anbau von Ackerfrüchten mit dem Ziel der Körnergewinnung an. Dies trifft auf Getreide, Hülsenfrüchte, Ölsaaten sowie Körnermais und CCM (Corn-Cob-Mix; Maiskorn-Spindel-Gemisch) zu. Bis auf Teile des Getreidestrohs wird der Rest in der Regel zur Humusbildung und Düngung wieder eingearbeitet. Getreidestroh wird als Einstreu und Futtermittel in der Viehhaltung, als Bodenverbesserer und Unterlegmaterial in Gartenbaubetrieben sowie in der Freizeittierhaltung (z.B. Pferde- und Kleintierhaltung) stofflich genutzt. Nur ein geringer Anteil wird in Strohheizungen energetisch verwendet. In Abhängigkeit von der Nachfrage ist der Anteil des genutzten Stroh regional unterschiedlich. Aufgrund der hohen Trockensubstanzgehalte von über 80 % lässt sich Getreidestroh in Ballen gepresst problemlos lagern. [KALTSCHMITT ET AL. 2009]

In der Studie von ZELLER ET AL. [2011] wurde das deutschlandweite Strohpotenzial unter Berücksichtigung verschiedener Verfahren zur Humusbilanzierung und abzüglich stofflich genutzter Mengen ermittelt. Abbildung 3-1 zeigt eine Karte von Deutschland mit dem Getreidestrohpotenzial auf Landkreisebene. Die größten Potenziale sind demnach vor allem in Nordwest-, Nordost- und Mitteldeutschland zu finden.

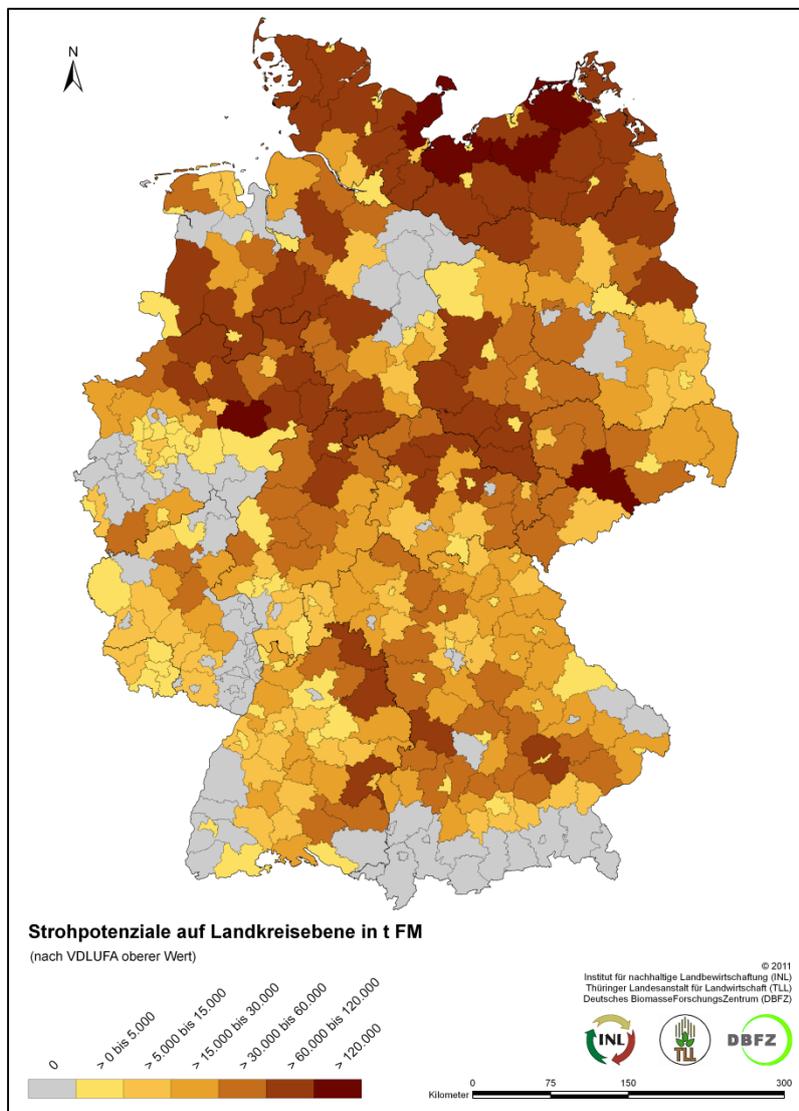


Abb. 3-1: Getreidestrohpotenzial auf Landkreisebene in Tonnen Frischmasse (t FM/a) mit Ackerflächenbezug nach VDLUFA (oberer Wert) [ZELLER ET AL. 2011]

Für die Potenzialbestimmung wurde von einer durchschnittlichen aufgewachsenen Getreidestrohmenge von etwa 30 Mio. t FM/a in Deutschland ausgegangen. Von diesem theoretischen Potenzial sind im Mittel 66 % technisch zu bergen. Abzüglich der in der Tierhaltung genutzten Strohmenge in Höhe von 4,8 Mio. t FM/a verbleibt ein technisches Potenzial von 15 Mio. t FM/a an Getreidestroh. Je nach Humusbilanzierungsmethode beträgt das Strohpotenzial in Deutschland zwischen 8 und 13 Mio. t FM/a. Demnach können zwischen 27 und 43 % der aufgewachsenen Strohmenge nachhaltig genutzt werden. [ZELLER ET AL. 2011]

## Rapsstroh

Neben Getreidestroh bietet Rapsstroh das mengenmäßig größte Potenzial bei den Ernteresten. Aufgrund des hohen Wassergehaltes zum Zeitpunkt der Ernte von ca. 45 bis 60 % kann das Rapsstroh entweder direkt feucht einsiliert werden oder nach der Trocknung auf dem Feld als Ballen gepresst wie Getreidestroh eingelagert werden. Die Bergequote schwankt mit 46 bis 85 % der Stroh-Gesamtmasse sehr stark. Als Ursachen dafür werden die feinen Fruchtstängel und Schoten sowie die Zerkleinerung beim Drusch genannt, wodurch das Rapsstroh dann dicht am Boden lagert. [APFELBECK 1989, KALTSCHMITT ET AL. 2009]

## Maisstroh

Aufgrund hoher Substratkosten wird verstärkt nach günstigen Alternativen gesucht. Dabei rückt vor allem in Regionen mit hohen Anteilen Maisanbau die Nutzung des Maisstrohs in den Fokus. Beim Anbau von Körnermais und Corn-Cob-Mix fallen große Mengen Maisstroh an, die bislang weder stofflich noch energetisch genutzt werden. Neben den Erlösen ergeben sich für den abgebenden Landwirt vor allem in mit Mais geprägten Fruchtfolgen Vorteile durch Erleichterungen bei der Stoppelbearbeitung und der vorbeugenden Bekämpfung von Krankheiten wie Fusarien und Maiszünsler [DEMEL ET AL. 2011].

In einem aktuellen Forschungsvorhaben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) werden neue Konzepte und Techniken zur Bereitstellung von Maisstroh als Biogassubstrat untersucht. Dabei sollen vor allem Fragen zum Ertragspotenzial, zu den Methanausbeuten und der Silierfähigkeit beantwortet werden. Dazu werden seit 2013 pflanzenbauliche Versuche durchgeführt, durch die auch der Einfluss von Sortenwahl und Erntezeitpunkt geklärt werden soll. [FLESCHHUT 2015]

Erste publizierte Ergebnisse zeigen, dass der Strohertrag nur knapp unter dem Kornertrag liegt. In Abhängigkeit von Sorte, Erntezeitpunkt und Jahreseinflüssen unterliegen die Stroherträge jedoch zum Teil erheblichen Schwankungen. Die Methanausbeute liegt im Mittel bei 318 l<sub>N</sub>/kg oTM. Gegenüber Silomais mit einem Methanertrag von 357 l<sub>N</sub>/kg oTM unter gleichen Bedingungen erzielt das Maisstroh somit 89 % der Gasausbeute von Silomais. Mit zunehmender Abreife verringern sich sowohl Stroh- als auch Methanerträge signifikant. [FLESCHHUT 2015] Grundsätzlich besitzt Maisstroh eine gute Siliereignung, jedoch stellt die Verdichtung, vor allem bei Trockensubstanzgehalten über 45 %, eine Herausforderung dar. In der Praxis wird dies durch die Schichtweise Silierung mit feuchten Zwischenfrüchten gelöst. [FLESCHHUT 2015, NEUMANN 2015a]

Eine weitere Herausforderung liegt in der verlust- und verschmutzungsarmen Bergung des Maisstrohs. Dabei ist vor allem auf den Erdanhang zu achten. Für die Bergung stehen drei prinzipiell unterscheidbare Techniken zur Verfügung, die ebenfalls in dem Forschungsvorhaben der LfL untersucht werden:

- Bandschwader
- Schwadmulcher
- Modifizierte Pflückvorsätze

Der Bandschwader nimmt das Maisstroh über eine Pick Up (Welle mit Zinken) auf und legt es durch Querförderbänder im Schwad seitlich ab. Beim Schwadmulcher handelt es sich um modifizierte Schlegelmulcher, bei denen das Maisstroh durch den Sog der Schlegelwelle aufgenommen und ebenfalls mit Querförderbänder im Schwad seitlich abgelegt wird. In Abbildung 3-1 ist der Schwadmulcher Biochipper der Firma BioG Biogastechnik GmbH abgebildet. [FLESCHHUT 2015, NEUMANN 2015]



Abbildung 3-1: Schlegelmulcher Biochipper der Fa. BioG Biogastechnik GmbH [EDER UND FLESCHHUT 2014]

Die dritte Technologie wurde von der Firma Geringhoff durch die Modifizierung eines Pflückvorsatzes für Mähdrescher entwickelt. Der „Mais Star Collect“ genannte Pflücker legt das Stroh direkt im Schwad mittig unter dem Drescher ab. Dies hat den Vorteil, dass das Maisstroh vor der Schwadablage keinen weiteren Bodenkontakt hat und somit weniger

Erdanhang mitführt. Demgegenüber hat der Schwadmulcher den Vorteil, dass gleichzeitig die Maisstoppel gemulcht werden, was zu Erleichterungen bei der vorbeugenden Bekämpfung des Maiszünslers führt. Wie der Schwadmulcher besitzt auch der Bandschwader größere Arbeitsbreiten (bis zu 12 m) als der Pflückvorsatz. Beim Bandschwader ist jedoch der Energieverbrauch gegenüber dem Schwadmulcher geringer. Die weitere Aufnahme für den Abtransport wird bei allen drei Erntetechniken mit Ladewagen oder Feldhäckslern durchgeführt. [FLESCHHUT 2015, NEUMANN 2015]

In Abhängigkeit vom Erntesystem liegen die Bergequoten zwischen 41 und 55 %. Dabei haben sich Erntemengen von im Mittel 47 dt TM/ha mit durchschnittlichen Trockensubstanzgehalten von 42 % und Aschegehalten von 7,9 % erzielen lassen. Auch wenn die bisherigen Ergebnisse als maximales Potenzial unter Idealbedingungen zu sehen sind, bietet die Maisstrohnutzung mit etwa 4,5 Mio. t TM/a Maisstroh in Deutschland ein großes Potenzial zur Substitution nennenswerter Anteile Silomais in Biogasanlagen. [FLESCHHUT 2015]

### **Landschaftspflegegras**

An verschiedenen Stellen, u.a. an Straßenrändern, Schienentrassen und Wasserstraßen, in Parks und Anlagen, auf Friedhöfen und vor allem auf Naturschutzflächen, fallen Halmgüter aus der Landschaftspflege an, die als Substrat für die Biogasgewinnung geeignet sind. Jedoch fällt Landschaftspflegegras nicht nur in einem unterschiedlichen Ausmaß an, es variieren zudem Trockensubstanzgehalt, Verholungsgrad und auch der Methanertrag zum Teil sehr stark. [LEMMER 2005, KALTSCHMITT ET AL. 2009, OECHSNER ET AL. 2014]

Der Methanerträge für Landschaftspflegegras liegen laut KTBL [2015] zwischen 100 und 200 l<sub>N</sub>/kg oTS. In der Literatur sind jedoch auch Methanerträge von bis 300 l<sub>N</sub>/kg oTS zu finden, was dem Methanertrag von Grassilage entspricht [OECHSNER ET AL. 2014]. In den Untersuchungen von OECHSNER ET AL. [2014] wurde zudem festgestellt, dass die mechanische Vorbehandlung mit einem Querstromzerspaner zwar keine Steigerung der Methanausbeute bewirkte, jedoch zur Vermeidung verfahrenstechnischer Probleme zwingend erforderlich ist.

Durch die unterschiedlichen Anfallorte für Landschaftspflegegras ist eine einheitliche Potenzialbestimmung schwierig und in der Literatur auch nicht zu finden. Nach Schätzungen des Deutschen Verbandes für Landschaftspflege beläuft sich das theoretische Potenzial allein für Landschafts- und Naturschutzflächen auf über 2,7 Mio. ha. Davon sollen etwa 900.000 ha technisch nutzbar sein. [THOSS UND MENZEL 2012]

Ein dem Landschaftspflegegras ähnliches Substrat ist überständiges bzw. nicht für die Verfütterung geeignetes Gras von landwirtschaftlichen Flächen. Dieses lässt sich unter gleichen Bedingungen ebenfalls zu Biogas vergären. Entsprechende Mengenpotenziale wurden bisher jedoch noch nicht ermittelt. [KALTSCHMITT ET AL. 2009]

### **Zwischenfrüchte**

Zur Erschließung weiterer Flächenpotenziale zur Produktion von Biomasse für die energetische Nutzung werden Anbausysteme zum Zweit- und Zwischenfruchtanbau genutzt und weiterentwickelt. Durch die Ergänzung der Fruchtfolgesysteme kann auch außerhalb der Anbauzeiträume von Hauptfrüchten zur Nahrungs- oder Futtermittelproduktion Biomasse für die Vergärung in Biogasanlagen bereitgestellt werden. Bei den Zwischenfrüchten wird zwischen Winter- oder Sommerzwischenfrüchten unterschieden. [HÖTTE et al. 2009, LAURENZ 2012, VETTER ET AL. 2010]

Voraussetzung für einen erfolgreichen Zwischenfruchtanbau ist eine möglichst lange Vegetationszeit und eine ausreichende Wasserversorgung. In Regionen mit weniger als 700 mm Jahresniederschlag ist das Anbaurisiko groß [VETTER ET AL. 2010]. Bei standort- und artgerechter Auswahl kann durch Mehrkultursysteme jedoch viel Biomasse in relativ kurzer Zeit gebildet werden. Bei einem kombinierten Anbau von zum Beispiel Grünroggen und Mais ist ein Mehrertrag von 4 t TM/ha·a möglich [VETTER ET AL. 2010]. Weitere Beispiele für geeignete Zwischenfrüchte sind verschiedene Getreidesorten zur Ganzpflanzenernte und Gräser wie Welsches Weidelgras oder Klee gras. [HÖTTE et al. 2009, LAURENZ 2012, VETTER ET AL. 2010]

### **Mist**

In landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Deutschland werden mit einem Masseanteil von 44 % bereits große Anteile tierischer Ausscheidungen in Form von Gülle und Mist vergoren. Der Anteil Festmist aus der Rinder, Schweine und Geflügelhaltung beträgt dabei 12 % bezogen auf die Frischmasse. Energiebezogen sind es bereits 32 % der eingesetzten tierischen Ausscheidungen. Dies zeigt den höheren spezifischen energetischen Wert von Mist gegenüber Gülle, der vor allem in dem niedrigeren Wassergehalt begründet ist. [SCHEFTELOWITZ ET AL. 2015]

SCHULTHEIß ET AL. [2010] gibt den Festmistanfall aus der Rinder- und Schweinehaltung in Deutschland für 2009 mit ca. 32 Mio. t FM an. In der Biomassepotenzialermittlung von Rest- und Abfallstoffen von BROSOWSKI ET AL. [2015] für das Erhebungsjahr 2010 wurde ein Fest-

mistanfall von etwa 37 Mio. t FM berechnet. Dabei wurde jedoch zusätzlich auch die Hühnerhaltung berücksichtigt. Als technisches Potenzial wird von BROSKI ET AL. [2015] 6,2 Mio. t TM angegeben, was 72 % der Anfallmenge entspricht. Davon werden etwa 20 % energetisch genutzt, wodurch ca. 5,0 Mio. t TM an Festmist als Potenzial zur Verfügung steht. In Tabelle 3-2 ist der Anfall und das technische Potenzial von Festmist in Deutschland aufgeführt.

Tabelle 3-2: Anfall und technisches Potenzial von Festmist in Deutschland

| Erhebungsjahr<br>Einheit | Anfall Frischmasse               |                                  | Anfall<br>Trockenmasse           | Technisches<br>Potenzial         | Ungenutztes<br>Potenzial         |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                          | 2009 <sup>1</sup><br>Mio. t FM/a | 2010 <sup>2</sup><br>Mio. t FM/a | 2010 <sup>2</sup><br>Mio. t TM/a | 2010 <sup>2</sup><br>Mio. t TM/a | 2010 <sup>2</sup><br>Mio. t TM/a |
| Rinder                   | 24,0                             | 22,4                             | 5,6                              | 3,6                              | 2,8                              |
| Schweine                 | 7,8                              | 10,8                             | 2,4                              | 2,1                              | 2,0                              |
| Hühner                   |                                  | 3,9                              | 0,6                              | 0,6                              | 0,2                              |
| <b>Summe</b>             | <b>31,8</b>                      | <b>37,0</b>                      | <b>8,6</b>                       | <b>6,2</b>                       | <b>5,0</b>                       |

FM: Frischmasse; TM: Trockenmasse

<sup>1</sup> SCHULTHEIB ET AL. 2010; <sup>2</sup> BROSKI ET AL. 2015

Einen weiteren Reststoff aus der Tierhaltung stellt Pferdemist dar. Nach Angaben der DEUTSCHEN REITERLICHEN VEREINIGUNG E.V. [2018] werden in Deutschland rund 1,3 Millionen Pferde und Ponys gehalten. Bei einem durchschnittlichen Mistanfall von 17,5 t FM/Pferd·a [HÄUBERMANN ET AL. 2002] und der Annahme von ausschließlichem Stroheinstreu ergibt sich ein jährlicher Pferdemistanfall von fast 23 Mio. t FM/a. Trotz dieser großen verfügbaren Menge an Pferdemist, ist die Verwertung in Biogasanlagen nicht sehr verbreitet. So werden zum Beispiel in Nordrhein-Westfalen zwar in 14 % der Biogasanlagen Pferdemist eingesetzt, jedoch gerade einmal mit einem durchschnittlichen Anteil an der Substratmischung von etwa 1 % [KARBACH-NÖLKE 2017].

Ein Grund für die geringen Einsatzmengen sind die sich abzeichnenden verfahrenstechnischen Probleme bei einem größeren Einsatz von Pferdemist in Biogasanlagen. Jedoch konnte MÖNCH-TEGEDER [2014] in seiner Arbeit zeigen, dass die Vergärung auch größerer Anteile Pferdemist mit Hilfe einer mechanischen Desintegration durchaus möglich ist. Ein weiteres Hemmnis waren bisher die rechtlichen Beschränkungen beim Einsatz von Pferdemist durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG). Im EEG 2004 war der Einsatz von Pferdemist nicht zulässig [EEG 2004]. Erst mit der Novellierung des EEG 2009 wurde dieser Missstand behoben und Pferdemist in die Positivliste für nachwachsende Rohstoffe aufgenommen und so mit

den tierischen Ausscheidungen aus der Rinder-, Schweine- und Geflügelhaltung gleichgestellt [EEG 2009]. Diese Einordnung hat sich mit den weiteren Novellierungen in 2012 und 2014 nicht verändert [EEG 2012, EEG 2014].

### Zusammenfassung der technischen Potenziale

In Tabelle 3-3 sind die technischen Potenziale der in diesem Kapitel betrachteten Reststoffe zusammengefasst. Dabei werden nur die Reststoffe berücksichtigt, bei denen auch ein technisches Potenzial bestimmt wurde. Ergänzt wird die Aufstellung mit den jeweiligen möglichen Methanerträgen sowie den daraus resultierenden Potenzialen an installierter elektrischer Biogasanlagenleistung.

Tabelle 3-3: Zusammenfassung der technischen Reststoffpotenziale und Methanerträge sowie daraus resultierende Potenziale an installierter elektrischer Leistung

| Reststoff                       | Berge-<br>quote | Technisches<br>Potenzial | organischer<br>Trocken-<br>substanz-<br>gehalt | Methan-<br>ertrag        | Mögliche<br>installierte<br>elektrische<br>Leistung <sup>6</sup> |
|---------------------------------|-----------------|--------------------------|--|--------------------------|--|
|                                 | [%]             | [Mio. t TM/a]            | [% oTM]  | [l <sub>N</sub> /kg oTM] | [MW <sub>el</sub> ]  |
| Zuckerrübenblätter <sup>1</sup> | 33%             | 1,2                      | 75   | 232                      | 98   |
| Getreidestroh <sup>2</sup>      |                 | 11,2                     | 90   | 210                      | 965  |
| Rapsstroh <sup>3</sup>          | 50%             | 4,6                      |  |                          |  |
| Maisstroh <sup>4</sup>          | 50%             | 2,3                      | 81   | 318                      | 265  |
| Rindermist <sup>5</sup>         |                 | 3,6                      | 84   | 313                      | 430  |
| Schweinemist <sup>5</sup>       |                 | 2,1                      | 83   | 279                      | 221  |
| Hühnermist <sup>5</sup>         |                 | 0,6                      | 79   | 325                      | 70   |
| <b>Summe</b>                    |                 | <b>25,5</b>              |  |                          | <b>2.049</b>   |

TM: Trockenmasse; oTM: organischer Anteil der Trockenmasse

<sup>1</sup> DESTATIS 2014, DÜV 2017, SCHATTAUER UND WILFERT 2003, ZAUNER UND KÜNTZEL 1986;

<sup>2</sup> ZELLER ET AL. 2011, KTBL 2015; <sup>3</sup> APFELBECK 1989, DESTATIS 2014, DÜV 2017;

<sup>4</sup> FLESCHHUT 2015; <sup>5</sup> BASERGA 2000, BROSOWSKI ET AL. 2015, KTBL 2015;

<sup>6</sup> 10 kWh/m<sup>3</sup> Methan Brennwert, 40 % elektrischer Wirkungsgrad, 8.760 h/a Betriebsstunden

Unter Berücksichtigung aller in diesem Kapitel beschriebenen Annahmen ergibt sich ein technisches Reststoffpotenzial von etwa 25,5 Mio. t TM/a und eine mögliche installierte elektrische Biogasanlagenleistung von über 2.000 MW<sub>el</sub>. Dies entspricht ungefähr der Hälfte der im Jahr 2017 betriebenen elektrischen Biogasanlagenleistung von 3.769 MW<sub>el</sub> in Deutschland [FACHVERBAND BIOGAS 2018]. Den größten Anteil hat dabei Getreidestroh mit einer möglichen Biogasanlagenleistung von 965 MW<sub>el</sub>.

In der Auflistung nicht aufgeführt ist Pferdemist. Trotzdem besitzt dieser ein großes Potenzial als Reststoff für die Biogasproduktion. Bei einer angenommenen Verfügbarkeit von 33 % der etwa 21 Mio. t FM/a und der Voraussetzung alleiniger Nutzung von Stroh als Einstreu, ergibt sich bei einem Trockensubstanzgehalt von 34 % TS, einem organischen Anteil an der Trockensubstanz von 90 % oTS und einem Methanertrag von 191 l<sub>N</sub>/kg oTS eine mögliche installierte elektrische Biogasanlagenleistung von immerhin 185 MW<sub>el</sub> [MÖNCH-TEGEDER 2014].

### **Substratauswahl**

Für die Versuche in dieser Arbeit sollen Substrate mit modellhaftem Charakter ausgewählt werden, die eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auch auf vergleichbare Substrate zulassen. Für detaillierte Versuche sollten ein trockenes und ein feuchtes Substrat in homogener Qualität verwendet werden. Die Versuchssubstrate sollten überregional und zeitlich unbegrenzt anfallen. Zudem sollten sie über den gesamten Versuchsraum in gleichbleibender Qualität zur Verfügung stehen. Aufgrund der beschriebenen Anforderungen an die Versuchssubstrate sowie der Potenzialbestimmung in diesem Kapitel wurden die Substrate Triticalestroh, Maisstroh, Hafer-Ganzpflanzensilage und Pferdemist ausgewählt. Zudem wurde die Substratmischung einer Biogasanlage mit hohen Anteilen Grassilage untersucht.

Stroh, vor allem Getreidestroh, stellt als lignocellulosehaltiger Reststoff das mengenmäßig größte Potenzial dar. Für die Versuche wurde Triticalestroh gewählt, da dieses regional (Standort der Versuchsanlage im Münsterland) in größeren Mengen vorhanden ist. Zum Vergleich wurde zudem Maisstroh untersucht, da dieser Reststoff durch die aktuellen technischen Entwicklungen verfügbar wird und durch den vergleichsweise hohen spezifischen Methanertrag ein großes Potenzial verspricht [FLESCHHUT 2015]. Wie das gewählte Triticalestroh steht auch die Hafer-Ganzpflanzensilage über den gesamten Versuchsraum in homogener Qualität zur Verfügung. Zudem können die Ergebnisse voraussichtlich auch auf andere Ganzpflanzensilagen adaptiert werden. Als Vertreter für die Mistfraktion wird Pferdemist untersucht. Durch die hohen Strohanteile ist laut MÖNCH-TEGEDER [2014] eine Vorbehandlung unbedingt vorzusehen. Zudem ist dieser Reststoff für Biogasanlagen bisher nur in geringen Mengen erschlossen worden. Auch bei Gräsern bestehen regional große Potenziale in Form von Landschaftspflegegut oder extensiv genutztem Grasland. Zudem wird der Substratmix mit hohen Grassilageanteilen bei einer Biogasanlage eingesetzt, die bereits einen Prallreaktor als Vorbehandlungstechnologie nutzt. Somit lassen sich die Ergebnisse aus der Versuchsanlage mit der Praxisanlage vergleichen.

## 4 VERSUCHSANLAGE UND –AUFBAU

Die Versuche zur mechanischen Vorbehandlung wurden mit einem Prallreaktor der Fa. Schäfer Elektrotechnik und Sondermaschinen GmbH durchgeführt. Zwischenzeitlich hat die Fa. Dieffenbacher die Rechte zum Bau und Vertrieb des Prallreaktors unter der Bezeichnung „ClassiSizer“ für den Anwendungsbereich Biomasse übernommen. Allerdings wird von Dieffenbacher der ClassiSizer vorrangig für die Zerkleinerung von Holz angeboten. Für die Anwendung bei Biogasanlagen wird der Prallreaktor, wie bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben, von der Fa. BTS Biogas GmbH unter dem Namen „BIOaccelerator“ vertrieben. [SCHÄFER 2014] An der Biogasanlage Sehan Bioenergie GmbH & Co. KG in Ovelgönne wurde der erste Prallreaktor zur Aufbereitung installiert [SEGGER-HARBERS 2015]. Daher flossen die langjährigen Erfahrungswerte des Betreibers mit der Anlage in die Arbeit ein und es wurden zudem Vergleichsuntersuchungen zu der Versuchsanlage durchgeführt.

Die Versuchsanlage bietet eine Vielzahl an variablen Einstellungen zur Zerkleinerung. Im Folgenden werden der untersuchte Prallreaktor vorgestellt, die durchgeführten Optimierungsmaßnahmen beschrieben und der Versuchsaufbau erläutert.

### 4.1 Aufbau und Funktion des Prallreaktors

Der für die Zerkleinerungsversuche verwendete Prallreaktor funktioniert nach dem Prinzip einer Prallmühle. Das zu zerkleinernde Material wird der Anlage über den Einwurfschacht, der durch zwei Absperrschieber wie eine Schleuse gestaltet ist, von oben zugeführt und fällt auf den mit bis zu 3.500 U/min horizontal schnell drehenden Rotor. Auf den starren Rotorarmen sind die Prallelemente geschraubt, auf die das Material trifft und zerbricht. Sowohl der Anstellwinkel, als auch der Abstand der Prallelemente zur Wand können hier durch Tausch von Rotor und Prallelementen verändert werden. Sobald das Material fein genug zerkleinert wurde, wird es durch sechs umgebenden Siebe aus dem Prallraum nach draußen gefördert. Dabei ist die Maschenweite durch Wechsel der Siebe variabel einstellbar. Über die Austragsöffnungen an den beiden Seiten des Prallreaktors fällt das zerkleinerte Material schließlich aus der Maschine. Bei Störungen, wie z.B. Störstoffen oder Verstopfungen, öffnet sich automatisch die Auswurfklappe zur Entfernung der Störstoffe. Mittels Blindplatten an Stelle der Siebplatten ist über die Auswurfklappe auch ein Batchbetrieb möglich. Abbildung 4-1 zeigt die Außenansicht des Prallreaktors und Abbildung 4-2 die Innenansicht des Prallraums.

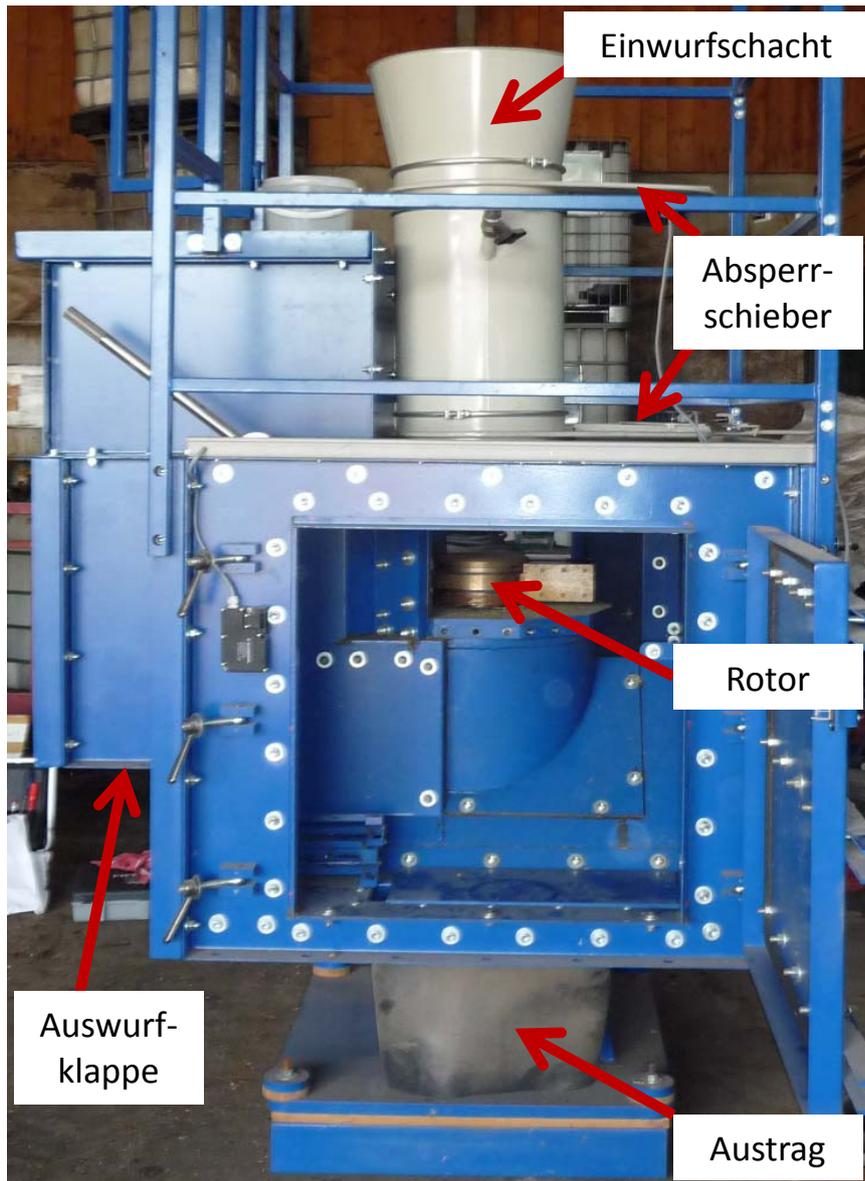


Abbildung 4-1: Außenansicht des Prallreaktors

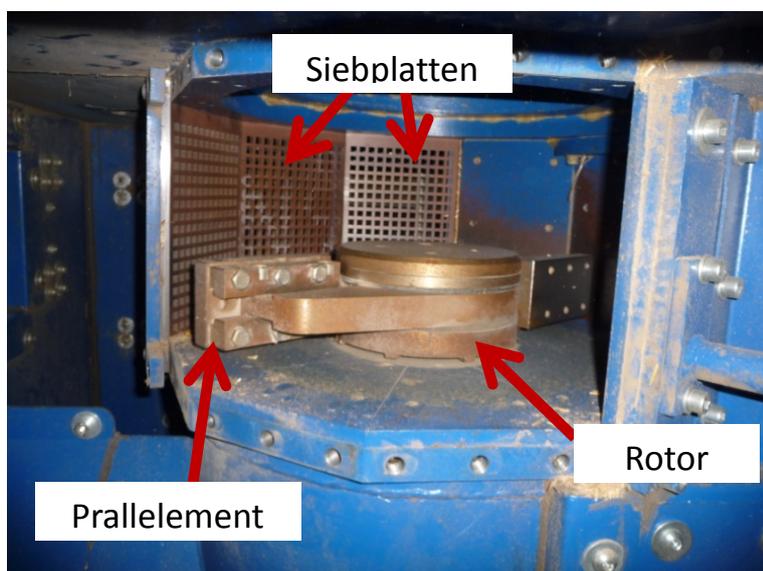


Abbildung 4-2: Innenansicht des Prallraums

Der Prallreaktor hat eine elektrische Anschlussleistung von  $9,5 \text{ kW}_{\text{el}}$ , einen Prallraumdurchmesser von 600 mm und ein Gewicht von 1.500 kg. Die Maschine ist 1.800 mm lang, 1.700 mm breit und 2.300 mm hoch. Folgende technische Einstellungen lassen sich realisieren:

- Drehzahl (0 bis 3.500 U/min)
- Anstellwinkel der Rotoren ( $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$ ), siehe Abbildung 4-3 und Tabelle 4-1
- Größe der Prallelemente (90 mm hoch; Abstand Rotor zu Siebmitte unterschiedlich, siehe Tabelle 4-1; ein genutetes Prallelement)
- Siebgrößen:
  - Quadratisch: 1,5 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm und 20 mm
  - Rechteckige Öffnungen über die gesamte Breite (140 mm) der Siebplatte mit 3 x 20 mm und 1 x 50 mm Höhe (siehe Abbildung 4-6)
- Batchbetrieb über Auswurfklappe möglich
- Durchsatz bis 200 kg/h bei Biomasse



Abbildung 4-3: Darstellung der drei Rotoren  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  und  $90^\circ$  (von links nach rechts) mit den passenden Prallelementen

Tabelle 4-1: Übersicht der Einstellungsvarianten beim Rotor

| <b>Anstellwinkel Rotor</b>             | $60^\circ$    | $75^\circ$ | $90^\circ$ |
|--|---------------|------------|------------|
| <b>Abstand Rotor zu Siebmitte</b> [mm] | 8, 23, 38, 53 | 15, 30, 45 | 2, 17, 32  |

In Abbildung 4-4 wird durch die Draufsicht auf den Rotor die Einstellung des Anstellwinkels deutlich.

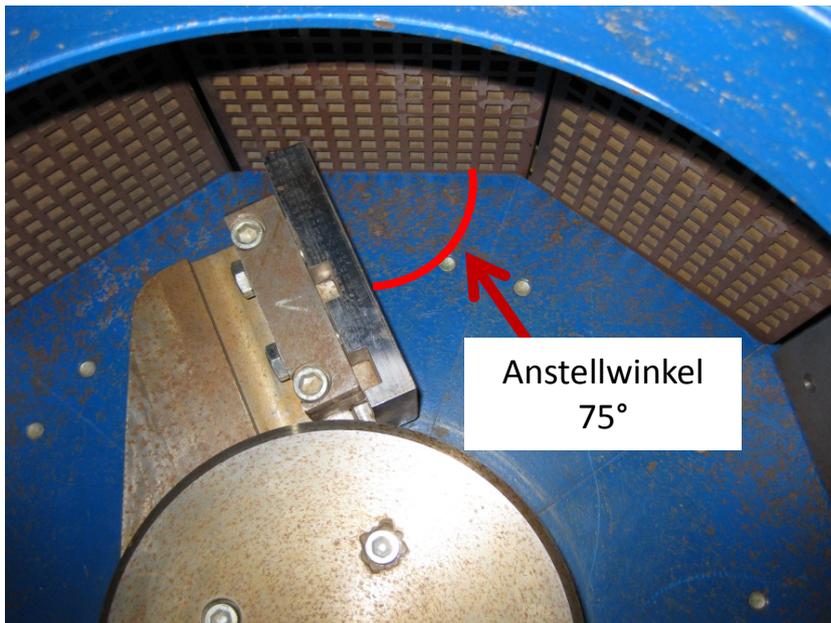


Abbildung 4-4: Draufsicht des Prallraums

Neben den glatten Parallelementen wurde auch ein genutetes Parallelement getestet (siehe Abbildung 4-5). Zum einen soll durch die 5 mm tief gefrästen Nuten das zerkleinerte Material besser abgeführt werden und zum anderen soll die verlängerte Außenkante zu einem verbesserten Aufschluss der Substrate führen.



Abbildung 4-5: Genutete Parallelemente für 60°-Rotor

Bei den Siebplatten gibt es zwei Gruppen mit quadratischen und rechteckigen Öffnungen unterschiedlicher Größe. Die Siebplatten mit den quadratischen Öffnungen (siehe Abbildung 4-4) sind vor allem für die feinere Zerkleinerung von trockenen Materialien geeignet. Dagegen sind die Siebplatten mit den rechteckigen Öffnungen (siehe Abbildung 4-6) für den Aufschluss feuchter Substrate mit hohem Faseranteil vorgesehen.

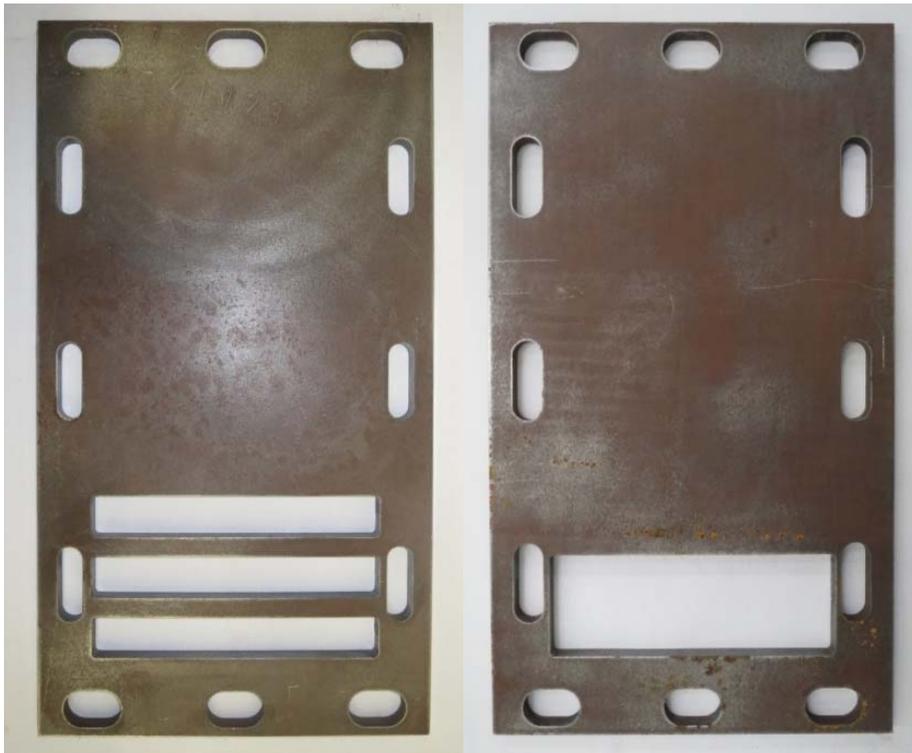


Abbildung 4-6: Siebe mit rechteckigen Öffnungen: 20 mm Höhe (links) und 50 mm (rechts)

Das zu zerkleinernde Material wird dem Prallreaktor über ein 7,8 m langes Förderband zugeführt. Dieses ist 48 cm breit und hat eine Bandlänge von 15,81 m. Es ist mit Stollen besetzt und kann über eine Dahlanderschaltung mit zwei Geschwindigkeiten betrieben werden. Dabei beträgt die Geschwindigkeit in der langsameren Stufe 0,53 m/s und in der schnelleren 1,06 m/s.

## 4.2 Technische Optimierungsmaßnahmen

Ein Ziel der Arbeit war die verfahrenstechnische Optimierung der Zerkleinerung mit dem Prallreaktor. Dazu werden im Folgenden die beim Betrieb der Versuchsanlage gemachten Erfahrungen und Optimierungsvorschläge beschrieben. Dabei sind neben eigenen Erkenntnissen aus Vorversuchen auch die Erfahrungen von der Biogasanlage Sehan und die Hinweise vom Hersteller des Prallreaktors mit eingeflossen [SCHÄFER 2014; SEGGER-HARBERS 2015]. Zum Teil konnte erst durch diese Umbauten und Ergänzungen ein verbesserter und zuverlässiger Betrieb realisiert werden. Alle an der Versuchsanlage vorgenommenen technischen Optimierungsmaßnahmen wurden vor den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchsreihen abgeschlossen.

Die gesammelten Erfahrungen und Optimierungsvorschläge sollen vor allem als Hinweise zur technischen Gestaltung und Konstruktion verstanden werden. Sie sind in der Regel auch für

alle dem Prallreaktor vergleichbaren Zerkleinerungsmaschinen gültig. Dazu werden im Folgenden Aspekte zu Korrosion, Beeinträchtigungen durch Staub und Silagesäften, zur Luftzirkulation, Schraubverbindungen und Verschleißteilen betrachtet.

### **Korrosion**

Bereits nach den ersten Versuchen mit Hafer-Ganzpflanzensilage wurden erste Korrosionserscheinungen an der Versuchsanlage festgestellt. Diese betrafen vor allem den lackierten Bereich, in dem sich das Substrat nach der Zerkleinerung sammelt. Ebenfalls betroffen waren nicht lackierte Bauteile wie der Rotor und Schraubverbindungen. Bei der Biogasanlage Sehano traten vor allem Korrosionsprobleme bei den Schraubverbindungen auf, weswegen diese mittlerweile vorbeugend regelmäßig jeden Monat ausgetauscht werden. [SEGGER-HARBERS 2015].

Um die Lebensdauer der Zerkleinerungsanlage zu erhöhen, ist daher ein konsequenter Korrosionsschutz unerlässlich. Dies betrifft vor allem die Teile, die mit dem Substrat und den damit verbundenen Silagesäften in direkten Kontakt kommen. Zudem sollte bei der Gestaltung der Schraubverbindungen ein Substratkontakt möglichst vermieden oder davor geschützt werden, zum Beispiel mit Schutzkappen für die Schraubenköpfe.

### **Behinderungen durch Staub und Silagesäfte**

Während der Versuche wurde die Versuchsanlage durch den Wechsel von trockenen und feuchten Substraten sowohl Staub als auch Silagesäften ausgesetzt. Diese setzten sich in der Mechanik der Absperrschieber am Einwurfschacht fest und behinderten ihre Funktion. Daher wurden die Absperrschieber entfernt.

Die mögliche Beeinträchtigung beweglicher Teile bei einer Zerkleinerungsmaschine durch Staub und Silagesäfte sollte berücksichtigt werden. Zudem sollte bei einer großtechnischen Zerkleinerungsanlage, die auch trockene Substrate wie zum Beispiel Stroh zerkleinert, eine Entstaubung am Zuführungsschacht in Betracht gezogen werden.

### **Einbau Umluft zur besseren Luftzirkulation**

Bei geschlossenen Auslässen zeigte sich, dass im Prallreaktor ein Überdruck aufgebaut wurde und dadurch Substrate mit zu geringer Dichte durch den Einwurfschacht direkt zurückgeblasen wurden. Auch bei Praxisanlagen wird durch die Gestaltung der Zu- und Abführung mit Förderschnecken eine Luftzirkulation weitestgehend verhindert. Neben der Zuverlässigkeit

des Betriebs und der Substratführung wird dadurch zudem die Zerkleinerung des Materials durch die Bewegung der Luftmassen beeinträchtigt [PAHL ET AL. 1993].

In Zusammenarbeit mit dem Hersteller des Prallreaktors wurde eine Umluftführung eingebaut, durch die eine Luftzirkulation mit Druckausgleich realisiert wurde. Die Umluftführung besteht aus zwei Schläuchen, die den Raum außerhalb des Siebkorbs mit dem Einwurfschacht verbinden. Durch diesen Umbau wurde erreicht, dass auch Substrate mit geringer Dichte von dem Rotor angesaugt und direkt nach Zerkleinerung durch die Siebe nach außen gefördert werden. Beim Blick von oben durch den Einwurfschacht in den Prallraum sind im Betrieb nach dem Umbau keine Verwirbelungen zu erkennen. In Abbildung 4-7 ist der Prallreaktor mit installierter Umluftführung zu sehen. Auch die von dem Biogasanlagenhersteller PlanET vertriebene Zerkleinerungsmaschine „Rotacrex“ der Fa. Bomatic (siehe Beschreibung der Maschine in Kapitel 2.3.2) ist mit einer vergleichbaren Umluftführung ausgerüstet.

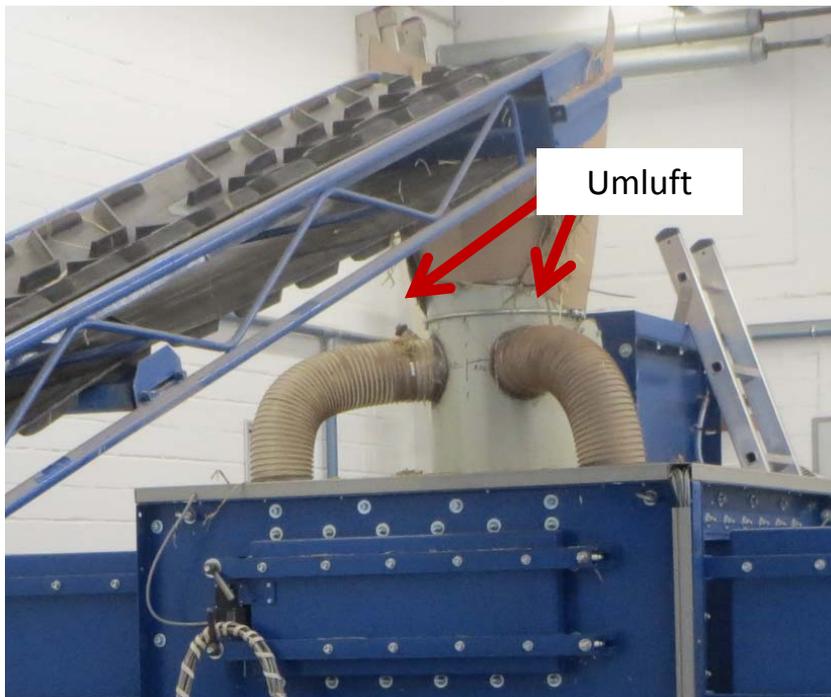


Abbildung 4-7: Prallreaktor mit installierter Umluft

### **Anzahl Schraubverbindungen gering halten**

Nicht nur aus Korrosionsschutzgründen ist die Anzahl an Schraubverbindungen so gering wie möglich zu halten. Auch bei der Wartung und Instandhaltung senken wenige Schraubverbindungen mit guter Zugänglichkeit den Aufwand. Insbesondere beim Wechsel der Verschleißteile. Eventuell ist auch der Ersatz von Schraubverbindungen durch alternative Techniken, z.B. Steckverbindungen oder Spannvorrichtungen, möglich. [HÖFFL 1986]

### **Verschleißteile länger nutzen**

Hauptaufwand bei der Instandhaltung des Prallreaktors ist die wiederkehrende Überprüfung der Verschleißteile und deren Austausch. Zu den besonders beanspruchten Verschleißteilen zählen die Prallelemente und die Siebplatten. Da diese zum Teil sehr ungleichmäßig verschleifen, können die Verschleißteile, bei denen es möglich ist, gewendet und somit deutlich länger genutzt werden. Gezielte konstruktionstechnische Maßnahmen wie ein symmetrischer Aufbau der Teile könnten dies unterstützen, wodurch Siebplatten von beiden Seiten verschleifen. Vorher sollte jedoch geprüft werden, ob eine konstruktive Teilung der Verschleißteile möglich ist. Zum Beispiel durch eine Stückelung der Prallelemente, da diese vor allem an den Außenkanten verschleifen. Dadurch würden ein gleichmäßiger Verschleiß der jeweiligen Abschnitte und ein weniger aufwändiger Tausch der kleineren Teile realisiert. [HÖFFL 1986]

### **4.3 Untersuchungen am Prallreaktor**

Für die Realisierung reproduzierbarer Versuchsbedingungen ist eine verlässliche Einstellung der Substratzuführung für einen konstanten Massenstrom unerlässlich. Dazu werden in diesem Kapitel die Installation des Frequenzumrichters am Förderband für eine steuerbare Zuführung und die Grenzbereiche bei den Einstellungen am Prallreaktor beschrieben.

#### **Substratzuführung**

Für die Steuerung der Substratzuführung wurde das Förderband mit einem Frequenzumrichter ausgestattet, da die Geschwindigkeit selbst in der niedrigen Stufe zu hoch für einen händisch gesteuerten Durchsatz ist. Zudem lässt sich durch die stufenlose Frequenzsteuerung des Motors die Geschwindigkeit des Bandes individuell anpassen. Vor allem für die Bestimmung des Stromverbrauchs ist die Realisierung reproduzierbarer Versuchsbedingungen von Bedeutung, um den Einfluss des Durchsatzes auf den Stromverbrauch bestimmen zu können. Zudem wird der spezifische Stromverbrauch durch Bezug der durchschnittlichen Wirkleistung auf den Durchsatz bestimmt. Der Durchsatz wiederum ist bei einem frequenzgesteuerten Förderband von der eingestellten Frequenz, der damit verbundenen Bandgeschwindigkeit und der Aufgabemenge abhängig.

Im ersten Schritt wurde die Abhängigkeit zwischen Förderbandgeschwindigkeit und der eingestellten Frequenz am Frequenzumrichter untersucht. Dazu wurden die Bandgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Frequenzen durch Bezug einer definierten Bandlänge auf die

gestoppte Zeit ermittelt. Das Förderband hat eine Gesamtlänge von 15,81 m. Die Laufzeit des Förderbandes wurde für eine Bandlänge von 4 m und die gesamte Bandlänge bei einer Frequenz von 10, 20, 30, 40 und 50 Hz mit jeweils drei Wiederholungen bestimmt. Abbildung 4-8 zeigt die Abhängigkeit der Förderbandgeschwindigkeit von der eingestellten Frequenz. Mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 1$  für die Trendlinie der Mittelwerte zeigt sich die lineare Abhängigkeit der Förderbandgeschwindigkeit von der Frequenz.

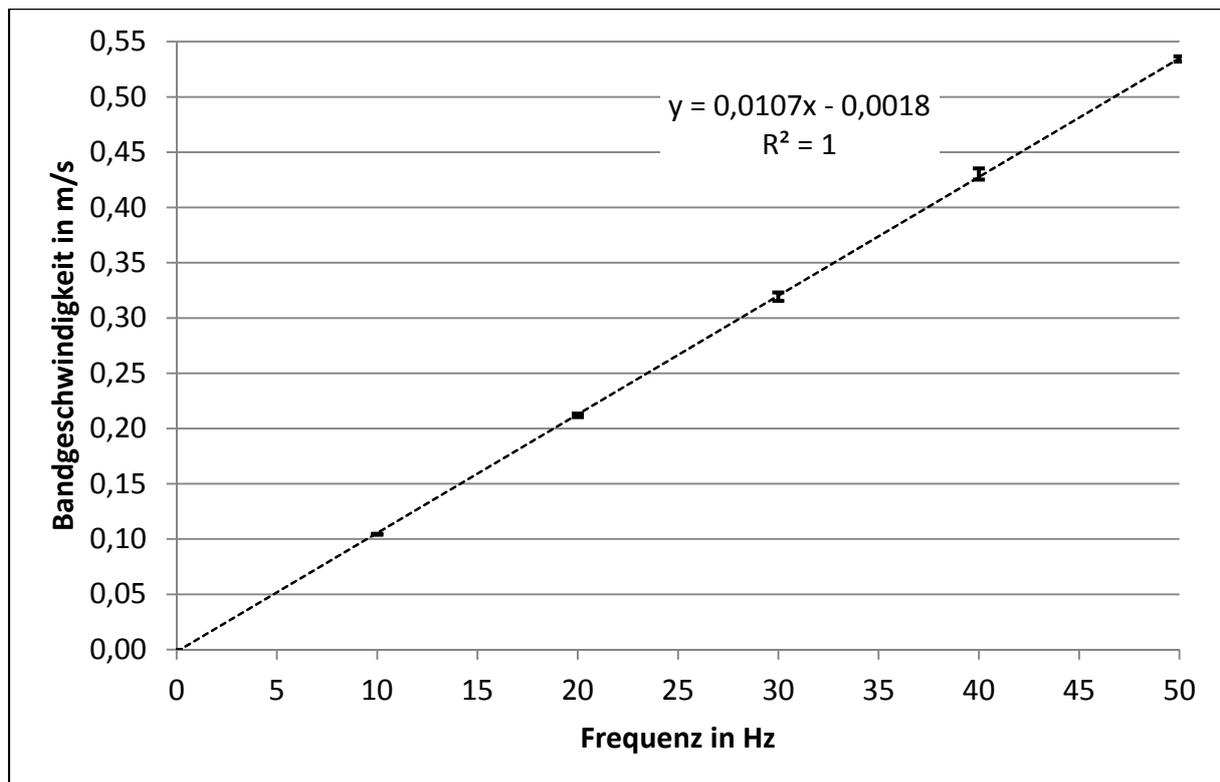


Abbildung 4-8: Förderbandgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Frequenz

Im zweiten Schritt kann die Aufgabemenge für einen beliebigen Durchsatz bestimmt werden. Dazu wurde das Förderband in 16 Abschnitte unterteilt, in die definierte Mengen an Substrat für die Versuche aufgegeben werden. Zusammen mit der eingestellten Frequenz und der damit verbundenen Bandgeschwindigkeit wird der Durchsatz gesteuert. Für die Auswertung der Versuche wurde jedoch der über die tatsächliche Versuchszeit korrigierte Durchsatz verwendet, um mögliche Fehler aufgrund der händischen Aufgabe auszugleichen. Bei den Versuchen zeigte sich, dass der Prallreaktor mit Durchsätzen von bis zu 2.000 kg/h betreibbar ist.

Anhand des Diagrammes in Abbildung 4-9 können in Abhängigkeit vom gewünschten Durchsatz und der festgelegten Aufgabemenge die einzustellende Frequenz abgelesen werden. Als Aufgabemenge wurde in der Regel 1 kg eingewogen und auf eine bestimmte Anzahl von Abschnitten aufgeteilt. Dadurch ergeben sich die im Diagramm als Strahlen dargestellten

Aufgabemengen. Abbildung 4-10 zeigt die für einen Zerkleinerungsversuch mit Maisstroh aufgebaute Versuchsanlage.

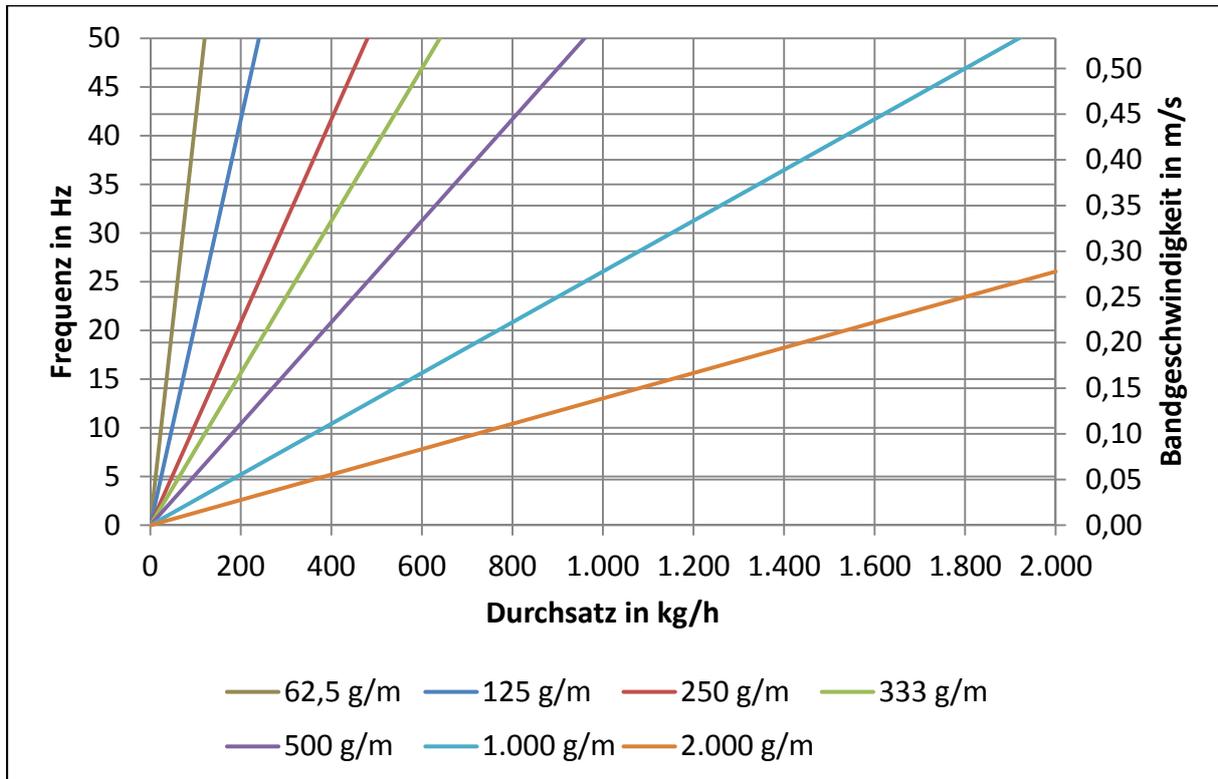


Abbildung 4-9: Aufgabemenge in Abhängigkeit von Durchsatz und Bandgeschwindigkeit



Abbildung 4-10: Versuchsaufbau für einen Zerkleinerungsversuch mit Maisstroh

### Grenzbereiche bei den möglichen Einstellungsparametern am Prallreaktor

Für erste orientierende Vorversuche zum Testen der Anlage wurden die Substrate Triticalestroh und Hafer-Ganzpflanzensilage verwendet. Mit Hilfe der in den Vorversuchen gemachten Erfahrungen konnten bereits im Vorfeld der detaillierteren Versuche Einschränkungen in der Auswahl einiger Einstellungen am Prallreaktor für das Versuchsprogramm vorgenommen werden. Im Folgenden werden die daraus resultierenden Erkenntnisse im Hinblick auf einen störungsfreien Anlagenbetrieb beschrieben.

Wie erwartet konnten bei den Sieben einige Formen für bestimmte Substrate ausgeschlossen werden. So verstopften bei den Zerkleinerungsversuchen mit Hafer-Ganzpflanzensilage alle quadratischen Siebe (Abbildung 4-11, rechts). Ebenso zeigte das Sieb mit 20 mm hohen rechteckigen Schlitzen kein zufriedenstellendes Ergebnis und setzte sich ebenfalls zu. Für feuchte Substrate ist somit nur das rechteckige Sieb mit 50 mm hohen Öffnungen geeignet. Demgegenüber waren die rechteckigen Siebe für Stroh wiederum nicht geeignet, da sich die langen Fasern um die senkrechten Haltestege der Siebe herum legten und dadurch die Siebe mit der Zeit ebenfalls verstopften (Abbildung 4-11, links).



Abbildung 4-11: Teilweise mit Triticalestroh verstopftes rechteckiges Sieb (links) und mit Hafer-Ganzpflanzensilage verstopftes quadratisches 20 mm Sieb (rechts)

Bei den Einstellungen hinsichtlich Drehzahl und Anstellwinkel am Rotor konnten keine Einschränkungen festgestellt werden. Dasselbe gilt für die Größe der Prallelemente, jedoch wurde hier beobachtet, dass insbesondere bei großen Abständen mehr Material im Prallraum verblieb und nicht ausreichend durch die Siebe ausgetragen wurde. Auch der maximale Durchsatz konnte nicht allgemeingültig eingeschränkt werden, da er in Abhängigkeit der weiteren gewählten Einstellungen und Substrate variiert.

## 5 VERSUCHE ZUR MECHANISCHEN VORBEHANDLUNG

In diesem Kapitel werden das Versuchsprogramm zur mechanischen Vorbehandlung und Methodik sowie Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich Partikelgrößenverteilung, Biogaspotenzial und Stromverbrauch dargestellt. Darüber hinaus werden die Vergleichsversuche mit dem Prallreaktor an der Biogasanlage Sehanö und dem Extruder beschrieben.

### 5.1 Versuchsprogramm

Der für die Versuche in der vorliegenden Arbeit genutzte Prallreaktor bietet eine Vielzahl an Einstellungsvarianten, womit sich ein Teil der in Tabelle 2-6 (siehe Seite 44) genannten Bandbreite der konstruktiven Gestaltungsvarianten und Betriebsparameter der am Markt verfügbaren Prallmühlen abbilden lässt. So können bei der Gestaltung des Rotors und Form der Prallorgane die Spaltweite zwischen Sieb und Prallorgan sowie der Anstellwinkel der starr befestigten Prallplatten variiert werden. Statorleisten sind nicht vorhanden. Der zehneckige Prallraum des Prallreaktors wird an sechs Seiten durch Siebe begrenzt. Die Maschenweiten sind durch Tausch der Siebe einstellbar. Eine chargenweise Betriebsweise ist ebenso möglich wie eine kontinuierliche. Jedoch wird in dieser Arbeit ausschließlich der kontinuierliche Betrieb untersucht, da dieser effektiver und kostengünstiger ist [HÖFFL 1986]. Zudem wurde der chargenweise Betrieb bereits von MÖNCH-TEGEDER [2014] untersucht.

Die Drehzahl des Rotors ist bis zu einer Geschwindigkeit von 3.500 U/min frei wählbar und ermöglicht damit auch Versuche außerhalb der Bandbreite der am Markt angebotenen Prallmühlen. Dabei ist jedoch im Hinblick auf die Umfangsgeschwindigkeit der Durchmesser des jeweiligen Rotors mit Prallorgan zu beachten. Mit zunehmender Aufprallgeschwindigkeit steigt nicht nur der Energiebedarf, sondern es entsteht auch mehr Feingut [PAHL ET AL. 1993]. Zudem ist in der Theorie „ein Schlag mit hoher Geschwindigkeit wirkungsvoller (mehr Feingut) als mehrere Schläge mit niedriger Geschwindigkeit“ [PAHL ET AL. 1993].

Beim Durchsatz wird der Größenunterschied zwischen dem genutzten Prallreaktor und den großtechnischen Anlagen deutlich. Während in den Praxisanlagen bis zu 20  $t_{FM}/h$  zerkleinert werden können, wird der maximale Durchsatz für Biomasse bei der Versuchsanlage mit 0,2  $t_{FM}/h$  vom Hersteller angegeben [SCHÄFER 2014]. Jedoch kann laut PAHL [1993] nicht nur der maximale Durchsatz, sondern auch ein Optimum beim Durchsatz für eine effektive Zerkleinerung entscheidend sein. Daher werden im Rahmen der Untersuchungen Versuche mit verschiedenen Durchsätzen durchgeführt. Neben dem Stromverbrauch ist somit auch der optimale Durchsatz für verschiedene Substrate zu ermitteln.

Für die Zerkleinerungsversuche am Prallreaktor wurden daher folgende Einstellungen aus den in Kapitel 4.1 beschriebenen Varianten ausgewählt:

- Vier Anstellwinkel des Rotors und die Länge des Pallelement: 60° mit 8 und 53 mm Abstand zur Siebmitte sowie 90° mit 2 und 32 mm Abstand zur Siebmitte
- Drei verschiedene Drehzahlen: 1.500, 2.000 und 2.500 U/min
- Siebe: 5, 10 und 20 mm bei Stroh sowie 50 mm rechteckig bei Silagen und Mist
- Variable Durchsätze von 50 kg/h bis maximal erreichbaren Durchsatz je nach Einstellung

Als Versuchsmenge wurden 10 kg pro Versuch bis zu einem Durchsatz von 200 kg/h verwendet. Bei Durchsätzen über 200 kg/h wurde die Versuchsmenge so angepasst, dass eine Mindestversuchszeit von 60 Sekunden gewährleistet werden konnte.

Insbesondere beim Durchsatz mussten die Grenzen eines zuverlässigen Betriebs experimentell ermittelt werden. Daher wurden im Verlauf der Arbeit auch nur die Versuche, die innerhalb der Grenzen lagen, ausgewertet. Eine Auswertung der abgebrochenen Versuche war aufgrund der Störungen nicht möglich.

Zur Entwicklung des Versuchsaufbaus wurden zu Beginn der Arbeit Versuche mit Weizen- und Triticalestroh sowie Roggen-Ganzpflanzensilage durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Einstellungen und das Verhalten des Prallreaktors getestet. Aufgrund dieser Versuche konnten die Grenzbereiche bei den Einstellungen und ein Großteil der Optimierungspotenziale ermittelt werden. Allerdings war es zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich, den Durchsatz zu steuern oder den Stromverbrauch aufzunehmen.

Die Proben wurden direkt nach Ende eines Versuchs gezogen. Während trockene Substrate wie Getreidestroh bei Raumtemperatur gelagert wurden, sind feuchte Substrate wie Silagen direkt vakuumiert und eingefroren worden, um mögliche Einflüsse auf die Probenqualität so weit wie möglich zu vermeiden.

Das Programm für die Zerkleinerungsversuche wurde in zwei Versuchsreihen unterteilt. In der ersten Versuchsreihe wurden anhand der zwei in Kapitel 3 gewählten modellhaften Substrate Triticalestroh und Hafer-Ganzpflanzensilage alle ausgewählten Einstellungen untersucht. Als Ergebnis aus den Versuchen wurden die Einstellungen mit geringen Stromverbräuchen und hohen Methanerträgen identifiziert. Diese Einstellungen wurden in der anschließenden zweiten Versuchsreihe mit drei Wiederholungen überprüft. Zudem wurde die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf weitere Substrate getestet. Dazu wurden mit den Einstellungen, mit denen die besten Ergebnisse erzielt wurden, Zerkleinerungsversuche von

Maisstroh, Pferdemist und einer Mischung aus Grassilage, Maissilage und Mist, ebenfalls mit drei Wiederholungen, durchgeführt.

Bei den Versuchen mit Pferdemist und der Substratmischung stellte sich heraus, dass die möglichen Einstellungen am Prallreaktor zur Zerkleinerung dieser Substrate weiter eingeschränkt werden mussten. So hatte bei Pferdemist der Abstand zwischen Prallelement und Sieb einen großen Einfluss auf Durchsatz und Betriebssicherheit. Nur die Einstellungen bei 2 und 8 mm Abstand gewährleisteten, dass die Siebe nicht verstopften. Noch kritischer waren die Versuche mit der Substratmischung. Hier verstopften die Siebe bei allen Einstellungen. Nur bei einem Abstand von 2 mm konnte das Material durch die Siebschlitze gepresst werden, siehe Abbildung 5-1. Da diese Betriebsweise jedoch nicht sicher ist, wurde für die Versuche mit der Substratmischung statt der Siebe die Auswurfklappe genutzt. Mit Hilfe einer Arretierung konnte die Auswurfklappe auf einen Spalt von 70 mm festgestellt werden.



Abbildung 5-1: Mit der Substratmischung verstopfte Siebe

## 5.2 Beschreibung der untersuchten Substrate

Nach Abschluss des Aufbaus der Versuchsanlage wurden die Versuche mit den in Kapitel 5.1 beschriebenen Einstellungen durchgeführt. Die dazu verwendeten Substrate werden in der folgenden Aufzählung kurz beschrieben:

- Das in Quaderballen gepresste Triticalestroh aus dem Jahr 2014 stammte von einer Anbaufläche und wurde nach der Ernte ohne Regenkontakt eingelagert.
- Die Hafer-Ganzpflanzensilage wurde als Sommerzwischenfrucht nach Wintergerste angebaut und im Herbst 2014 geerntet.

- Das Maisstroh wurde nach der Körnermaisernte Ende Oktober 2014 händisch gesammelt. Bis zu den Zerkleinerungsversuchen wurde es in der Versuchshalle zum Trocknen ausgebreitet.
- Der verwendete Pferdemist war frisch aus einer Pferdebox geholt und direkt am gleichen Tag zerkleinert worden. Der Anteil Stroh betrug etwa zwei Drittel und der Anteil Kot ca. ein Drittel.
- Bei der Mischung aus Grassilage, Maissilage und Mist handelt es sich um den Substratmix der Biogasanlage Sehana, weshalb diese Mischung im Verlauf der Arbeit auch als Substratmischung oder „Sehano-Mix“ bezeichnet wird. Die Mischung bestand zu dieser Zeit zu 53 % aus Grassilage, 40 % Maissilage und zu 7 % aus Rinder- und Pferdemist. Der Substratmix wurde gewählt, da an dieser Biogasanlage ein Prallreaktor zur Vorbehandlung der festen Substrate eingesetzt wird und im Verlauf der Arbeit die Ergebnisse der Zerkleinerung von Versuchs- und Praxisanlage miteinander verglichen werden.

Abbildung 5-2 zeigt die untersuchten Substrate Triticalestroh, Hafer-Ganzpflanzensilage, Maisstroh und Pferdemist vor und nach der Zerkleinerung mit dem Prallreaktor.



Abbildung 5-2: Untersuchte Substrate vor und nach der Zerkleinerung mit dem Prallreaktor

Zur weiteren Charakterisierung der Substrate, sind in Tabelle 5-1 die Gehalte an Trockenrückstand und organischem Anteil des Trockenrückstandes der fünf untersuchten Substrate aufgelistet. Der Trockenrückstand wird dabei durch Verdampfung des Wasseranteils bei 105 °C in einem Trockenschrank nach den Vorgaben der Norm DIN EN 12880 „Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts“ [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 2000a] und der organische Trockenrückstand durch Erhitzung in einem Muffelofen bei 550 °C nach den Vorgaben der Norm DIN EN 12879 „Bestimmung des Glühverlustes der Trockenmasse“ [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 2000b] bestimmt.

Tabelle 5-1: Gehalte an Trockenrückstand und organischem Anteil des Trockenrückstandes der untersuchten Substrate

|                  | <b>TR-Gehalt</b> | <b>oTR-Gehalt</b> |
|------------------|------------------|-------------------|
| Triticalestroh   | 93,0%            | 96,3%             |
| Maisstroh        | 93,1%            | 94,9%             |
| Hafer-GPS        | 24,6%            | 91,7%             |
| Pferdemist       | 34,6%            | 85,6%             |
| Substratmischung | 25,7%            | 85,2%             |

TR: Trockenrückstand; oTR: organischer Anteil des Trockenrückstandes

### 5.3 Partikelgrößenverteilung

Eine Möglichkeit, den Erfolg der mechanischen Zerkleinerung zu messen, ist die Veränderung der Partikelgrößenverteilung. Daher soll untersucht werden, ob und wie die Partikelgrößenverteilung ein Maß für die Effizienz der Zerkleinerung hinsichtlich Stromverbrauch und Methangasertrag sein kann. Dazu werden in diesem Kapitel Methodik und Durchführung der Partikelgrößenanalyse beschrieben und die Ergebnisse dargestellt.

#### 5.3.1 Methodik und Durchführung der Partikelgrößenanalyse

Zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung gibt es eine Reihe von Messmethoden. Diese reichen, in unterschiedlicher Ausgestaltung, von Analysensiebungen über Sedimentationsverfahren bis hin zu optischen Verfahren [STIEB 2009]. In dieser Arbeit wurde die Partikelgrößenverteilung durch Analysensiebung mit einer Vibrationssiebmaschine ermittelt. Dabei wird zwischen einer Trockensiebung für die trockenen Strohproben und einer Nasssiebung für die feuchten Silagen- und Mistproben unterschieden. Die Siebanalysen wurden mit der Vibrationssiebmaschine (Retsch AS 200 Control) des Labors für Umwelttechnik der FH Münster,

siehe Abbildung 5-3, nach den Vorgaben der DIN 66165 „Siebanalyse“ [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1987] durchgeführt.



Abbildung 5-3: Verwendete Vibrationssiebmaschine AS 200 Control der Fa. Retsch

In der Norm DIN 66 165 Teil 1 & 2 mit dem Titel „Siebanalyse“ sind die Vorgaben für die Durchführung einer Analysensiebung festgeschrieben. Demnach soll die Aufgabemenge nicht mehr als das Doppelte des größten zulässigen Schüttvolumens des Siebrückstandes betragen. Bei der Verwendung mehrerer Siebebenen ist das größte zulässige Schüttvolumina des Siebrückstandes für die Summe der Siebe zu bilden. Über die Schüttraumdichte der Probe kann darauf hin die Masse an Siebgutmenge berechnet werden. Für die Versuche wurde unter

Berücksichtigung dieser Vorgabe eine Siebgutmenge von 25 g bei Stroh, 100 g bei den Silagen und 75 g bei Mist verwendet. Um den Analysefehler bei der Siebung klein zu halten, sollte die Differenz zwischen Aufgabemenge und der Summe der ausgewogenen Massen aus den Fraktionen 1 % der Masse des Aufgabegutes nicht überschreiten. [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1987]

Bei der Auswahl der Siebböden ist darauf zu achten, dass sich das zu siebende Material möglichst gleichmäßig auf die einzelnen Siebböden verteilt. Eine Ausnahme bilden dabei der oberste und der unterste Siebboden, auf denen jeweils maximal 5 % der aufgegebenen Siebmenge verbleiben soll. Von den Siebböden dazwischen sollen jeweils maximal 25 % der aufgegebenen Siebmenge erfasst werden. Die Nennöffnungsweite des obersten Siebes wird zudem von der maximalen Partikelgröße im Aufgabegut beeinflusst. Demnach soll die maximale Partikelgröße im Aufgabegut  $x_{\max}$  kleiner sein als der Term in Formel 5-1. Diese Einschränkung dient vor allem der Vermeidung von Beschädigungen an den Siebböden. [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1987]

Formel 5-1: Beschränkung der Nennöffnungsweite des obersten Siebes [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1987]

$$x_{\max} = 10 \cdot w^{0,7}$$

Hier bedeuten:

$x_{\max}$  maximale Partikelgröße  
 $w$  Nennöffnungsweite

Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen wurden die acht Siebböden mit Hilfe von Probesiebungen ausgewählt. In Tabelle 5-2 sind die verwendeten Siebböden mit den jeweiligen Maschenweiten für die verschiedenen Substrate aufgeführt. Alle Siebe haben einen Durchmesser von 250 mm.

Das Ende der Analysensiebung ist erreicht, „wenn die Masse des Siebdurchganges in einer Minute weniger als 0,1 % der Masse des Aufgabegutes beträgt“ [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 198]. Bei einer Trockensiebung ist dies nur durch Probesiebungen experimentell zu ermitteln. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Strohproben wurde diese Anforderung nach 30 Minuten sicher erreicht. Demgegenüber wird bei einer Nasssiebung, bei der das Siebgut mittels Wasserstrom durch die Siebebenen geführt wird, dieser Zustand erreicht, wenn im Ablauf ein deutliches Verschwinden der Trübung zu beobachten ist. [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1987] Die Trockensiebung wurde für die Substrate Triticale- und

Maisstroh verwendet und die Nasssiebung für Hafer-GPS, Pferdemist und die Substratmischung.

Tabelle 5-2: Übersicht Siebbodenkonfiguration für Analysensiebung

| <b>Siebe<br/>Prallreaktor</b> | <b>Quadratisch</b>         |                            | <b>Rechteckig</b>          |                            |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                               | <b>5 mm</b>                | <b>10 mm</b>               | <b>20 mm</b>               | <b>50 mm</b>               |
| <b>Maschenweite<br/>[mm]</b>  | <b>Kornklasse<br/>[mm]</b> | <b>Kornklasse<br/>[mm]</b> | <b>Kornklasse<br/>[mm]</b> | <b>Kornklasse<br/>[mm]</b> |
| 20                            |                            |                            |                            | > 20,00                    |
| 10                            |                            |                            | > 10,00                    | 10,00 bis 20,00            |
| 5                             | > 5,00                     | > 5,00                     | 5,00 bis 10,00             | 5,00 bis 10,00             |
| 3,15                          |                            | 3,15 bis 5,00              | 3,15 bis 5,00              | 3,15 bis 5,00              |
| 2,5                           | 2,50 bis 5,00              | 2,50 bis 3,15              | 2,50 bis 3,15              |                            |
| 2                             | 2,00 bis 2,50              | 2,00 bis 2,50              | 2,00 bis 2,50              | 2,00 bis 3,15              |
| 1,6                           | 1,60 bis 2,00              | 1,60 bis 2,00              |                            |                            |
| 1                             | 1,00 bis 1,60              | 1,00 bis 1,60              | 1,00 bis 2,00              | 1,00 bis 2,00              |
| 0,5                           | 0,50 bis 1,00              | 0,50 bis 1,00              | 0,50 bis 1,00              | 0,50 bis 1,00              |
| 0,2                           | 0,20 bis 0,50              | 0,20 bis 0,50              | 0,20 bis 0,50              | 0,20 bis 0,50              |
| 0,1                           | 0,10 bis 0,20              |                            |                            |                            |
| Siebpfanne                    | < 0,10                     | < 0,20                     | < 0,20                     | < 0,20                     |

Eine Herausforderung bei der Analysensiebung der untersuchten Proben stellt die Form der Partikel dar. Diese sind häufig nadelförmig oder zum Teil bei den krautigeren Substraten auch ineinander verhakt. Bei der experimentellen Ermittlung der Einstellungen an der Siebmaschine stellte sich heraus, dass Amplitude, Intervall und Dauer der Siebung Einfluss auf das Ergebnis der Siebanalyse haben. Insbesondere die Intervallsiebung beschleunigte den Siebvorgang. An der Vibrationssiebmaschine wurden für die Siebanalysen eine Amplitude von 3 mm und eine Intervallsiebung von 30 Sekunden eingestellt. Mit Hilfe der beschriebenen Siebkonfigurationen konnten die Vorgaben der DIN 66165 „Siebanalyse“ weitestgehend eingehalten werden. Abbildung 5-4 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Siebanalyse von gepralltem Triticalestroh anhand der beladenen Siebböden.

Aufgrund der für eine Siebanalyse ungünstigen Form der Partikel [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1987], wurden die Siebanalysen als Dreifachbestimmung durchgeführt. Eine Ausnahme bildeten die Strohproben aus der ersten Versuchsreihe, bei der aufgrund der Vielzahl an Proben für einen ersten Überblick die Anzahl auf eine Siebanalyse pro Zerkleinerungsversuch reduziert wurde.



Abbildung 5-4: Ergebnis einer Siebanalyse von gepalltem Triticalestroh anhand der beladenen Siebböden

### 5.3.2 Auswertung und Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse aus den Siebanalysen werden nach den Vorgaben der DIN ISO 9276 „Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen“ [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 2004] massebezogen als Verteilungssumme und Verteilungsdichte sowie als Histogramm der Verteilungsdichte in einem Diagramm aufgetragen. Dazu zeigt Abbildung 5-5 ein solches Diagramm beispielhaft für eine Triticalestrohprobe.

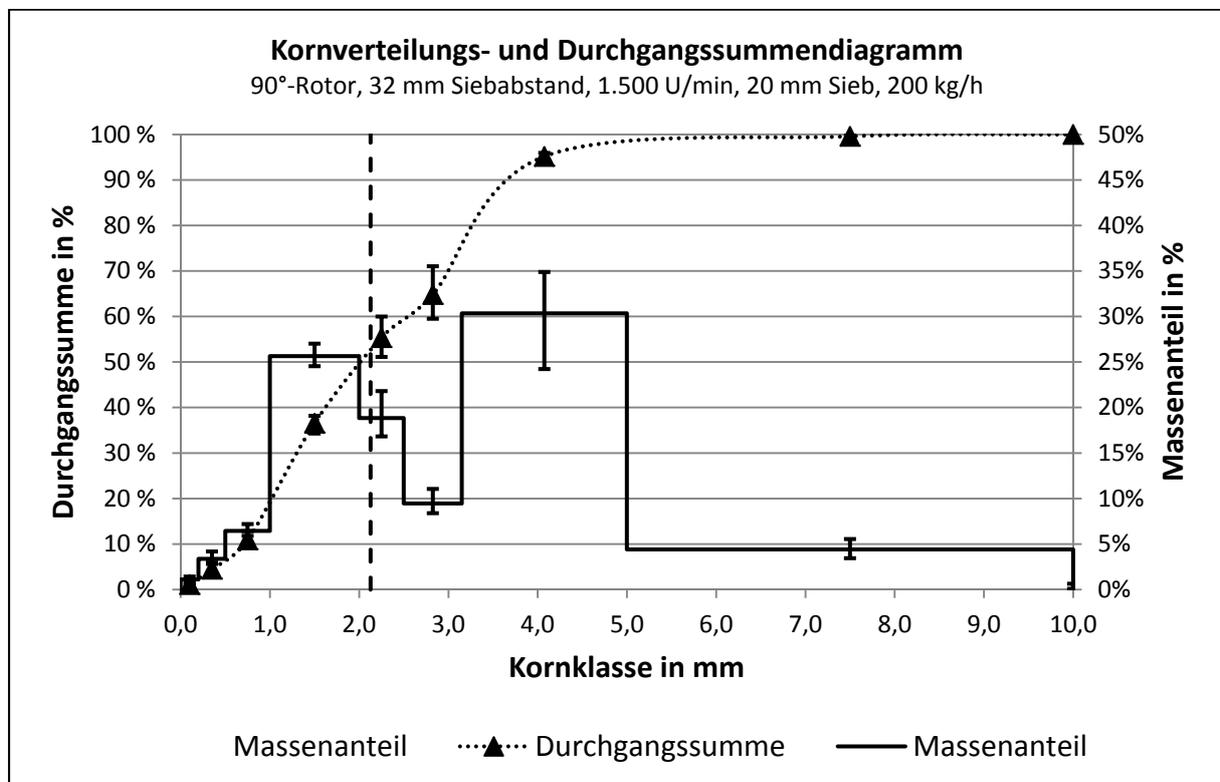


Abbildung 5-5: Beispieldiagramm einer gepallten Triticalestrohprobe zur Ergebnisdarstellung einer Analysensiebung (Trockensiebung) als Kornverteilung und Durchgangssumme

Durch die lineare Auftragung ergibt sich für die Verteilungssumme ein S-förmiger Kurvenverlauf. Das Maximum der Verteilungsdichtekurve zeigt die mengenreichste Partikelgröße an und wird Modalwert genannt. Bei Betrachtung der Kurve zur Verteilungsdichte in Abbildung 5-5 fällt auf, dass es zwei Maxima bei 1,5 und 4,0 mm gibt. Daher wird diese Verteilung auch als bimodal bezeichnet [STIEB 2009]. Diese bimodale Verteilung trat vor allem bei den Triticaestroh- und Maisstrohproben auf, die über das 20 mm Sieb im Prallreaktor zerkleinert wurden. Auf die Stärke der Ausprägung dieser Bimodalität hatte zudem die Drehzahl des Prallreaktors einen Einfluss. Je niedriger die Drehzahl, desto klarer die bimodale Ausprägung der Verteilungsdichtekurve. Bei allen weiteren Siebanalysen der Strohproben zeigte sich eine modale Verteilung in der Verteilungsdichtekurve, wie zum Beispiel in Abbildung 5-6.

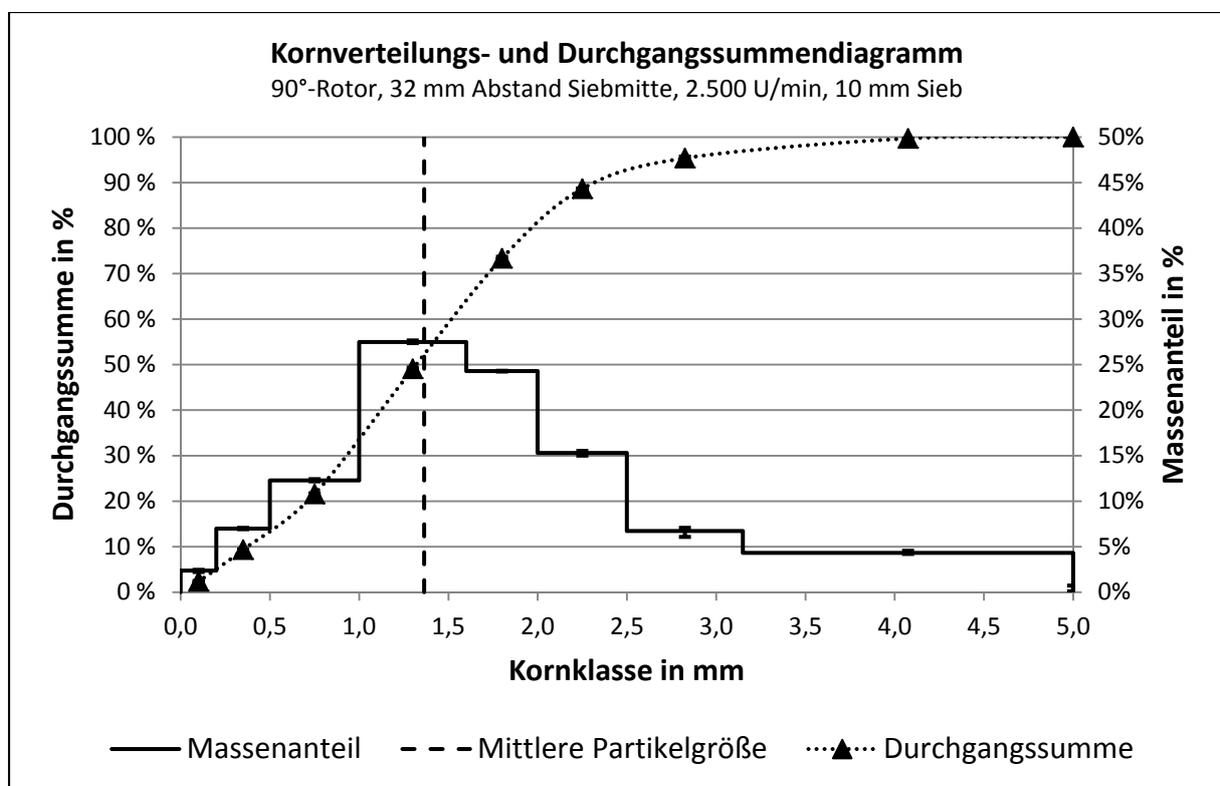


Abbildung 5-6: Beispieldiagramm für eine modale Verteilung einer gepallten Triticaestrohprobe (Trockensiebung)

Zum Vergleich wurde auch eine Siebanalyse mit einer unbehandelten Triticaestrohprobe durchgeführt, siehe Abbildung 5-7. Darin zeigt sich eine extreme Form der bimodalen Ausprägung der Verteilungskurve durch den mit 80 % sehr hohen Anteil Material auf dem obersten Sieb mit 20 mm. Damit hält das Ergebnis dieser Siebanalyse die Kriterien der DIN 66165 „Siebanalyse“, nach der maximal 5 % der aufgegebenen Siebmenge auf dem obersten Siebboden verbleiben soll, nicht ein, womit diese auch nicht weiter ausgewertet werden kann. Dementsprechend wird auf eine Darstellung der Nullprobe im weiteren Verlauf verzichtet.

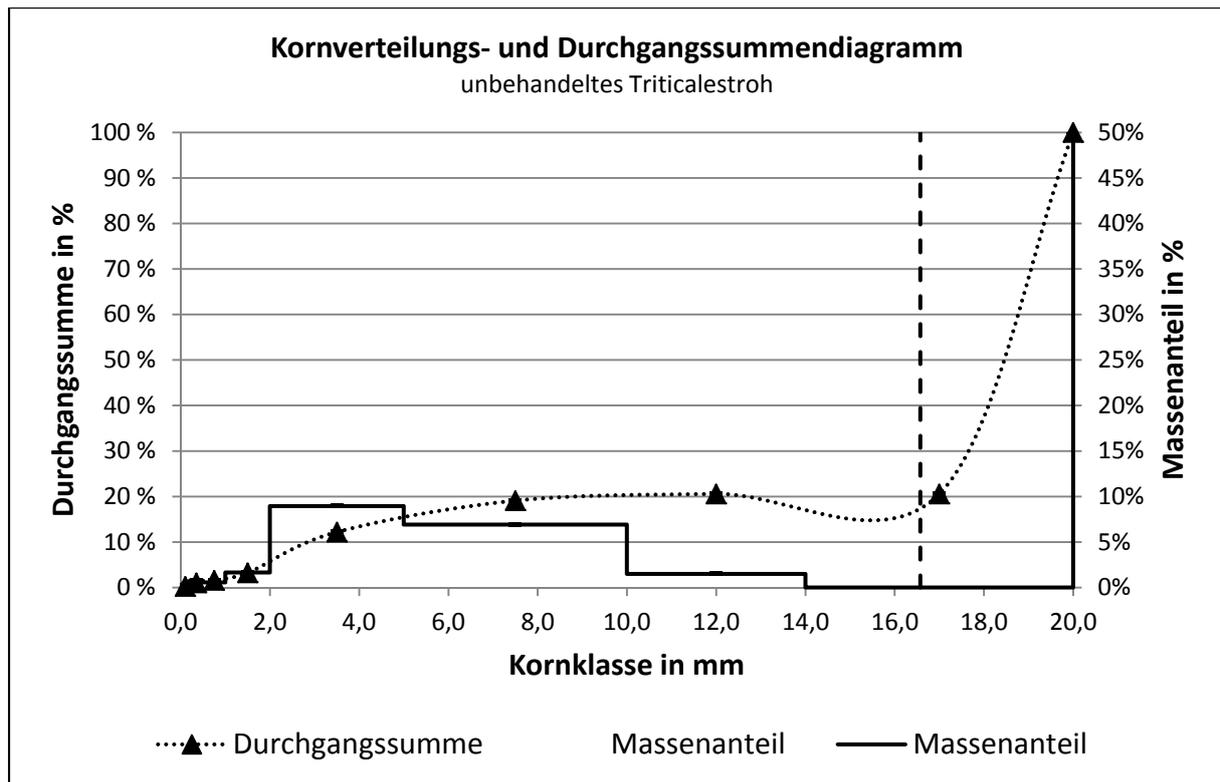


Abbildung 5-7: Kornverteilungs- und Durchgangssummendiagramm für unbehandeltes Triticalestroh (Trockensiebung)

Der Modalwert stellt eine Möglichkeit dar, die Siebanalysen auszuwerten und miteinander zu vergleichen. Durch die teilweise bimodale Verteilung ist dies jedoch nur eingeschränkt möglich. Eine Alternative dazu ist der direkte Vergleich der Kornverteilungen. Dazu zeigt Abbildung 5-8 beispielhaft die Massenanteile der Siebrückstände für drei Triticalestrohproben, die über die drei Siebe (5, 10 und 20 mm) zerkleinert wurden. Durch diese Form der Darstellung der Ergebnisse aus den Siebanalysen lassen sich die Verschiebungen innerhalb der Kornklassen aufgrund der unterschiedlichen Einstellungen am Prallreaktor gut zeigen. Ergänzend wurden auch die mittleren Partikelgrößen der drei Proben eingezeichnet. Zur Bestimmung der mittleren Partikelgröße werden alle vorkommenden Partikelgrößen mit dem entsprechenden Mengenanteil gewichtet und gemittelt. Durch den Vergleich der mittleren Partikelgröße lässt sich dann die Feinheit der unterschiedlichen Proben bewerten. [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 2004]

Als weiteres Beispiel zeigt Abbildung 5-9 die Massenanteile der Siebrückstände für vier Triticalestrohproben, die sich bei den Einstellungen nur hinsichtlich des Durchsatzes unterscheiden. Die jeweiligen Anteile der einzelnen Fraktionen liegen hier dicht beieinander und lassen eindeutige Zusammenhänge oder Tendenzen allein mit Hilfe dieser Darstellung nur schwer erkennen.

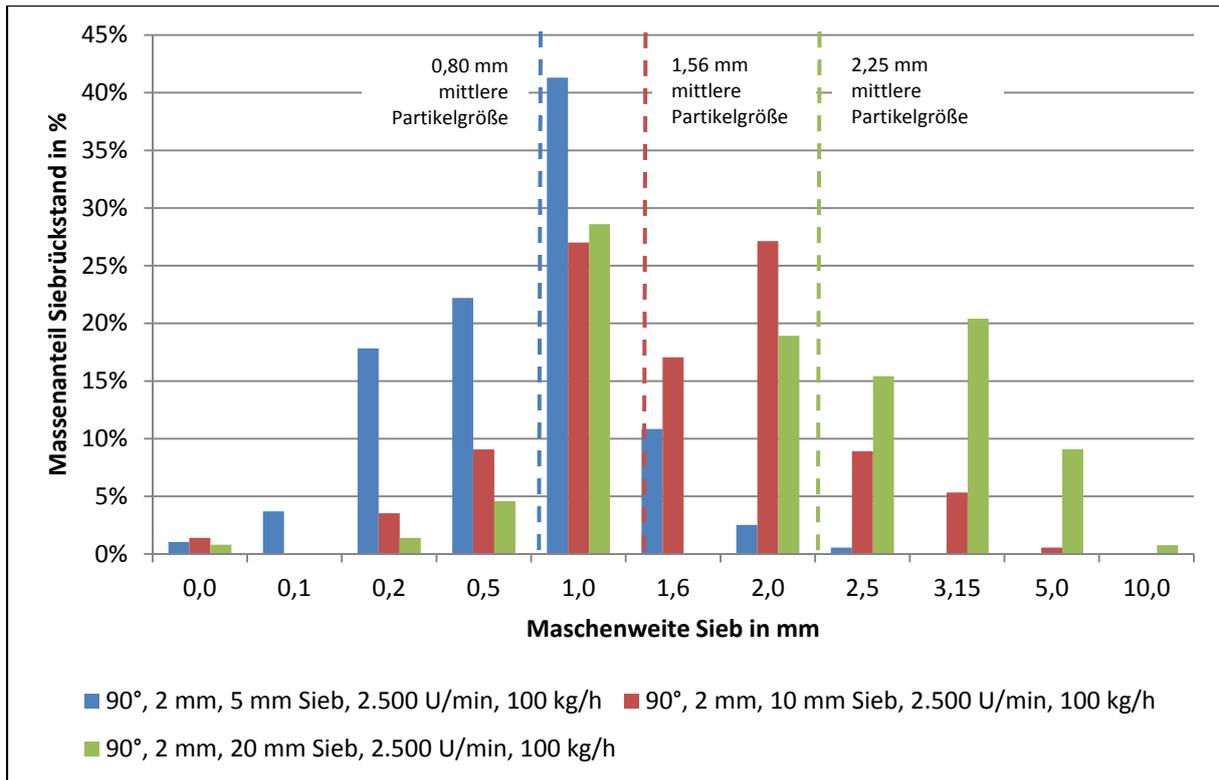


Abbildung 5-8: Kornverteilungsdigramm für über 5, 10 und 20 mm Sieb zerkleinertes Triticalestroh (Trockensiebung)

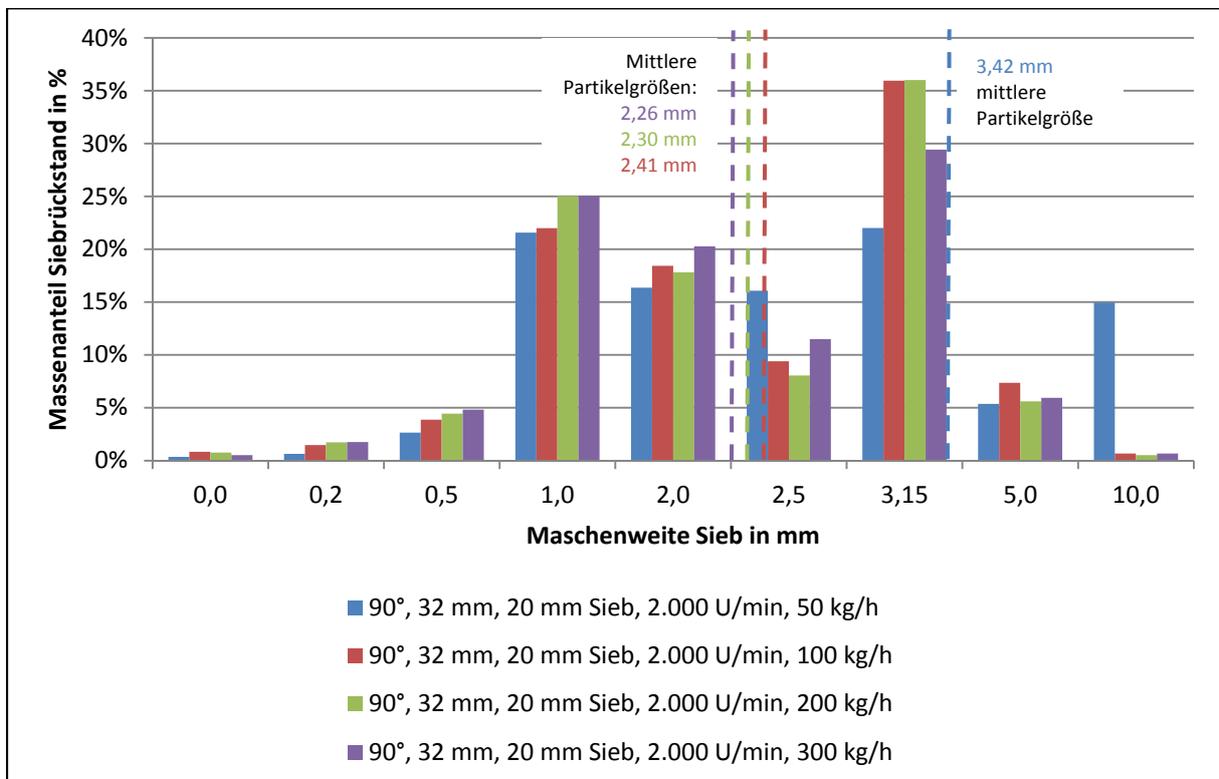


Abbildung 5-9: Kornverteilungsdigramm für Triticalestroh bei verschiedenen Durchsätzen (Trockensiebung)

Durch die mittlere Partikelgröße wird die Aussage über die Feinheit der Proben zwar vereinfacht, jedoch können die einzelnen Proben dadurch besser verglichen werden. In diesem Beispiel lässt sich erst über die mittlere Partikelgröße die Tendenz heraus lesen, dass bei steigenden Durchsätzen auch die Feinheit im zerkleinerten Material zunimmt. Daher wurde für die weitere Auswertung der Siebanalysen auf die mittlere Partikelgröße zurückgegriffen.

In Abbildung 5-5, Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 wurde die mittlere Partikelgröße bereits eingezeichnet. Abbildung 5-10 zeigt die mittleren Partikelgrößen aus den Siebanalysen der ersten Versuchsreihe für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz. Dazu wurden die Einstellungen Siebweite und Drehzahl gekennzeichnet. Es fällt die klare Abgrenzung der mittleren Partikelgröße in Abhängigkeit von der Siebweite auf. So liegt diese für das 5 mm Sieb zwischen 0,8 und 1,2 mm, für das 10 mm Sieb zwischen 1,3 und 1,8 mm und für das 20 mm Sieb über 2,0 mm. Während die Intervalle der mittleren Partikelgrößen für die beiden feinen Siebe ähnlich groß sind, streuen die mittleren Partikelgrößen beim 20 mm Sieb von 2,0 mm bis 6,7 mm deutlicher. Darüber hinaus ist eine Abhängigkeit der mittleren Partikelgröße von der Drehzahl nicht auszumachen.

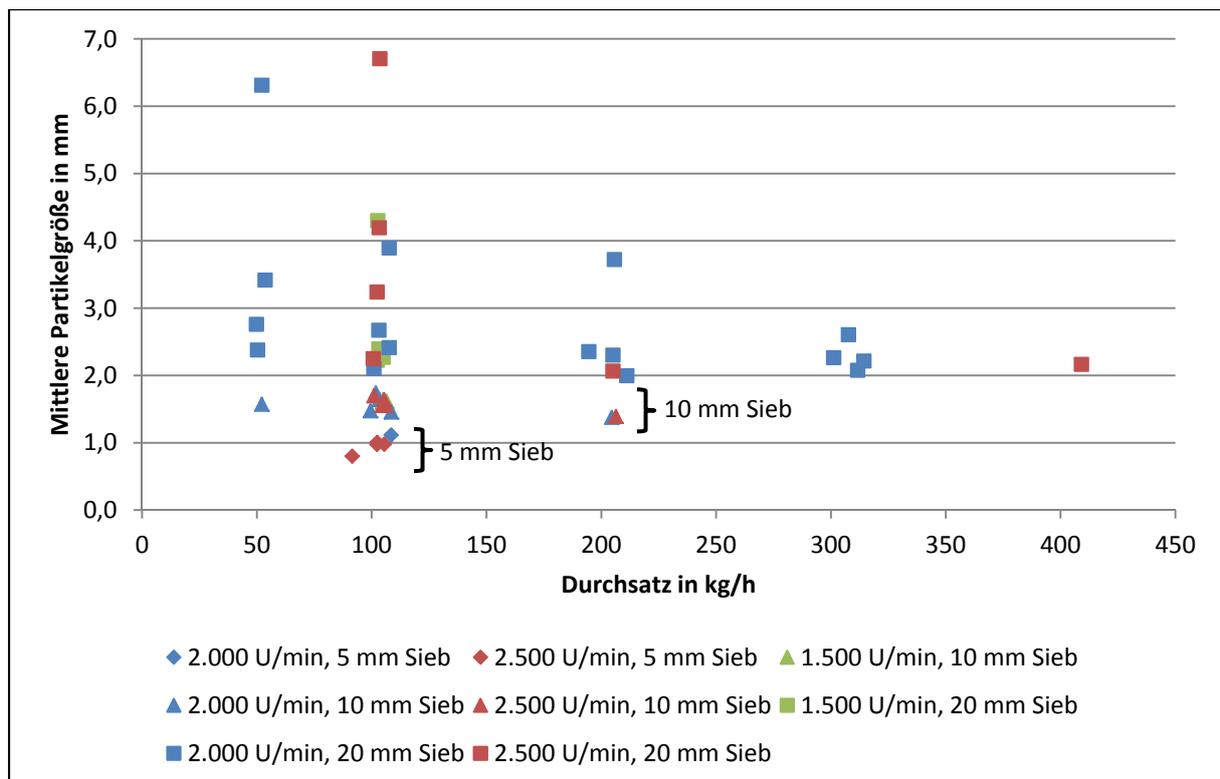


Abbildung 5-10: Auswertung der mittleren Partikelgröße aus den Siebanalysen für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz (Trockensiebung)

Die Darstellung der mittleren Partikelgröße in Abhängigkeit vom Durchsatz für die einzelnen Rotorkombinationen ist Anhang 1 zu entnehmen. Anhand dieser Auswertung lässt sich die

Tendenz erkennen, dass bei höheren Durchsätzen die mittlere Partikelgröße sinkt. Dies kann man auch aus Abbildung 5-11 ablesen, die die mittlere Partikelgröße in Abhängigkeit vom Durchsatz für die Siebweite von 20 mm am Prallreaktor zeigt. Zudem erkennt man zum Teil eine größere mittlere Partikelgröße bei niedrigeren Durchsätzen.

Darüber hinaus gewinnt man den Eindruck, dass im Vergleich der vier verschiedenen Rotorkombinationen der 90°-Rotor mit einem Siebabstand von 2 mm die kleinsten mittleren Partikelgrößen produziert. Dieser Eindruck bestätigt sich durch die Auswertung der mittleren Partikelgröße in Abhängigkeit vom Siebabstand für einen Durchsatz von 100 kg/h in Abbildung 5-12. Während bei dieser Rotorkombination die mittleren Partikelgrößen bei allen drei verwendeten Siebweiten für die drei verschiedenen Drehzahlen eng zusammen liegen, weichen diese bei den anderen Rotorkombinationen bei einer Siebweite von 20 mm und insbesondere bei 2.500 U/min zum Teil erheblich ab. Vor allem beim 60°-Rotor und den beiden Siebabständen von 53 mm und besonders deutlich bei 8 mm ergeben sich bei höheren Drehzahlen größere mittlere Partikelgrößen.

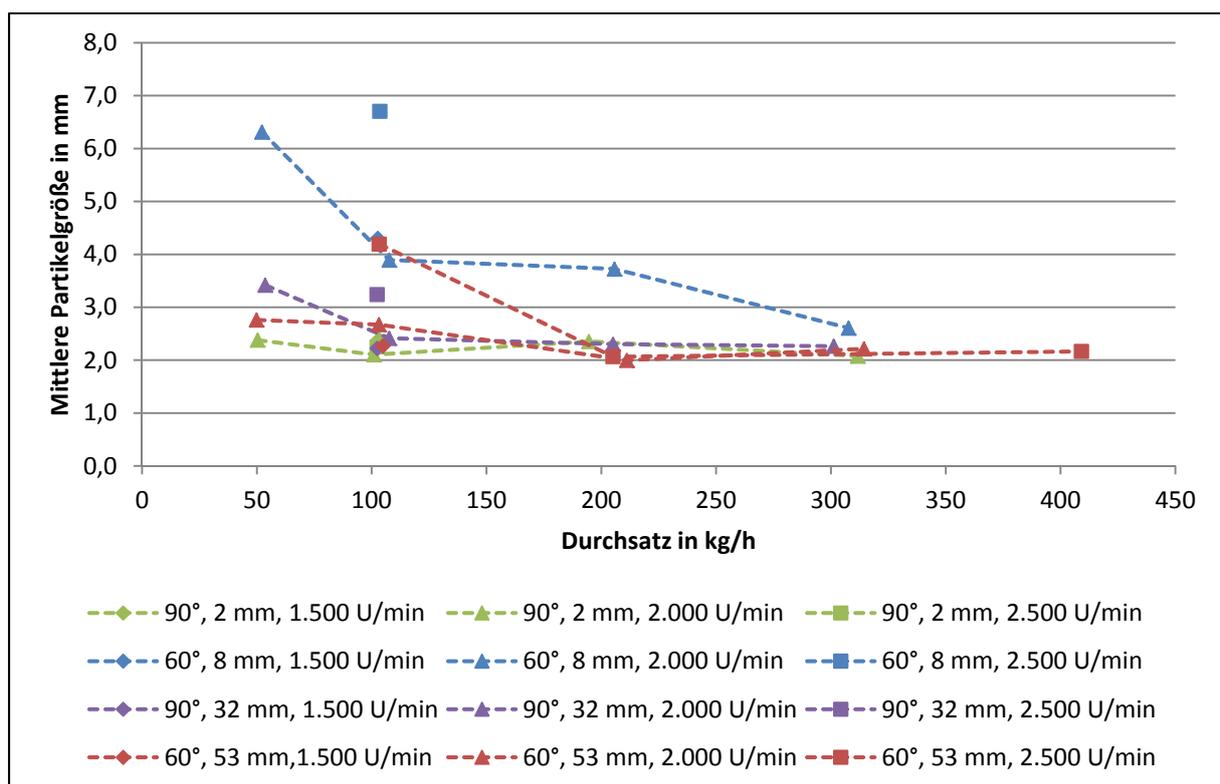


Abbildung 5-11: Auswertung der mittleren Partikelgröße aus den Siebanalysen für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz (Einstellung: 20 mm Sieb - Erläuterung Legende: Anstellwinkel Rotor, Abstand Rotor zu Siebmitte, Drehzahl - Trockensiebung)

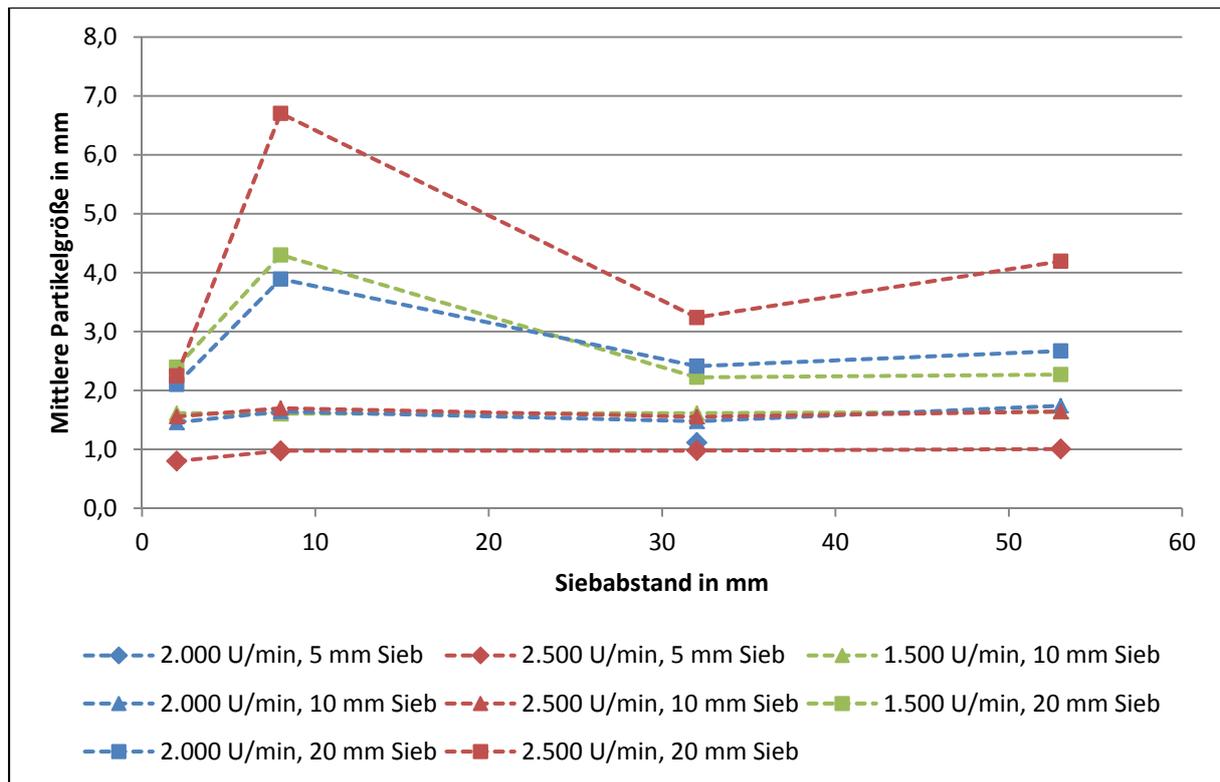


Abbildung 5-12: Auswertung der mittleren Partikelgröße aus den Siebanalysen für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Siebabstand (Einstellung: 100 kg/h Durchsatz - Trockensiebung)

### 5.3.3 Auswertung der Siebanalysen anhand der Verteilungsfunktion nach Rosin, Rammler, Sperling und Bennett (RRSB)

Eine weitere Möglichkeit zur Darstellung und Kennzeichnung einer gemessenen Verteilung ist die Näherung durch eine formelmäßig angegebene Funktion. Vorteil einer solchen Auswertung ist, dass die jeweiligen Funktionsparameter einen Rückschluss auf die ursprüngliche Verteilung zulassen. Nachteil ist, dass es sich bei den Verteilungsfunktionen nur um Näherungen handelt. Die drei verbreitetsten Verteilungsfunktionen sind die Potenzfunktion, die logarithmische Normalverteilungsfunktion und die RRSB-Funktion nach Rosin, Rammler, Sperling und Bennett. Alle drei aufgezählten Funktionen sind durch die DIN-Normen 66143 „Potenznetz“, 66144 „Logarithmisches Normalverteilungsnetz“ und 66145 „RRSB-Netz“ beschrieben. Sie haben gemeinsam, dass die Verteilungssumme in ihrem jeweiligen Netz eine Gerade ergibt. [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1974a, 1974b, 1976; STIEß 2009]

Beim Vergleich der Verteilungssummenkurven aus den durchgeführten Siebanalysen mit typischen Kurvenverläufen der drei Verteilungsfunktionen in Abbildung 5-13, zeigt die RRSB-Funktion die größte Ähnlichkeit. Daher wird im Anschluss die Auswertung der Siebanalysen anhand der RRSB-Verteilungsfunktion beschrieben.

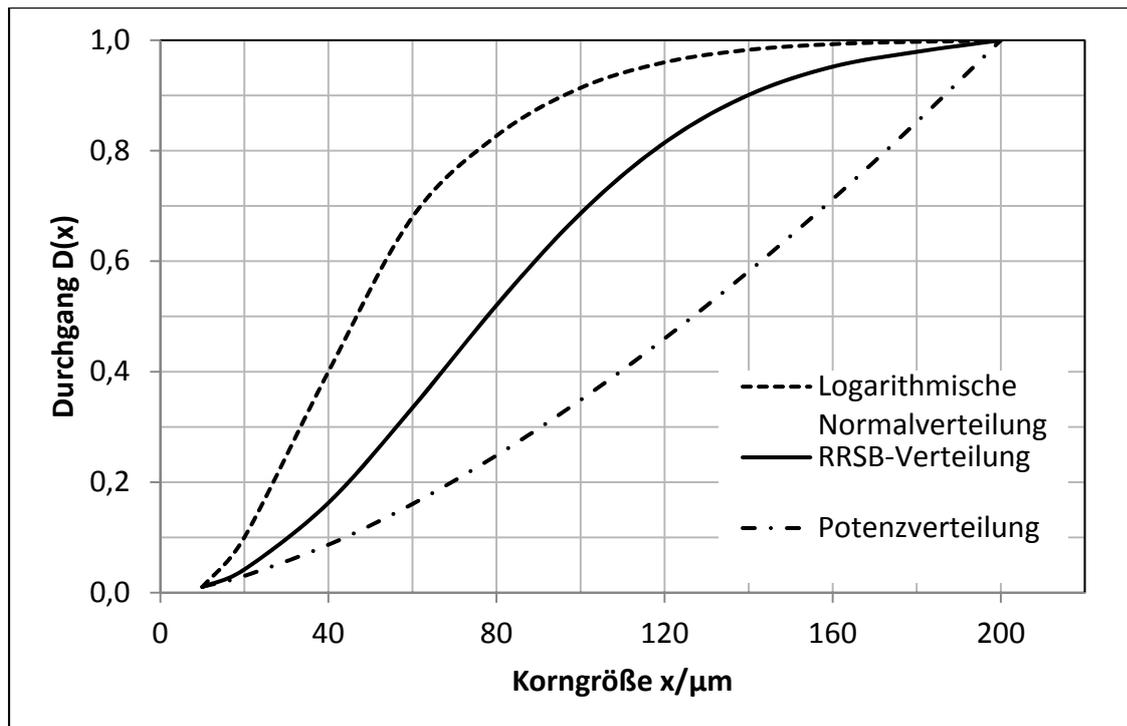


Abbildung 5-13: Vergleich der drei genormten Verteilungsfunktionen (nach STIEB 2009)

Die RRSB-Verteilungsfunktion wurde von den vier Autoren Rosin, Rammler, Sperling und Bennett entwickelt und nach ihnen benannt. Sie ist in der Norm DIN 66145 „RRSB-Netz“ beschrieben. In Formel 5-2 ist die RRSB-Verteilung als Funktion der Durchgangssumme dargestellt. [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1976]

Formel 5-2: RRSB-Verteilungsfunktion der Durchgangssumme [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1976]

$$D(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x'}\right)^n}$$

Hier bedeuten:

$D(x)$ : Durchgang, Massenverteilungssumme

$x$ : Korn-Äquivalentdurchmesser

$x'$ : Abszisse zu  $D = 0,632$

$n$ : Steigung der RRSB-Geraden

Durch Umformen und zweimaliges Logarithmieren von Formel 5-2 erhält man Formel 5-3.

Formel 5-3: Umgeformte RRSB-Verteilungsfunktion [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1976]

$$\lg \lg \frac{1}{1 - D(x)} = n \cdot \lg x - n \cdot \lg x' + \lg \lg e$$

Mit dieser Gleichung stellt sich die Verteilung im entsprechenden RRSB-Netz als Gerade dar. Die Gerade wird durch die Steigung  $n$  und die Abszisse  $x'$  gekennzeichnet. Für  $x = x'$  wird  $D(x')$  zu  $1 - e^{-1} = 0,632$ ,  $x'$  ist also der Korn-Äquivalentdurchmesser bei einem Durchgang von 0,632 bzw. 63,2 %. [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1976] Abbildung 5-14 zeigt beispielhaft die RRSB-Verteilungsfunktion für eine geprallte Triticalestrohprobe.

Zur Auswertung der Siebanalysen wurden die Feinheitsparameter  $n$  und  $x'$ , auch Lageparameter genannt, aus den RRSB-Verteilungsfunktionen bestimmt und miteinander verglichen. Dadurch können Aussagen zur Effektivität der Zerkleinerung im Prallreaktor hinsichtlich der Feinheit des Materials getroffen werden. Für die aus den Siebanalysen der Triticalestrohproben resultierenden RRSB-Verteilungsfunktionen zeigt Abbildung 5-15 dazu die Steigungen  $n$  und Abbildung 5-16 die Lageparameter  $x'$  jeweils in Abhängigkeit vom Durchsatz.

Die Steigung  $n$  ist ein Maß für die Steilheit der RRSB-Verteilungsfunktion. Je höher der Wert für die Steigung  $n$ , desto steiler die RRSB-Verteilungsfunktion und desto enger die Partikelgrößenverteilung. Aus den Ergebnissen lässt sich lediglich die Tendenz erkennen, dass sich beim 20 mm Sieb größere Steigungen ergeben als bei den feineren Sieben. Darüber hinaus lassen sich jedoch keine Abhängigkeiten oder Tendenzen in Verbindung mit den untersuchten Einstellungen herausarbeiten. Daher wird die Steigung  $n$  der RRSB-Verteilungsfunktion im Verlauf dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

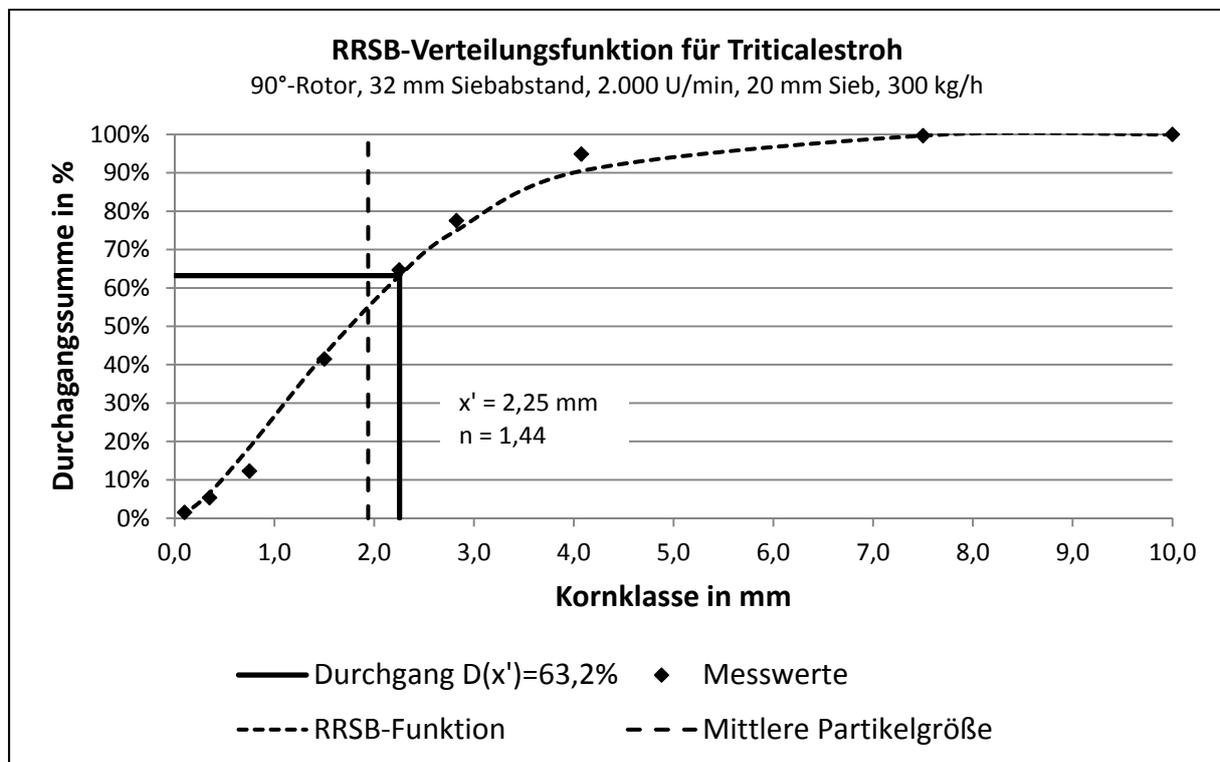


Abbildung 5-14: Beispiel einer RRSB-Verteilungsfunktion für gepralltes Triticalestroh (Trockensiebung)

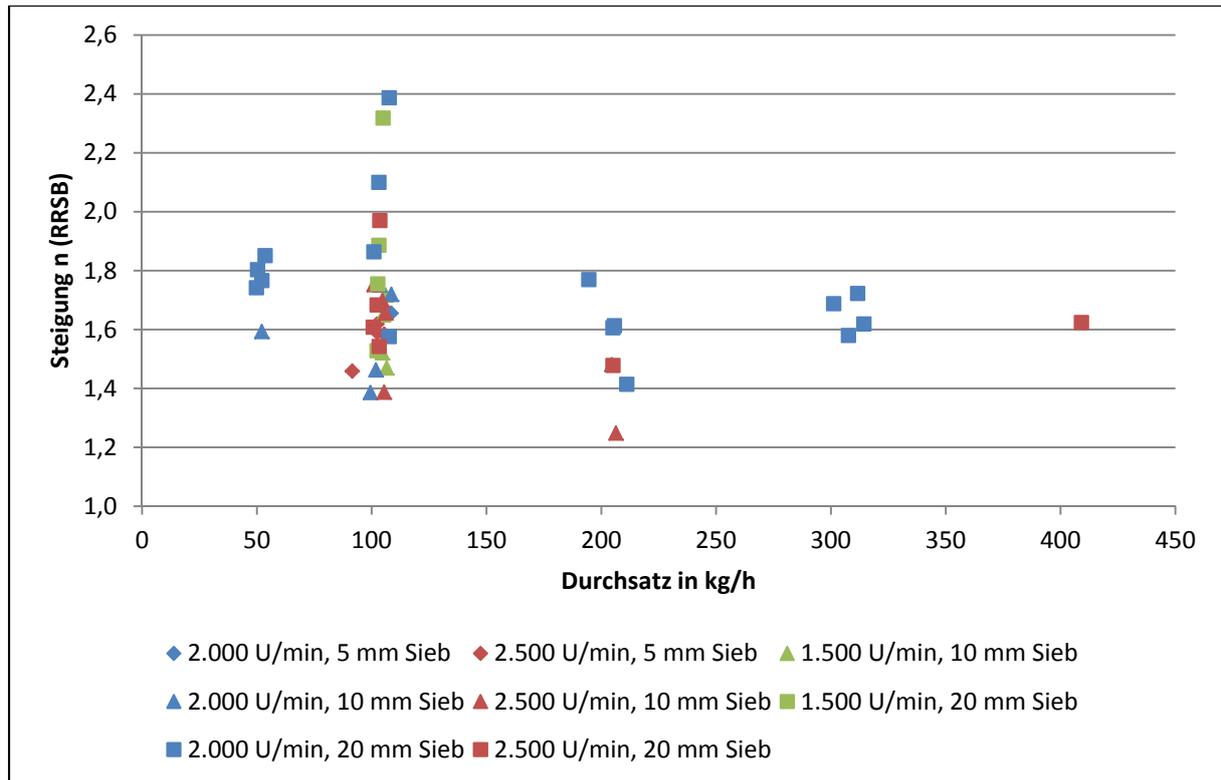


Abbildung 5-15: Ergebnis der Siebanalysen (Trockensiebung) für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz hinsichtlich der Steigung n

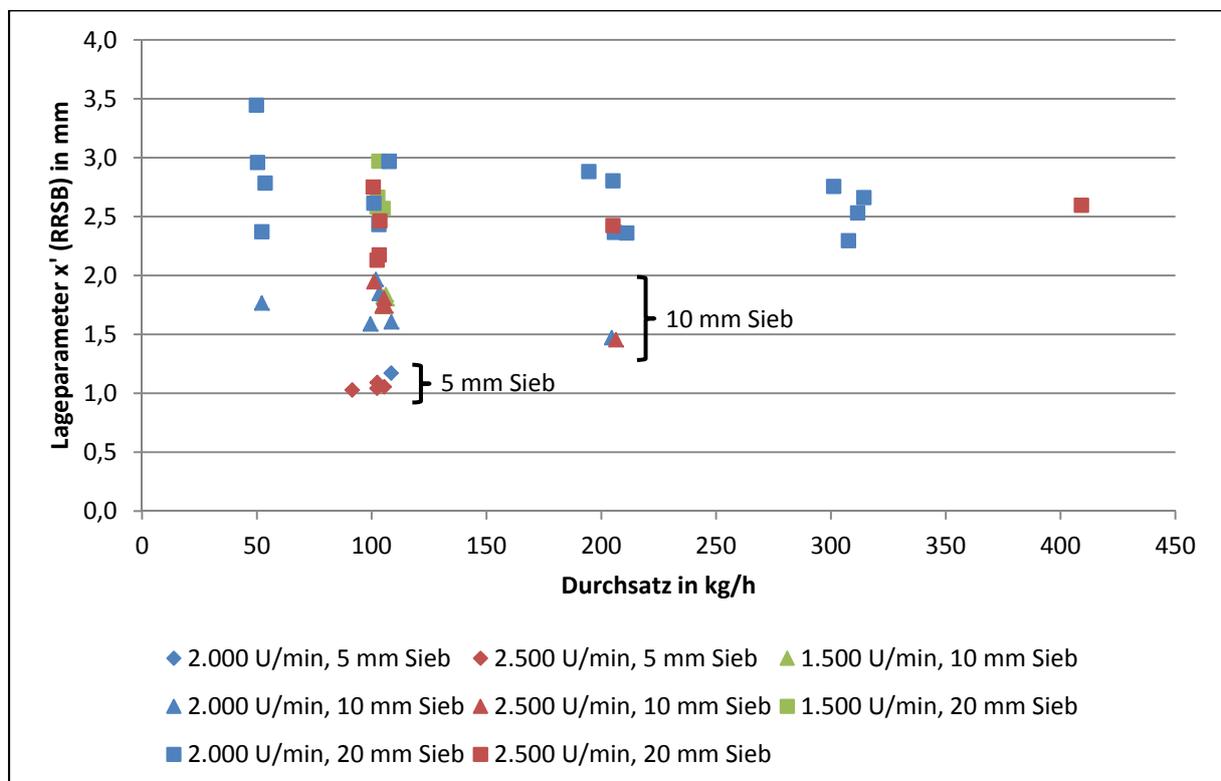


Abbildung 5-16: Ergebnis der Siebanalysen (Trockensiebung) für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz hinsichtlich dem Lageparameter x'

Wie bei der mittleren Partikelgröße, grenzen sich auch beim Lageparameter  $x'$  die Ergebnisse für die drei Siebweiten klar voneinander ab. Beim 5 mm Sieb liegen die Werte für  $x'$  zwischen 1,0 und 1,2 mm, beim 10 mm Sieb zwischen 1,4 und 2,0 mm und beim 20 mm Sieb zwischen 2,1 und 3,5 mm. Damit liegen die Werte für  $x'$  etwas über den Werten der mittleren Partikelgröße. Vor allem hat die Streuung der Werte beim 20 mm Sieb abgenommen, was mit der ausgleichenden Wirkung der RRSB-Verteilungsfunktion begründet werden kann. Ebenfalls ist keine Abhängigkeit von der Drehzahl erkennbar.

Abbildung 5-17 zeigt die Ergebnisse zum Lageparameter  $x'$  in Abhängigkeit vom Durchsatz für die Zerkleinerungsversuche mit Triticalestroh bei einer Siebweite von 20 mm und Abbildung 5-18 in Abhängigkeit vom Siebabstand bei einem Durchsatz von 100 kg/h. Beide Darstellungen lassen keine Schlüsse auf weitere Abhängigkeiten von  $x'$  hinsichtlich der Einstellungen beim Prallreaktor zu. Die Erkenntnisse aus den Werten über die mittlere Partikelgröße können somit auch nicht bestätigt werden. Die Darstellung der Lageparameter  $x'$  in Abhängigkeit vom Durchsatz für die einzelnen Rotorkombinationen ist Anhang 2 zu entnehmen.

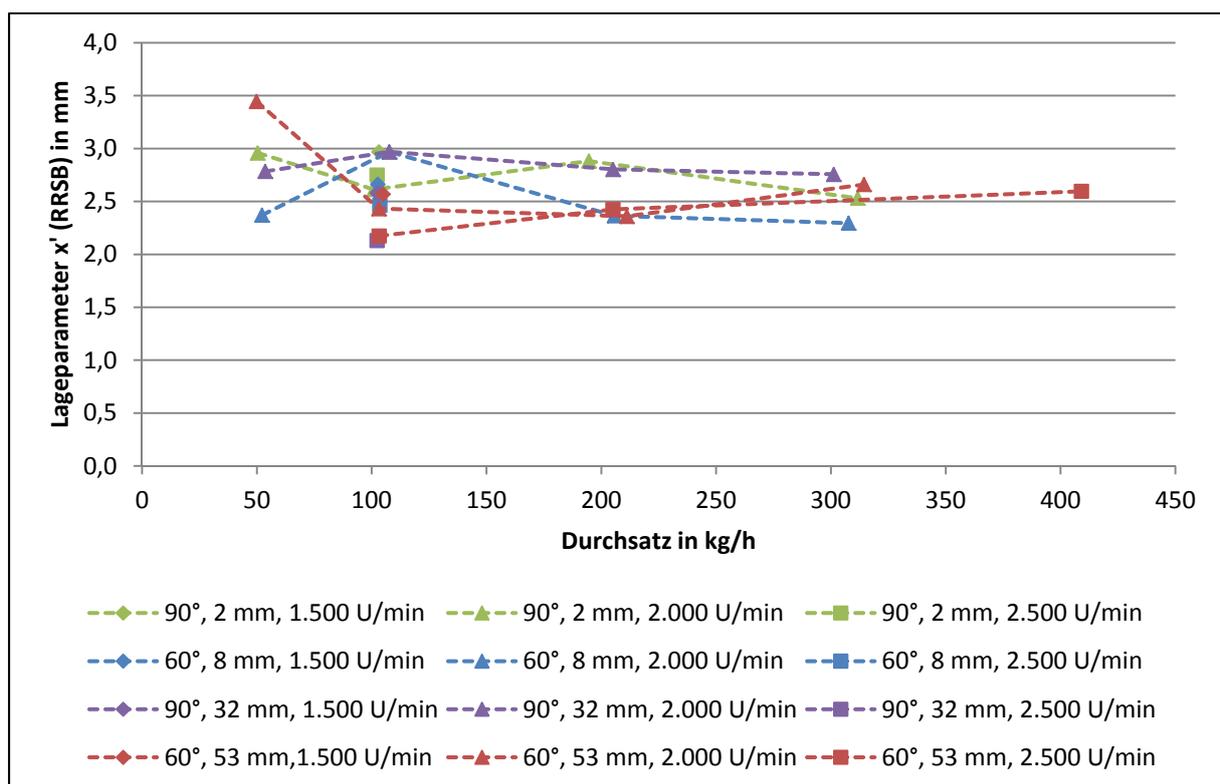


Abbildung 5-17: Ergebnis der Siebanalysen (Trockensiebung) für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz hinsichtlich dem Lageparameter  $x'$  beim 20 mm Sieb (Erläuterung Legende: Anstellwinkel Rotor, Abstand Rotor zu Siebmitte, Drehzahl)

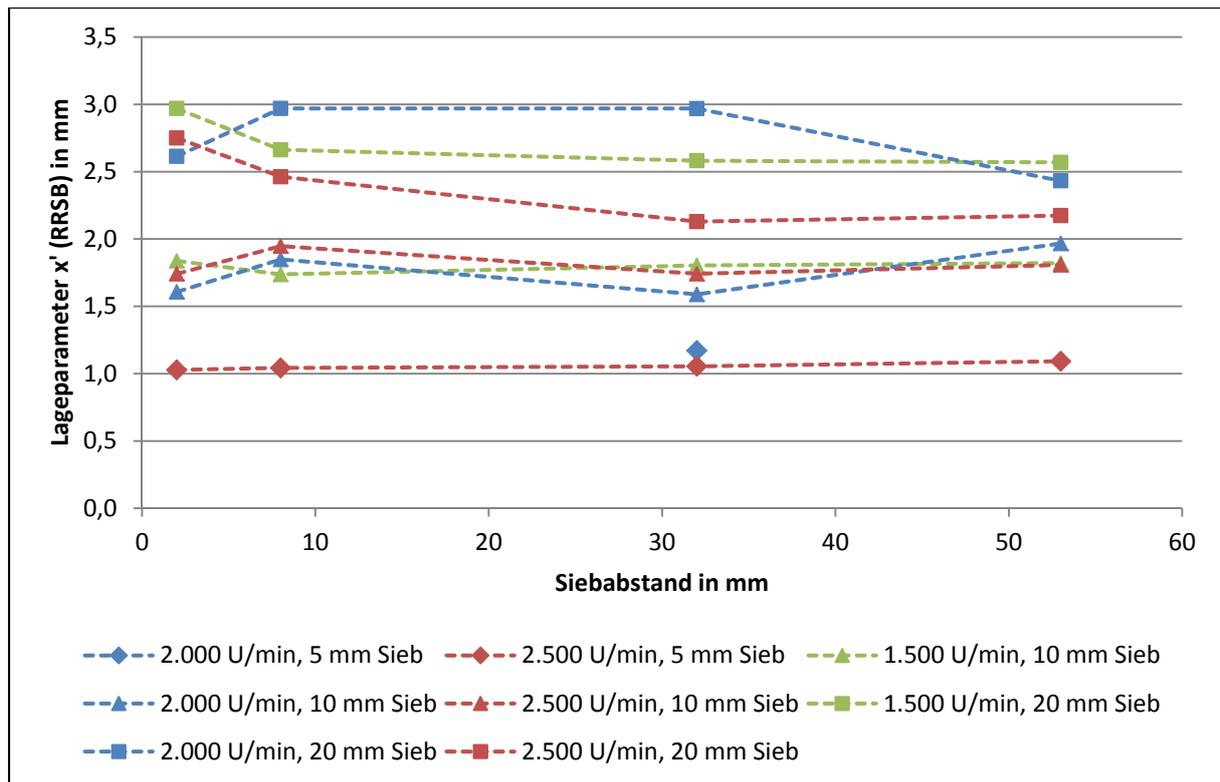


Abbildung 5-18: Ergebnis der Siebanalysen (Trockensiebung) für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Siebabstand hinsichtlich dem Lageparameter  $x'$  bei einem Durchsatz von 100 kg/h

Wie zu erwarten war, wurden mit kleineren Sieben auch feinere Partikelgrößenverteilungen erzeugt. Gleichzeitig war dies auch der größte Einflussfaktor, was durch die klare Abgrenzung bei den mittleren Partikelgrößen in den Proben für die jeweiligen Siebgrößen deutlich wurde. Daneben wurden, ebenfalls zu erwarten, mit höheren Durchsätzen feinere Partikelgrößenverteilungen erzielt. Darüber hinaus hatten bei den Einstellungen geringe Abstände zwischen Prallelement und Siebmitte, ein Anstellwinkel von  $90^\circ$  beim Rotor sowie eine eher niedrige Drehzahl in der Tendenz positive Effekte auf die Feinheit des zerkleinerten Triticalestrohs. Für eine abschließende Bewertung der Effizienz der Zerkleinerung hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung wird die Auswertung unter Berücksichtigung von Stromverbrauch und Methanertrag in Kapitel 6 fortgeführt.

### 5.3.4 Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe mit verschiedenen Substraten

Auch für die Proben aus der zweiten Versuchsreihe mit allen vier Substraten wurden Siebanalysen durchgeführt und hinsichtlich mittlerer Partikelgröße, Lageparameter  $x'$  und Steigung  $n$  ausgewertet. Abbildung 5-19 zeigt die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe für Triticalestroh und zum Vergleich die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe, soweit vorhanden. Bis auf den Ausreißer beim 20 mm Sieb sind die Ergebnisse aus beiden Versuchsreihen ver-

gleichbar. Auch bei den in der ersten Versuchsreihe festgestellten Tendenzen und Abhängigkeiten ergeben sich keine neuen Erkenntnisse.

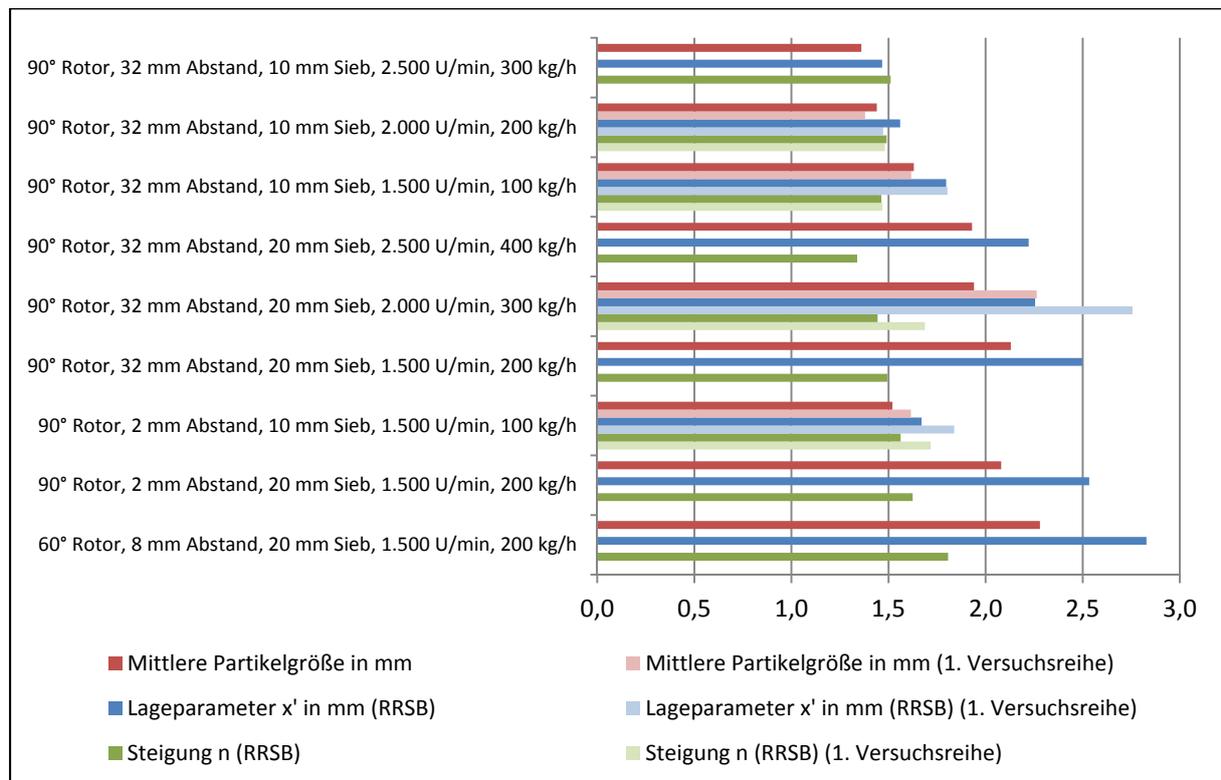


Abbildung 5-19: Ergebnis der Siebanalysen (Trockensiebung) für Triticalestroh aus der zweiten Versuchsreihe

Wie beim Triticalestroh werden auch beim Maisstroh die kleinsten mittleren Partikelgrößen und Lageparameter  $x'$  bei einer Siebweite von 5 mm erzeugt. Zudem bringt der kleinere Siebabstand von 2 mm gegenüber 32 mm ebenfalls einen Vorteil bei der Materialfeinheit. Somit ist davon auszugehen, dass sich auch die weiteren Erkenntnisse aus den Zerkleinerungsversuchen mit Triticalestroh hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung auf Maisstroh übertragen lassen. Dazu zeigt Abbildung 5-20 die Ergebnisse der Siebanalysen für Maisstroh.

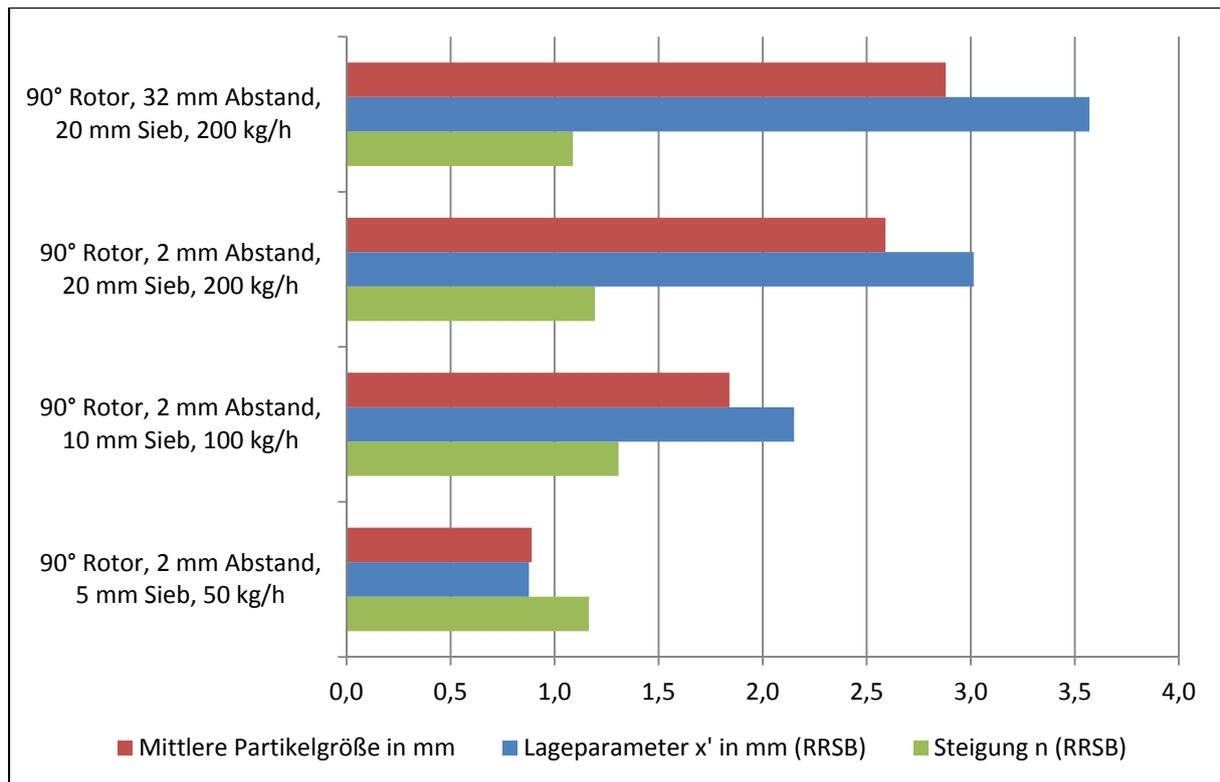


Abbildung 5-20: Ergebnis der Siebanalysen (Trockensiebung) für Maisstroh (Drehzahl: 1.500 U/min)

Von Hafer-GPS wurden aufgrund der Vielzahl an Proben nur für die aus der zweiten Versuchsreihe Siebanalysen durchgeführt. Abbildung 5-21 zeigt die Ergebnisse der Nasssiebanalyse für Hafer-GPS mit der unbehandelten Probe. Durch das vorangegangene Häckseln des Hafers war eine normgerechte Durchführung ausschließlich bei diesem Substrat möglich. Bemerkenswert ist der positive Einfluss der niedrigeren Drehzahl auf eine feinere Partikelgrößenverteilung. Die weiteren drei Einstellungskombinationen sind hinsichtlich der mittleren Partikelgröße gleich zu werten, jedoch hat bei Betrachtung des Lageparameters  $x'$  die Einstellung mit dem Anstellwinkel von  $90^\circ$  einen positiven Einfluss.

Abbildung 5-22 schließlich zeigt die Ergebnisse der Nasssiebanalyse für Pferdemist. Danach sind höhere Drehzahlen und ein größerer Siebabstand in Verbindung mit höheren Durchsätzen positiv für die Partikelgrößenverteilung.

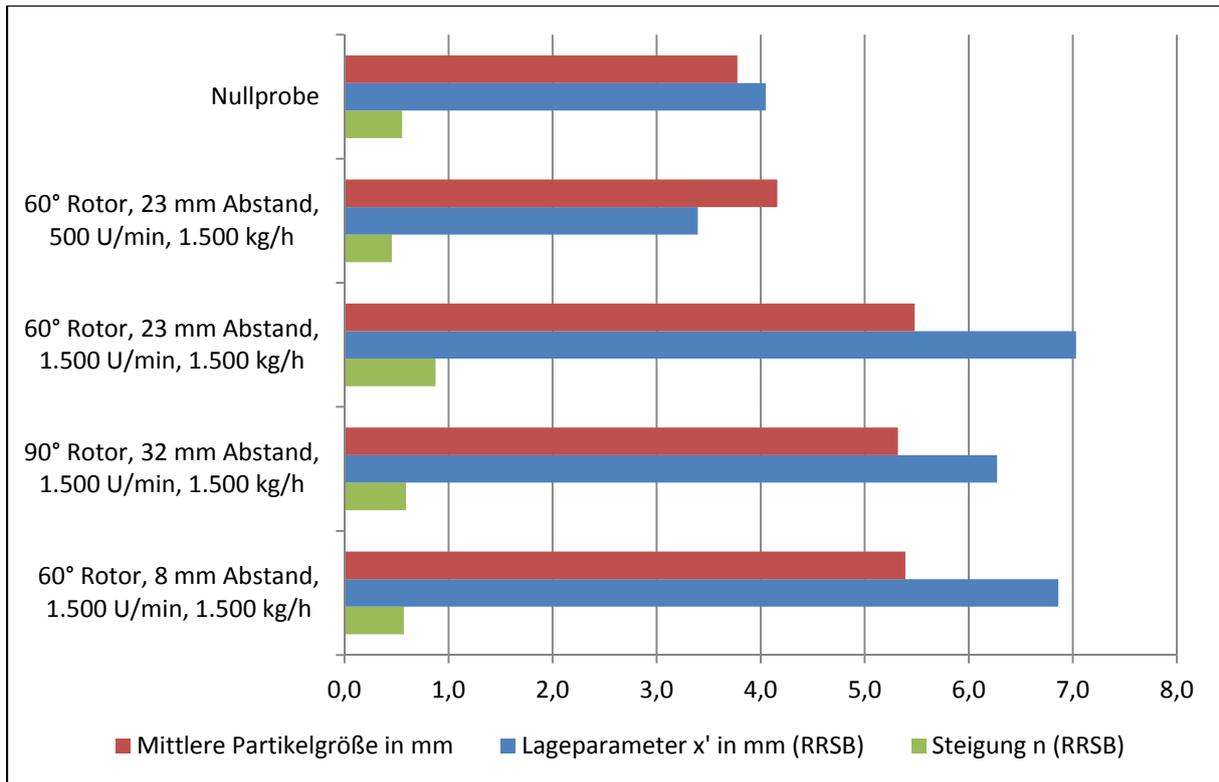


Abbildung 5-21: Ergebnis der Siebanalysen (Nasssiebung) für Hafer-Ganzpflanzensilage

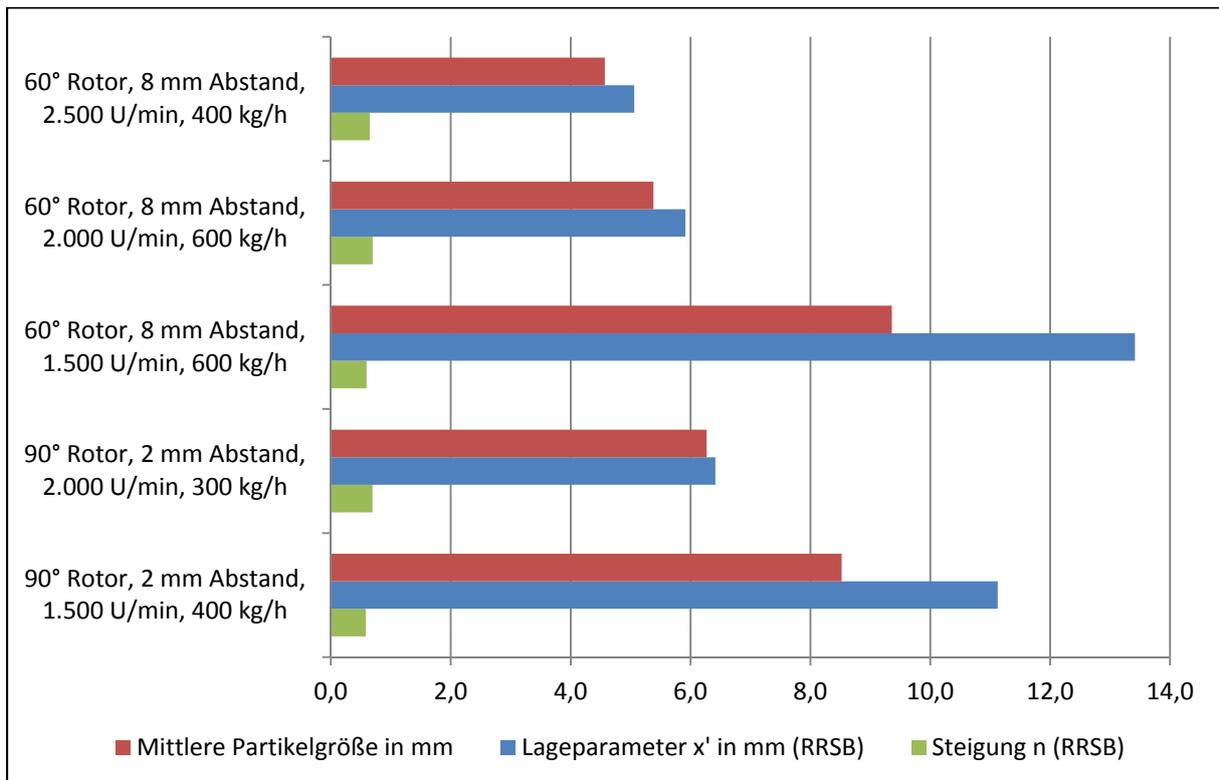


Abbildung 5-22: Ergebnis der Siebanalysen (Nasssiebung) für Pferdemist

## 5.4 Ermittlung der Biogaserträge

Ein möglicher Mehrertrag an Biogas ist der entscheidende Effekt zur Bewertung des Erfolgs der Vorbehandlung. Dazu wurde die Bestimmung der Biogaspotenziale mit Eudiometer-Versuchsständen im Batch-Test nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie 4630 „Vergärung organischer Stoffe“ [VDI-GESELLSCHAFT ENERGIE-TECHNIK 2006, 2014] durchgeführt. Diese Untersuchungsmethode wurde gewählt, da nur auf diese Weise der Einfluss der Vorbehandlung auf das Biogaspotenzial bestimmt werden kann. Neben dem Biogasertrag ermöglicht der Eudiometerversuch auch eine qualitative Beurteilung der Abbaugeschwindigkeit, bzw. der Kinetik des anaeroben Abbaus. Dazu werden in diesem Kapitel die Durchführung der Biogaspotenzialbestimmung beschrieben und die Ergebnisse dargestellt.

Eine Berechnung über die Inhaltsstoffe anhand der Weender-Futtermittelparmeter, wie zum Beispiel nach BASERGA [1998] oder WEIßBACH [2008], scheidet aus, da durch die Zerkleinerung nur die Verfügbarkeit für einen anaeroben Abbau verändert wird. Die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe ändert sich durch die Zerkleinerung jedoch nicht. Auch der Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) wurde nicht in Erwägung gezogen, da für dieses Verfahren das Material zuvor feingemahlen wird [HELFFRICH ET AL. 2003]. Dadurch wären die möglichen Effekte aufgrund der erneuten mechanischen Vorbehandlung aufgehoben worden.

### 5.4.1 Durchführung der Batch-Versuche

Für die Bestimmung der Biogaspotenziale wurden die Eudiometer-Versuchsstände des Labors für Umwelttechnik der FH Münster genutzt. Aufbau und Durchführung dieses Verfahrens wurde von KERKERING [2014] ausführlich beschrieben und entspricht den Vorgaben der VDI Richtlinie 4630 „Vergärung organischer Stoffe“ [VDI-GESELLSCHAFT ENERGIE-TECHNIK 2006; 2014]. Abbildung 5-23 zeigt den Eudiometer-Versuchsstand zur Biogaspotenzialbestimmung.

Die Untersuchungen wurden über einen Zeitraum von 42 Tagen mit je drei Wiederholungen durchgeführt. Dabei wurden die einen Liter fassenden Gärflaschen in einem Thermoölbad auf eine konstante Temperatur von 40 °C gehalten. Als Impfmateriale wurde ausgefauter Gärrest aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage und als Standardsubstrat mikrokristalline Cellulose verwendet. Das entstandene Biogas wurde mittels Infrarot-Spektroskopie mit einem Handanalyse-Gerät (Sewerin Multitec 540) analysiert. Dieses wurde wöchentlich mit Prüfgas geprüft und bei Bedarf kalibriert. Zudem wird das Gasmessgerät jährlich durch den Hersteller gewartet. Abgezogen und analysiert wurde das Biogas, sobald eine ausreichende Menge für

eine Messung entstanden war sowie am Ende der Untersuchungszeit. Ausgewertet und aufgetragen wurden die Versuche hinsichtlich des oTR-spezifischen Methanertrages. Die Einwaage an organischer Trockenmasse des Impfmaterials wurde mit 10 g oTR doppelt so hoch gewählt wie die der untersuchten Substrate mit 5 g oTR. Diese Mengen hatten sich bereits bei früheren Gärversuchen von landwirtschaftlichen Substraten bewährt. Als Parameter zur Überprüfung der Qualität des Impfschlammes wurde bei allen Ansätzen als Standardsubstrat Cellulose mit untersucht. Bei Abweichungen des Methanertrages der Cellulose von mehr als 5 % wurde der Methanertrag der Proben entsprechend korrigiert.



Abbildung 5-23: Eudiometer-Versuchsstand zur Biogaspotenzialbestimmung

Durch die erfolgreiche Teilnahme an den vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) sowie der Landesanstalt für Landwirtschaft in Bayern (LfL) durchgeführten Ringversuchen wurde die Qualität der Ergebnisse der Eudiometer-Versuchsstände auch während der Anfertigung dieser Arbeit gesichert.

#### **5.4.2 Ergebnisse der Biogaspotenzialbestimmungen**

Für die Darstellung und Auswertung der Biogaspotenzialbestimmungen wird der auf den organischen Trockenrückstand bezogene Methanertrag herangezogen. Dies ermöglicht die

Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Untersuchungen. Im Verlauf des Kapitels werden die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen mit Triticalestroh und Hafer-Ganzpflanzensilage sowie der zweiten Versuchsreihe mit den beiden zusätzlichen Substraten Maisstroh und Pferdemist dargestellt.

### Ergebnisse zum Methanertrag bei Triticalestroh

In Abbildung 5-24 sind beispielhaft die Gasbildungskurven für die oTR-spezifischen Methan-gaserträge aus den Batch-Versuchen für unbehandeltes und gepralltes Triticalestroh über die Versuchsdauer aufgetragen. Dabei sind die Methanerträge als Summenkurve mit den Mittelwerten sowie den Fehlerbalken als Abweichung vom Mittelwert im dreifachen Ansatz dargestellt. Nach einer kurzen Anlaufphase (Lag-Phase) setzt der ungehemmte anaerobe Abbau mit Methangasbildung ein. Nach der schnellen Vergärung folgt ein langsamerer Abbau auf ein nahezu konstantes Gasniveau. Anhand dieser Darstellung wird der Mehrertrag an Methan durch die Vorbehandlung mit dem Prallreaktor deutlich. Auch für alle weiteren untersuchten Proben ergaben sich entsprechende Kurvenverläufe, die alle oberhalb der Gasbildungskurve für die unbehandelte Triticalestrohprobe liegen und keine Auffälligkeiten zeigten. Für die weiteren Auswertungen werden daher die absoluten Methanerträge herangezogen.

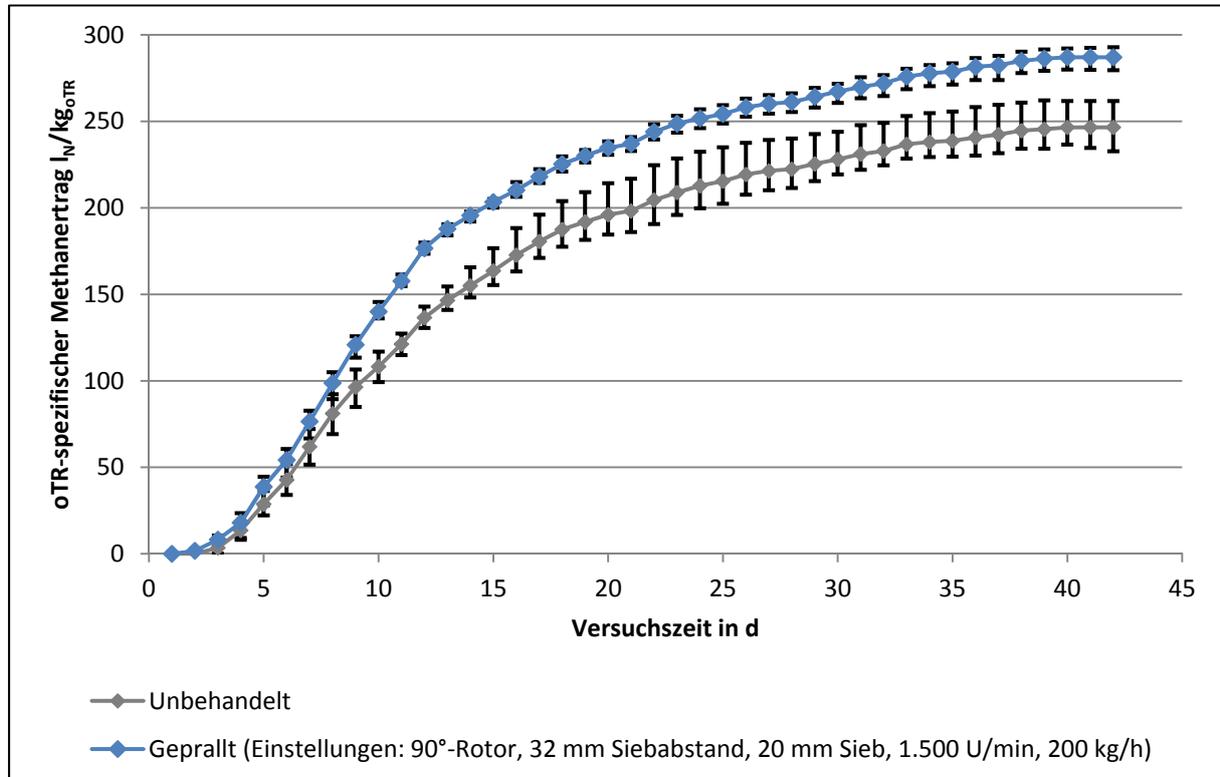


Abbildung 5-24: Gasbildungskurven für den oTR-spezifischen Methanertrag von unbehandeltem und gepralltem Triticalestroh

Aufgrund der Vielzahl an Zerkleinerungsversuchen und den begrenzten Kapazitäten zur Biogaspotenzialbestimmung wurde eine Vorauswahl der Proben vorgenommen. Dazu wurde der Durchsatz als Parameter mit der höchsten Variabilität herangezogen. So wurde für alle Versuche mit einem Durchsatz von 100 kg/h und für ausgewählte Kombinationen bei den Einstellungen auch für weitere Durchsätze das Biogaspotenzial bestimmt. Dadurch sollten trotzdem mögliche Abhängigkeiten ermittelt werden können. Abbildung 5-25 zeigt die spezifischen Methanerträge für die Einstellung 60°-Rotor mit 53 mm Abstand zwischen Parallellement und Siebmitte bei verschiedenen Drehzahlen und Siebweiten in Abhängigkeit vom Durchsatz. Die Diagramme für die drei weiteren Kombinationen aus Rotor und Siebabstand befinden sich in Anhang 3 der Arbeit.

Die Ergebnisse zeigen durchgehend Mehrerträge der zerkleinerten Proben gegenüber dem unbehandelten Triticalestroh. Bis zu 22 % mehr an Methan konnten dabei im besten Fall mit der Einstellung 60°-Rotor, 53 mm Siebabstand, 5 mm Sieb, 2.500 U/min und einem Durchsatz von 100 kg/h realisiert werden. Eindeutige Tendenzen oder Abhängigkeiten bei den untersuchten Einstellungen beim Prallreaktor lassen sich jedoch aus den Werten nicht ablesen.

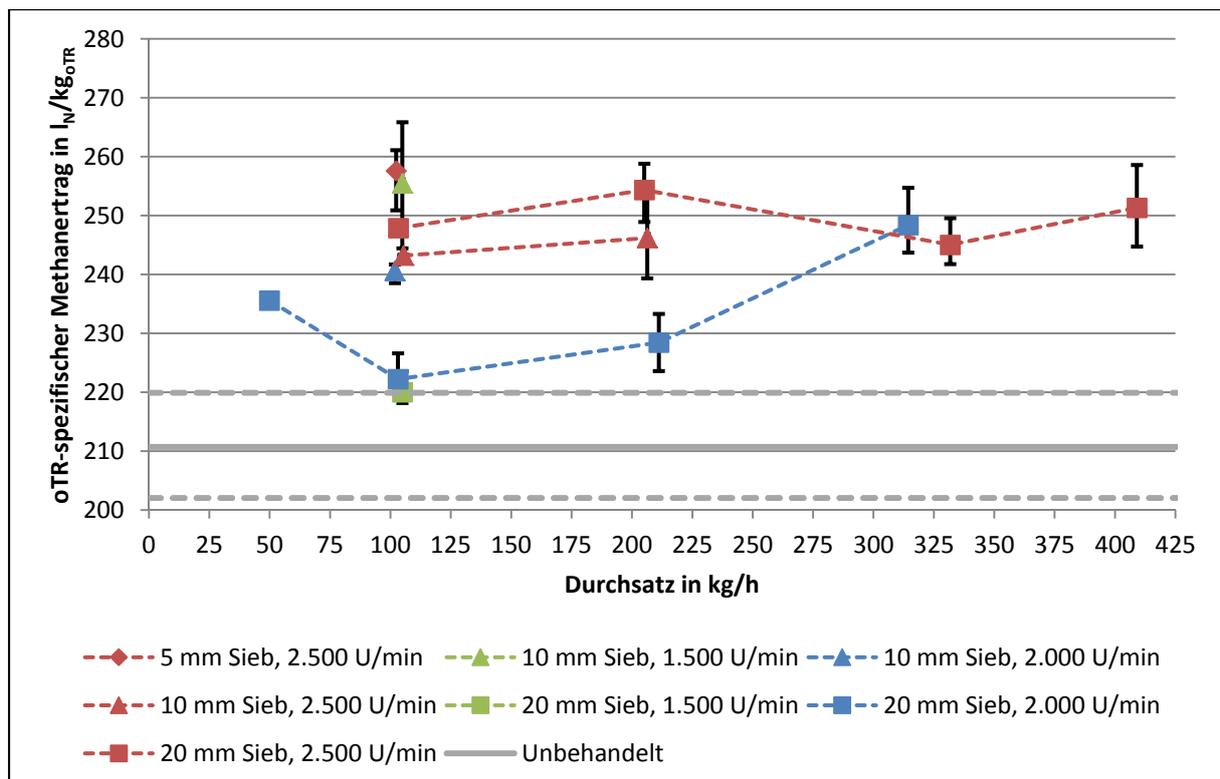


Abbildung 5-25: oTR-spezifischer Methanertrag von gepalltem Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz (Einstellungen: 60°-Rotor, 53 mm Siebabstand)

Bei der Auftragung der Methanerträge bei der Einstellung 20 mm Siebweite und einer Drehzahl von 2.000 U/min in Abbildung 5-26 bestätigt sich dieser Eindruck. Auf Grundlage dieser

Darstellung lassen sich mit der Rotorkombination 60° Anstellwinkel und 8 mm Siebabstand die höchsten Methanerträge erzielen.

Einzig bei der Siebweite zeigt sich die Tendenz, dass mit feineren Sieben, insbesondere dem 5 mm Sieb, höhere Methanerträge erzielt werden können. Allerdings sind die Unterschiede zwischen den Sieben mit 10 mm und 20 mm Maschenweite gering. Abbildung 5-27 zeigt dazu die spezifischen Methanerträge in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Pallelement und Sieb bei einem Durchsatz von 100 kg/h.

Abbildung 5-28 zeigt die Methanerträge des geprellten Triticalestrohs aus der zweiten Versuchsreihe und zum Vergleich die Werte aus der ersten Versuchsreihe. Es fällt auf, dass die Ergebnisse aus der zweiten Versuchsreihe durchgehend höher liegen als die aus der ersten. Da dies auch auf die unbehandelte Probe zutrifft, liegt die Ursache dafür wohl in der Strohqualität, da es beim Standardsubstrat keine Unterschiede gab.

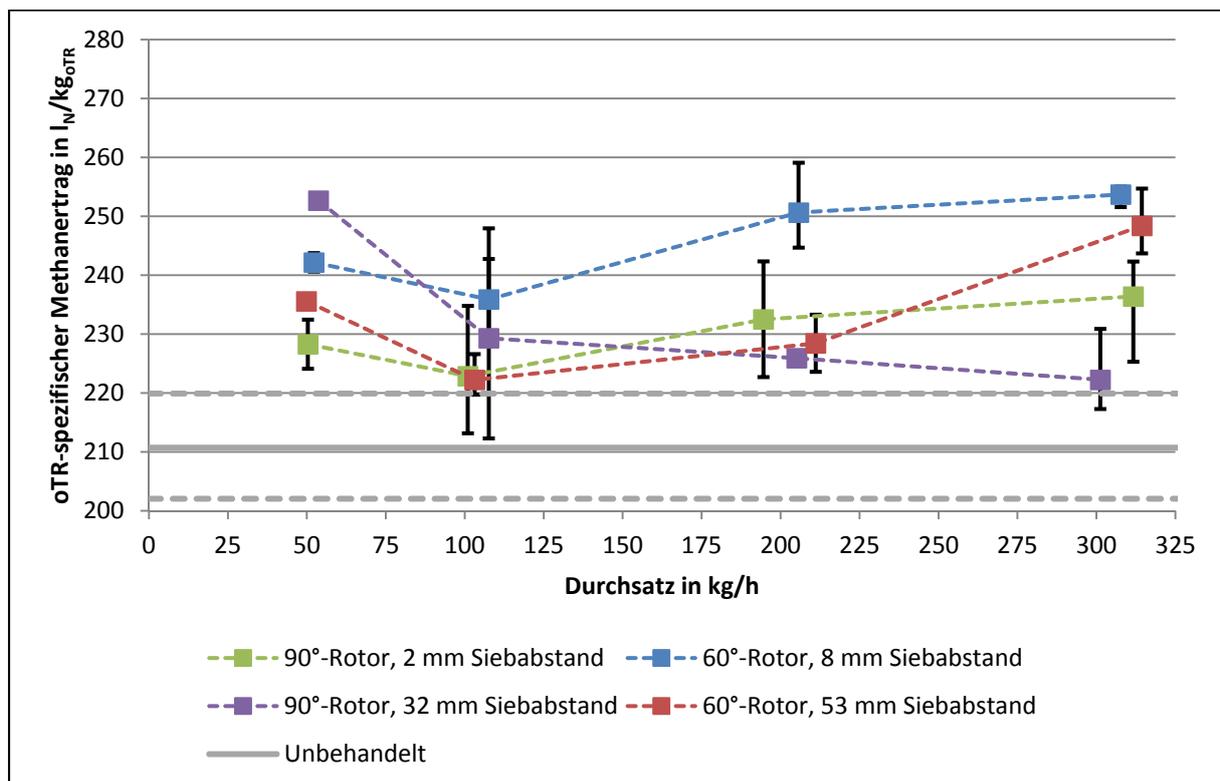


Abbildung 5-26: oTR-spezifischer Methanertrag von geprelltem Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz (Einstellungen: 20 mm Sieb, 2.000 U/min)

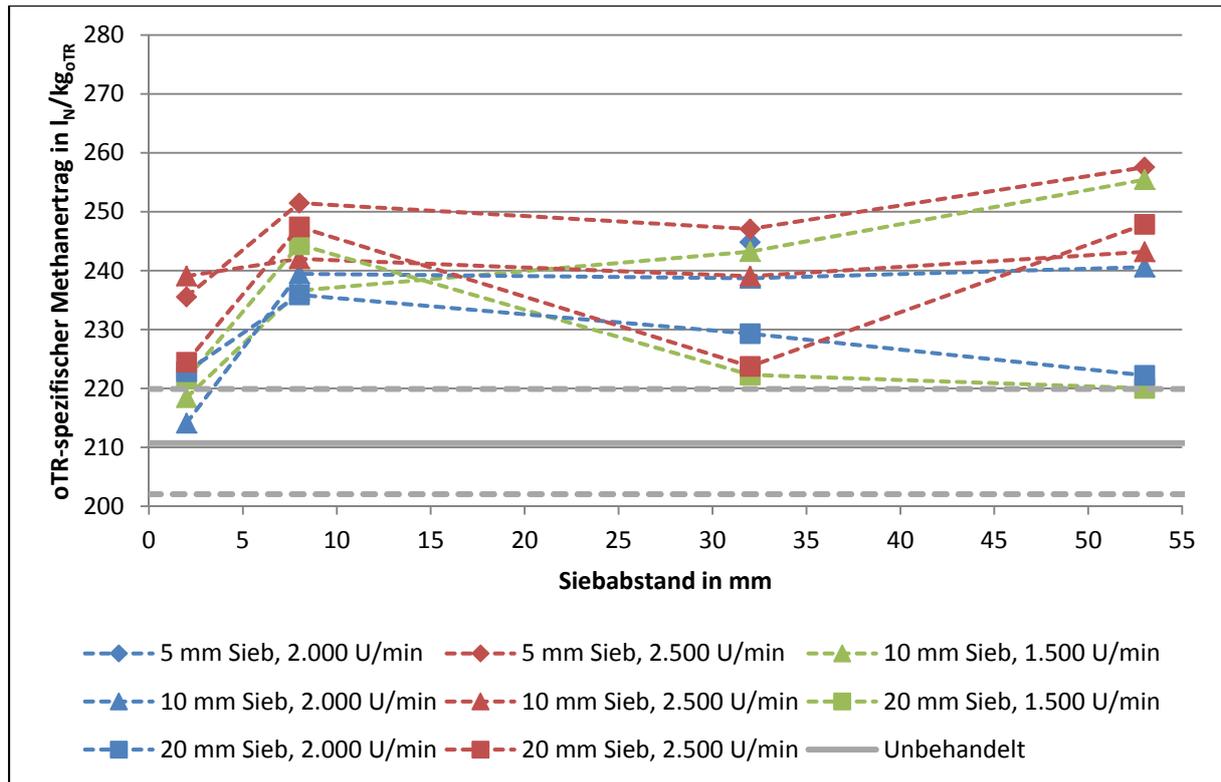


Abbildung 5-27: oTR-spezifischer Methanertrag von gepalltem Triticalestroh in Abhängigkeit vom Siebabstand (Einstellung: 100 kg/h Durchsatz)

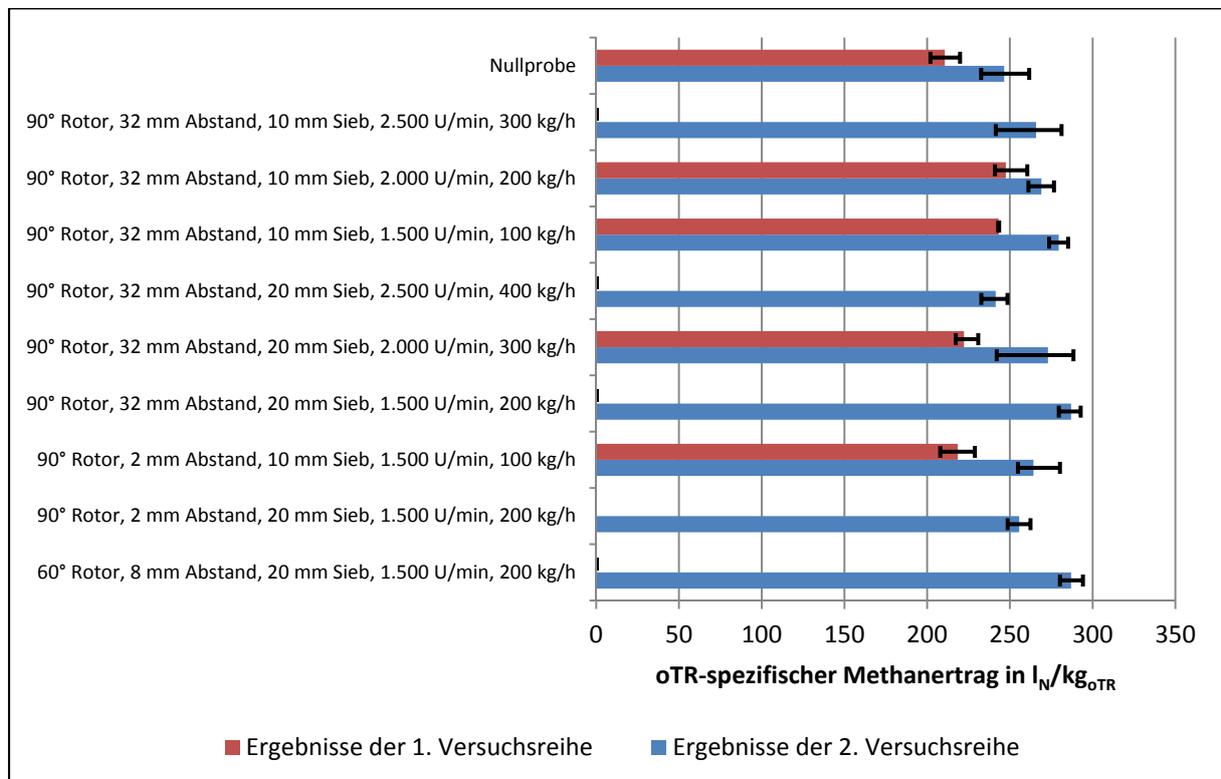


Abbildung 5-28: oTR-spezifischer Methanertrag von gepalltem Triticalestroh der zweiten Versuchsreihe

## Ergebnisse zum Methanertrag bei Hafer-GPS

Auch bei den Proben aus den Versuchen mit der Hafer-GPS wurde eine Vorauswahl für die Biogaspotenzialbestimmung vorgenommen. Dazu wurden ebenfalls alle Einstellungen mit einem Durchsatz von 100 kg/h und weitere ausgewählte Einstellungskombinationen, insbesondere die beiden vielversprechendsten mit den Einstellungen 60°-Rotor mit 8 mm Siebabstand und 90°-Rotor mit 32 mm Siebabstand bei einer Drehzahl von 1.500 U/min und dem Sieb mit 50 mm hoher rechteckiger Öffnung mit weiteren Durchsätzen, ausgewählt.

Bei Hafer-GPS ergaben sich für die zerkleinerten Proben aus den Biogaspotenzialbestimmungen sowohl Mehr-, als auch Mindererträge gegenüber dem unbehandelten Substrat. Dabei schwanken diese zwischen zusätzlichen 6 % und bis zu 11 % weniger Methanertrag durch die mechanische Vorbehandlung. Dabei lassen auch die Gasbildungskurven, wie Abbildung 5-29 beispielhaft zeigt, keinen generellen Schluss auf einen positiven Effekt der Vorbehandlung mit dem Prallreaktor zu. Darin sind die Gasbildungskurven von drei geprallten Proben im Vergleich zur unbehandelten Probe dargestellt. Ausgewählt wurden Proben mit einem Mehrertrag, einem Minderertrag und einem schnellerem Abbau bei gleichem Ertrag gegenüber der unbehandelten Probe.

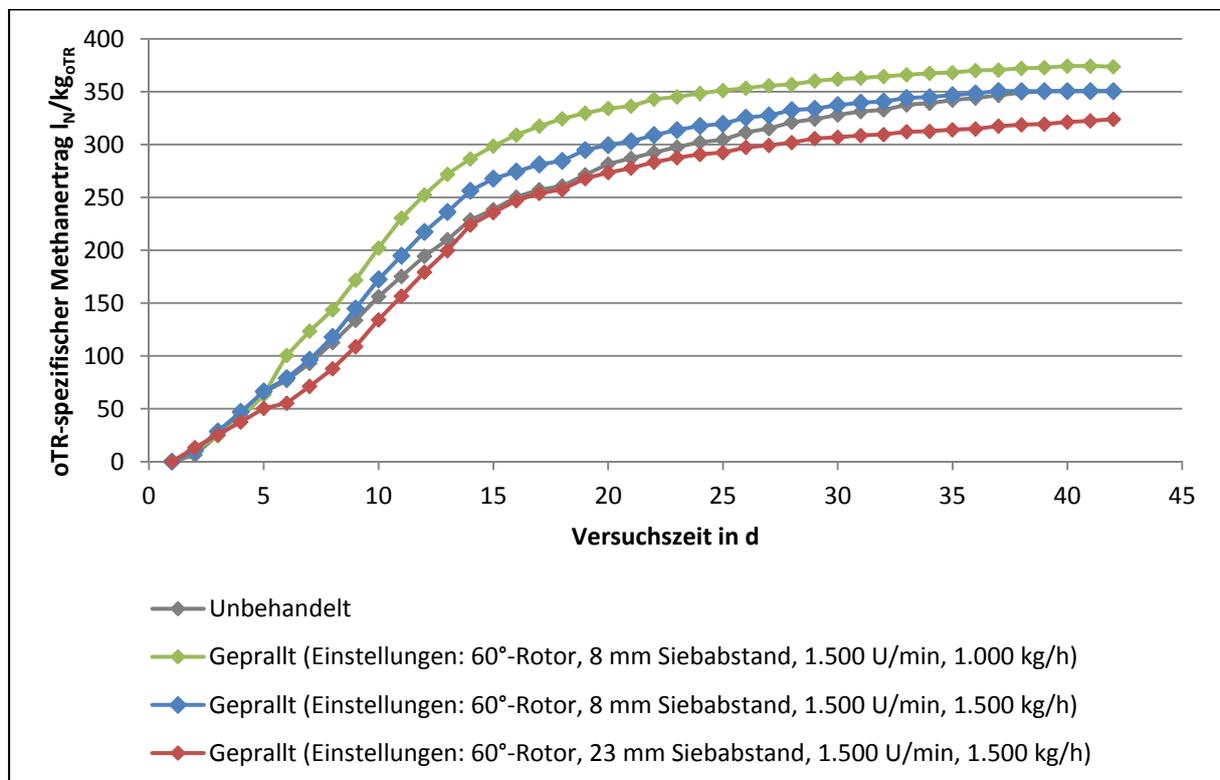


Abbildung 5-29: Gasbildungskurven für den oTR-spezifischen Methanertrag von unbehandelter und geprallter Hafer-Ganzpflanzensilage

Abbildung 5-30 zeigt die auf den organischen Trockenrückstand bezogenen Methanerträge von gepalltem Hafer-GPS in Abhängigkeit vom Durchsatz. Aus den Ergebnissen lassen sich keine klaren Tendenzen in Abhängigkeit von den untersuchten Einstellungen ermitteln. Auch aus den Ergebnissen zum Methanertrag von Hafer-GPS aus der zweiten Versuchsreihe in Abbildung 5-31 ergeben sich hierzu keine neuen Erkenntnisse.

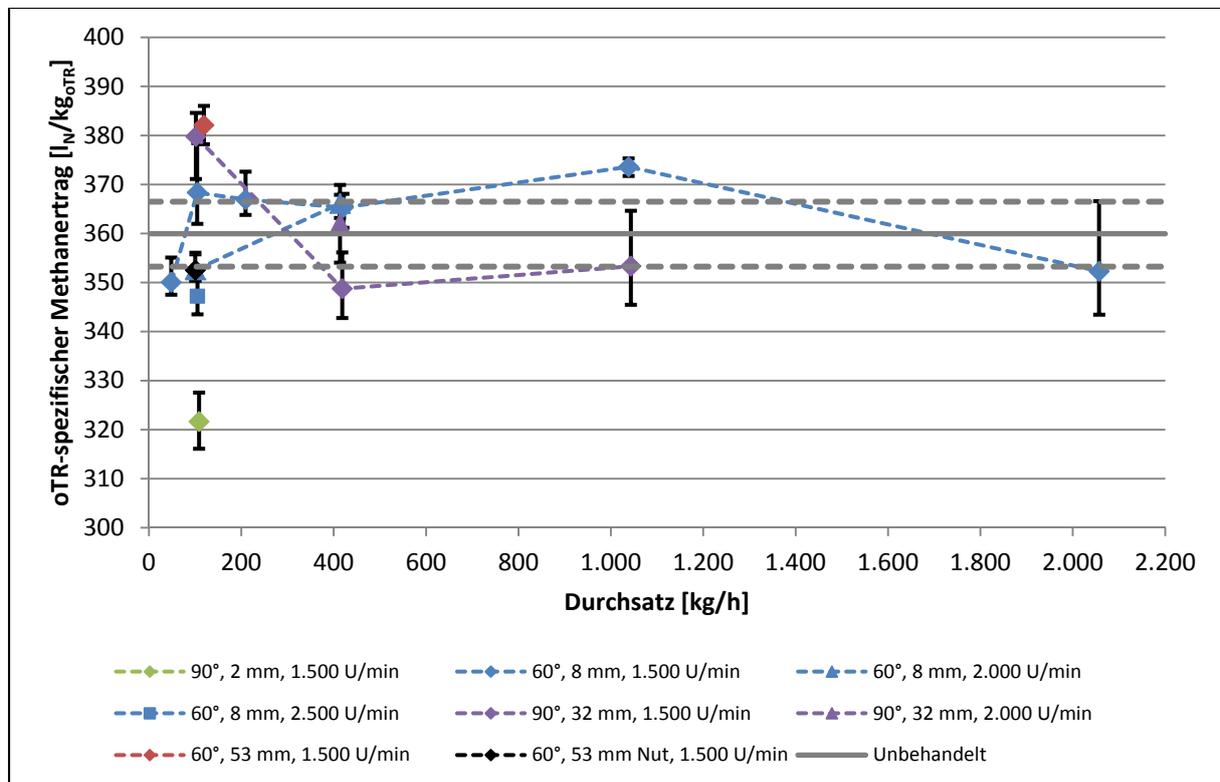


Abbildung 5-30: oTR-spezifischer Methanertrag von gepalltem Hafer-GPS in Abhängigkeit vom Durchsatz (Einstellung: rechteckiges Sieb mit 50 mm Maschenweite)

### Ergebnisse zum Methanertrag bei Maisstroh

Abbildung 5-33 zeigt die Ergebnisse zum Methanertrag der gepallten Maisstrohproben. Im Gegensatz zu den Ergebnissen beim Triticalestroh ergeben sich beim Maisstroh keine eindeutigen Mehrerträge an Methan durch die mechanische Vorbehandlung. Auch verlaufen die Gasbildungskurven, wie Abbildung beispielhaft zeigt, sehr ähnlich. Dabei liegt die unbehandelte Probe bei 249  $I_N/kg_{oTR}$  und der höchste Mehrertrag wurde mit 7 % von der mit dem 5 mm Sieb zerkleinerten Probe erzielt. Aus den drei Ergebnissen mit der Rotorkombination 90°-Anstellwinkel, 2 mm Sieb Abstand sowie den Siebweiten 5, 10 und 20 mm Siebweite lässt sich zumindest die Tendenz herauslesen, dass sich mit feiner zerkleinertem Maisstroh auch höhere Methanerträge realisieren lassen.

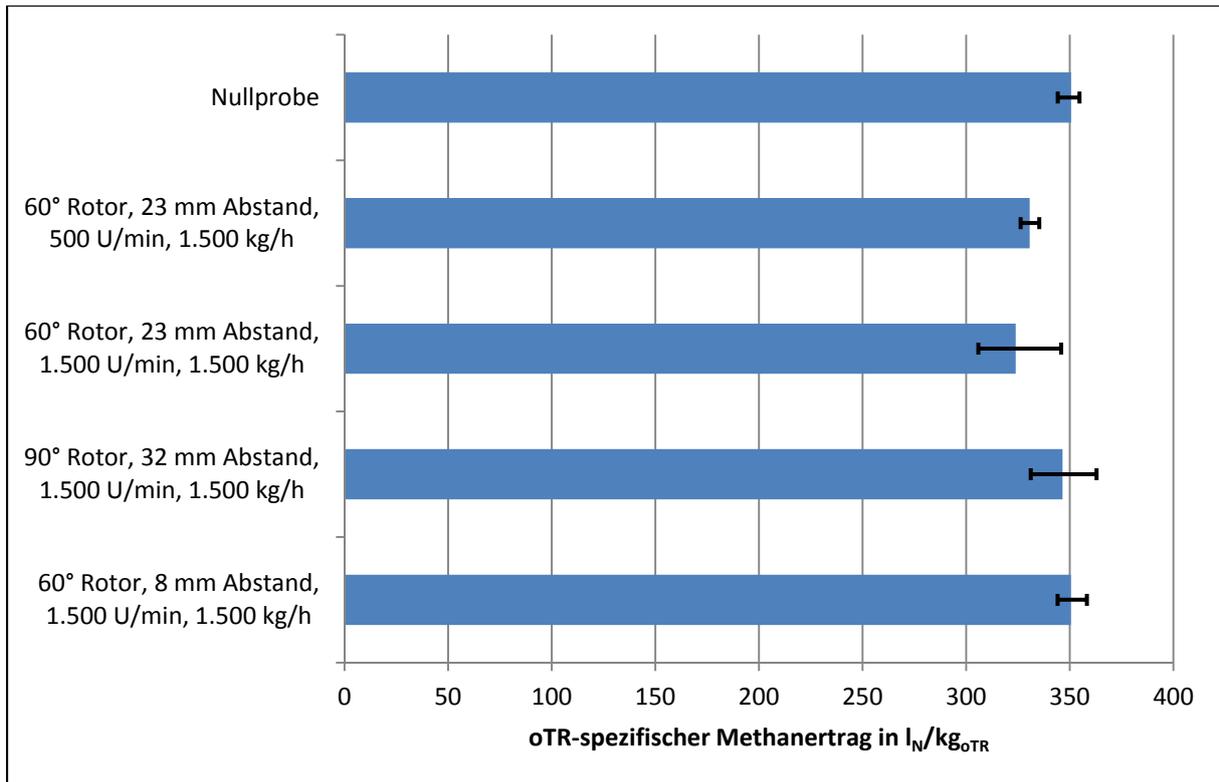


Abbildung 5-31: oTR-spezifischer Methanertrag von geprallter Hafer-Ganzpflanzensilage (Einstellung: rechteckiges Sieb mit 50 mm Maschenweite)

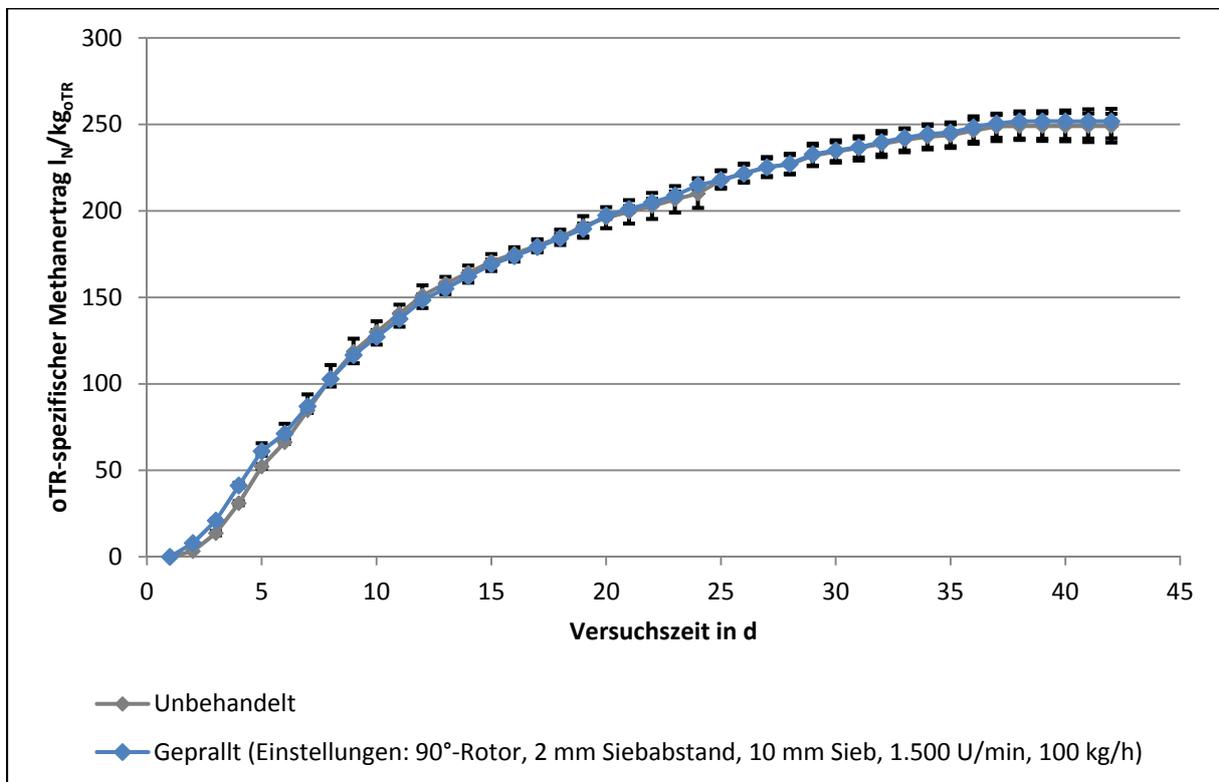


Abbildung 5-32: Gasbildungskurven für den oTR-spezifischen Methanertrag von unbehandeltem und gepralltem Maisstroh

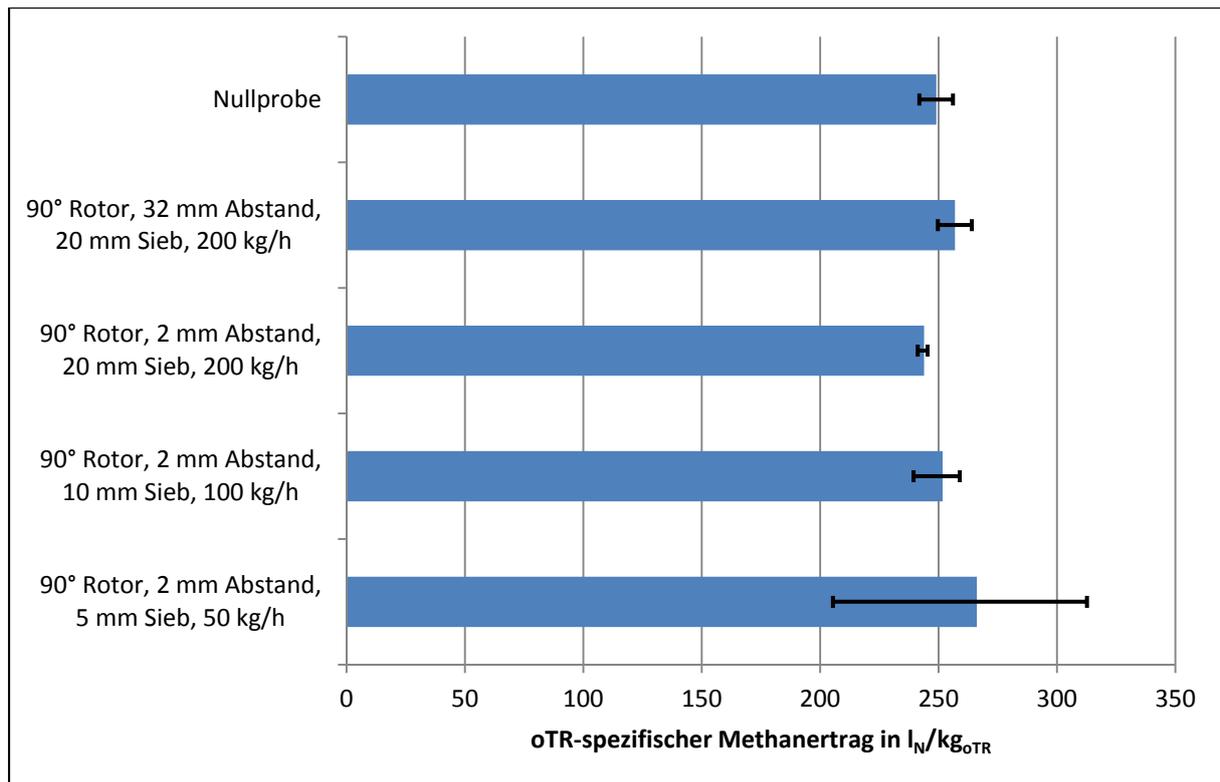


Abbildung 5-33: oTR-spezifischer Methanertrag von geprülltem Maisstroh (Einstellung: 1.500 U/min)

### Ergebnisse zum Methanertrag bei Pferdemist

Durch die mechanische Vorbehandlung des Pferdemistes konnte der spezifische Methanertrag bei allen Proben gegenüber der unbehandelten Probe gesteigert werden. Auch die Gasbildungskurven sind mit denen für Triticalestroh (Abbildung 5-24) vergleichbar und verlaufen alle oberhalb der Gasbildungskurve für die unbehandelte Pferdemistprobe. Dabei liegen die Ergebnisse für die beiden Proben bei einem Siebabstand von 2 mm über den drei Proben bei einem Siebabstand von 8 mm. Auch sind beim Vergleich der untersuchten Drehzahlen bei 2.000 U/min die jeweils höchsten Methanerträge realisiert worden. Das beste Ergebnis wurde mit einem Mehrertrag an Methan von 15 % auf 273  $I_N/kg_{oTR}$  bei der Einstellung 90°-Rotor mit 2 mm Siebabstand, 2.000 U/min und einem Durchsatz von 300 kg/h erzielt. Abbildung 5-34 zeigt die Ergebnisse zum Methanertrag der geprüllten Pferdemistproben.

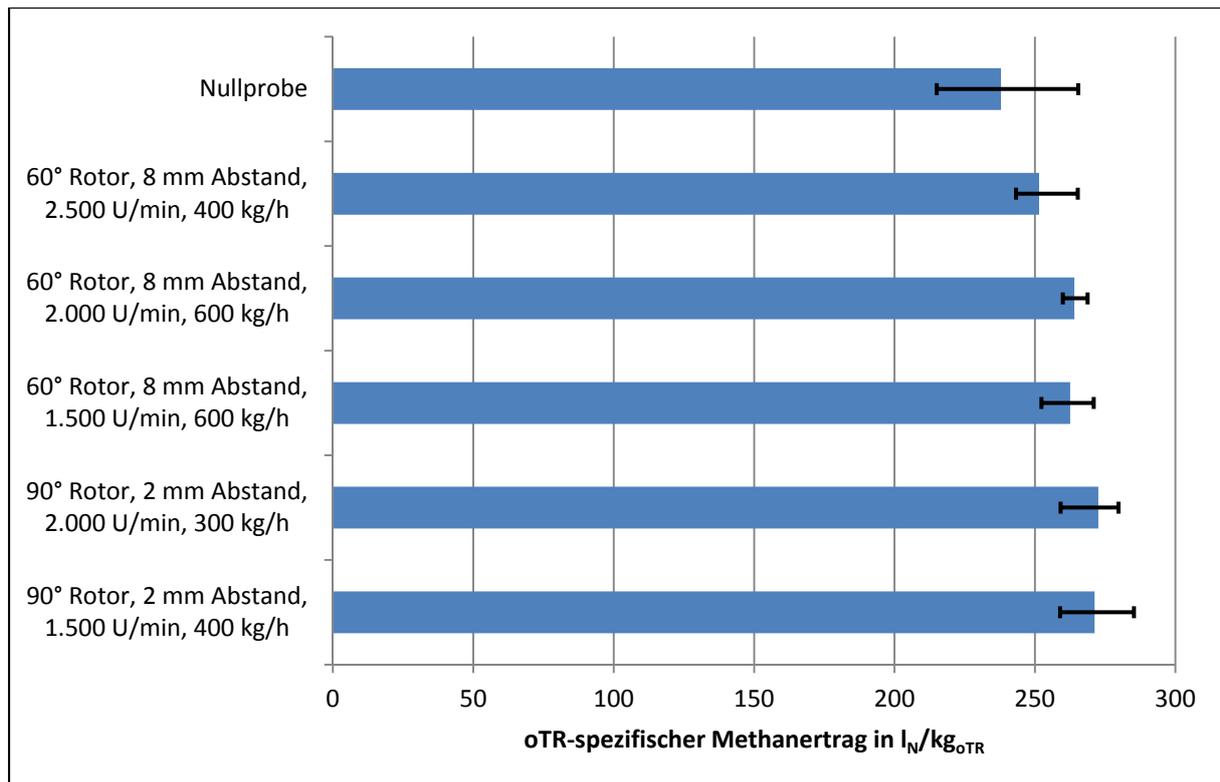


Abbildung 5-34: oTR-spezifischer Methanertrag von gepralltem Pferdemist (Einstellung: rechteckiges Sieb mit 50 mm Maschenweite)

## 5.5 Stromverbrauch

Der Stromverbrauch ist der wesentliche Faktor bei der Bewertung des Aufwandes und der Effizienz der mechanischen Vorbehandlung. Dazu werden in diesem Kapitel die Methodik zur Bestimmung des spezifischen Stromverbrauchs beschrieben, die Ergebnisse zu den beiden Versuchsreihen dargestellt und hinsichtlich der Einstellungsvarianten ausgewertet.

### 5.5.1 Methodik zur Bestimmung des Stromverbrauchs

Zur Berechnung des spezifischen Stromverbrauches wird die mittlere Wirkleistung während eines Zerkleinerungsversuches auf den jeweiligen Durchsatz bezogen. Die Wirkleistung wird dazu während der Versuche mit dem Messgerät Fluke 435 Power Quality Analyzer aufgezeichnet. In Abbildung 5-35 ist das mobile Messgerät und der Messpunkt am Eingang des Frequenzumrichters für den Motor des Prallreaktors zu sehen. Mit Hilfe der Stromzangen und Spannungsspitzen werden die Ströme und Spannungen an allen drei Phasen am Eingang des Frequenzumrichters gemessen und im Strommessgerät verarbeitet. Der Messpunkt am Eingang des Frequenzumrichters wurde gewählt, da dadurch der Einfluss der Peripherie auf den

Stromverbrauch ausgeschlossen und eine mögliche Vergleichbarkeit mit ähnlichen Anlagen gegeben ist.



Abbildung 5-35: Mobiles Strommessgerät Fluke 435 Power Quality Analyzer (links) und Messpunkt Frequenzumrichter (rechts)

Zur Sicherstellung der Funktionalität des mobilen Strommessgerätes wurden dieses sowie die Stromzangen und Prüfspitzen zur Spannungsmessung an einem Kalibrator METRAtop 90C von Gossen-Metrawatt an der FH Münster überprüft. Dabei ergaben sich Abweichungen im Messbereich bei Strom und Spannung von weniger als 0,01 %.

Zusätzlich wurde, zur laufenden Plausibilitätsprüfung, der Stromverbrauch für jeden Versuch an einem Drehstromzähler abgelesen, an den nur der Prallreaktor mit Steuerung angeschlossen war. Dementsprechend musste der hier abgelesene Stromverbrauch immer etwas höher ausfallen als der mit dem mobilen Strommessgerät bestimmte. Dies war während der gesamten Versuche der Fall.

Während eines jeden Zerkleinerungsversuchs wurde die Wirkleistung mit dem kleinsten möglichen Intervall von einem Messwert pro halber Sekunde aufgenommen. Im Diagramm in Abbildung 5-36 ist das Verfahren zur Bestimmung des spezifischen Stromverbrauchs aus der gemessenen Wirkleistung grafisch dargestellt.

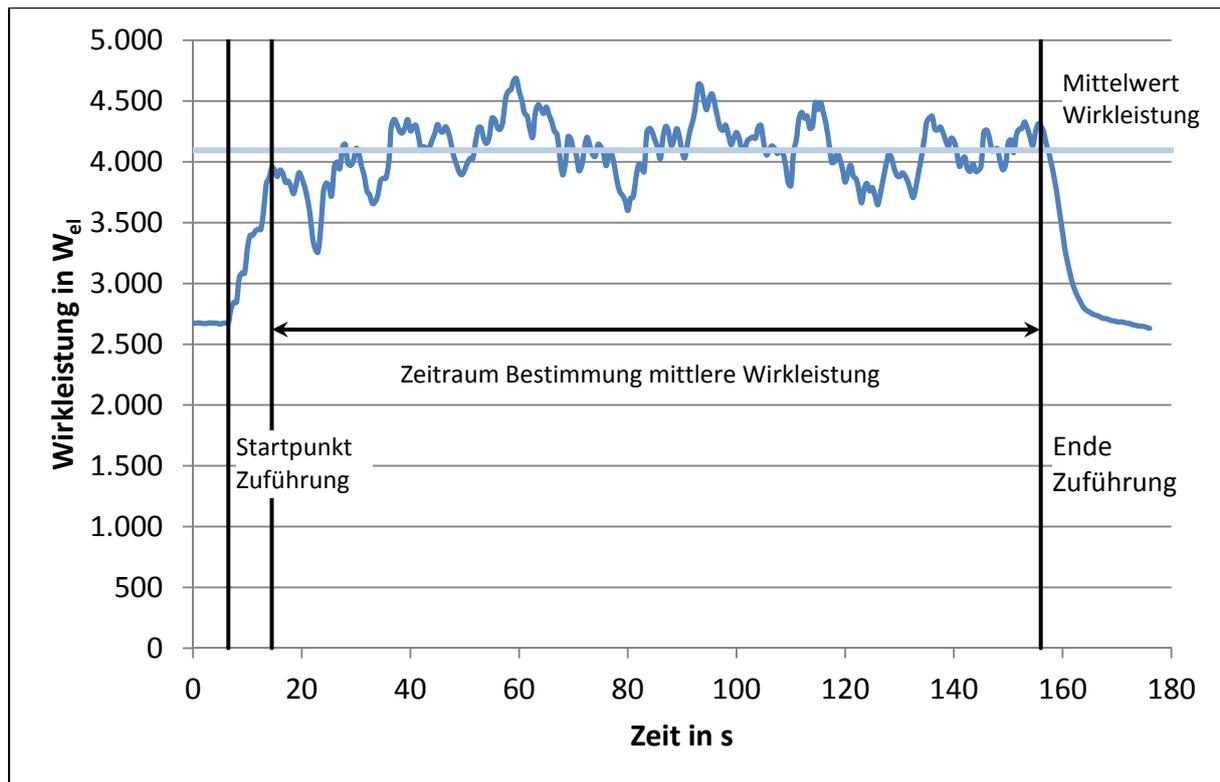


Abbildung 5-36: Beispiel-Diagramm zur Bestimmung des spezifischen Stromverbrauchs

Die mittlere Wirkleistung wurde zwischen dem Ende der Anfahrphase und dem Ende der Zuführung bestimmt. Da Start- und Endpunkt der Zuführung aus der Wirkleistungskurve eindeutig bestimmbar sind, konnte daraus zudem die Versuchsdauer ermittelt werden. Durch Bezug der eingewogenen Menge auf diese Versuchsdauer war es wiederum möglich, den eingestellten Durchsatz zu korrigieren. Schließlich konnte der spezifische Stromverbrauch in  $\text{kWh}_{el}/t_{FM}$  Substrat durch Division der mittleren Wirkleistung durch den korrigierten Durchsatz berechnet werden.

### 5.5.2 Ergebnisse der ersten Versuchsreihe mit Triticalestroh und Hafer-Ganzpflanzensilage

In der ersten Versuchsreihe wurden die Substrate Triticalestroh und Hafer-Ganzpflanzensilage untersucht. Im Folgenden werden die Ergebnisse zum Stromverbrauch aus den Versuchsreihen mit den beiden Substraten dargestellt.

#### Ergebnisse zum Stromverbrauch bei Triticalestroh

Insgesamt wurden über 100 Einzelversuche zur mechanischen Zerkleinerung des Triticalestrohs durchgeführt. Die geringsten spezifischen Stromverbräuche mit  $14,8 \text{ kWh}_{el}/t$  wurden mit dem  $90^\circ$ -Rotor bei einem Abstand von 2 mm sowie 32 mm zwischen Pallelement und Siebmitte, einer Siebweite von 20 mm, einer Drehzahl von 1.500 U/min und einem Durchsatz

von 200 kg/h erzielt. Das Diagramm in Abbildung 5-37 zeigt die Ergebnisse des spezifischen Stromverbrauchs für die Einstellung 90°-Rotor mit 2 mm Abstand zwischen Pallelement und Siebmitte bei verschiedenen Drehzahlen und Siebweiten in Abhängigkeit vom Durchsatz bei Triticalestroh. Die Diagramme für die drei weiteren Kombinationen aus Rotor und Siebstand befinden sich in Anhang 4 der Arbeit.

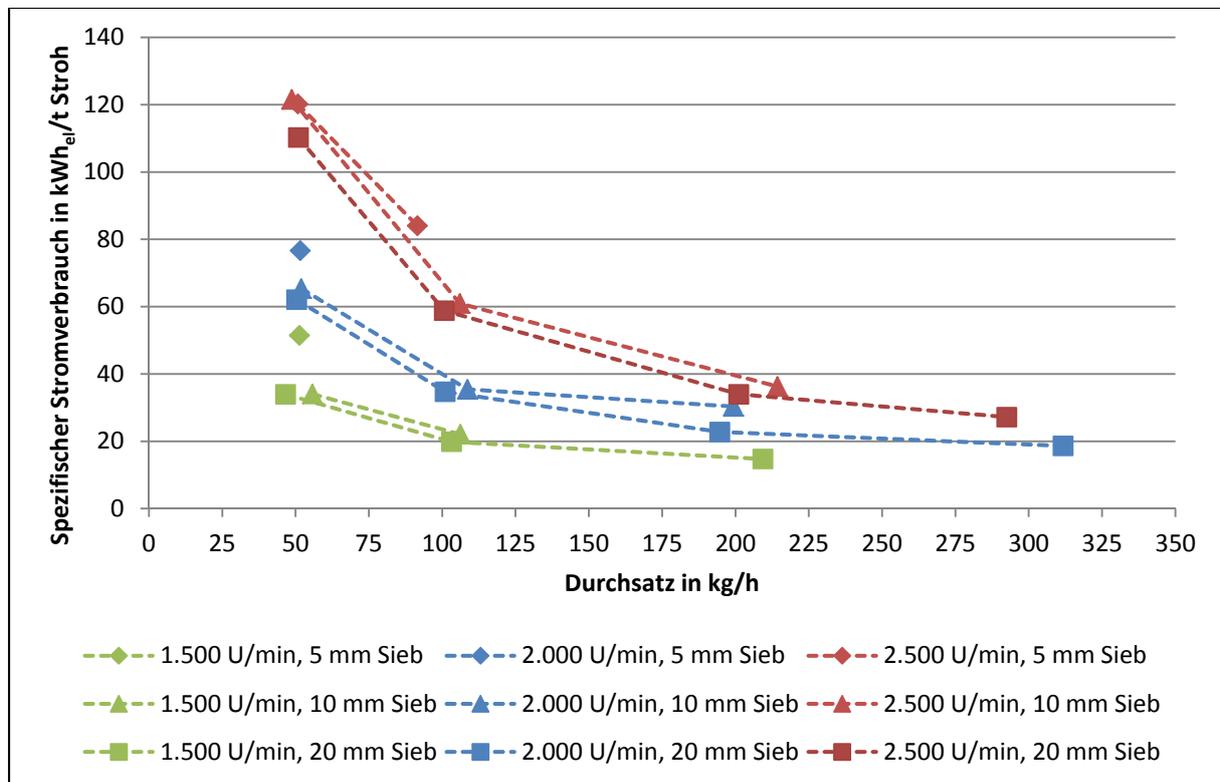


Abbildung 5-37: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 90°-Rotor, 2 mm Siebabstand)

Diese Art der Darstellung, die Auftragung der spezifischen Stromverbräuche über den Durchsatz, wurde gewählt, da der Durchsatz der einzige nicht fest einstellbare Parameter ist und zugleich die größte Variation bietet. Zudem werden in dieser Darstellung bereits viele weitere Einflüsse und Abhängigkeiten sichtbar.

Obwohl es sich bei dieser Versuchsreihe nur um Einzelversuche ohne Wiederholungen handelt, lassen sich über die Vielzahl an Versuchsergebnissen klare Tendenzen hinsichtlich des spezifischen Stromverbrauchs herausarbeiten. So sinkt der spezifische Stromverbrauch bei größeren Sieben, höheren Durchsätzen und bei niedrigeren Drehzahlen. Dabei steigt der spezifische Stromverbrauch exponentiell, je geringer der Durchsatz ist. Zudem lassen sich bei höheren Drehzahlen höhere Durchsätze realisieren. Die mit 400 kg/h höchsten Durchsätze wurden mit den drei Einstellungen 20 mm Sieb, 90°-Rotor mit 32 mm Siebanstand bei 2.000

und 2.500 U/min sowie 20 mm Sieb, 60°-Rotor mit 53 mm Siebabstand bei 2.500 U/min erzielt.

Um den Einfluss von Anstellwinkel des Rotors und Siebabstand beispielhaft darzustellen, zeigt das Diagramm in Abbildung 5-38 die Ergebnisse des spezifischen Stromverbrauchs in Abhängigkeit vom Durchsatz bei Triticalestroh mit einer Siebweite von 10 mm und einer Drehzahl von 2.500 U/min für die vier Kombinationen aus Anstellwinkel des Rotors und Siebabstand.

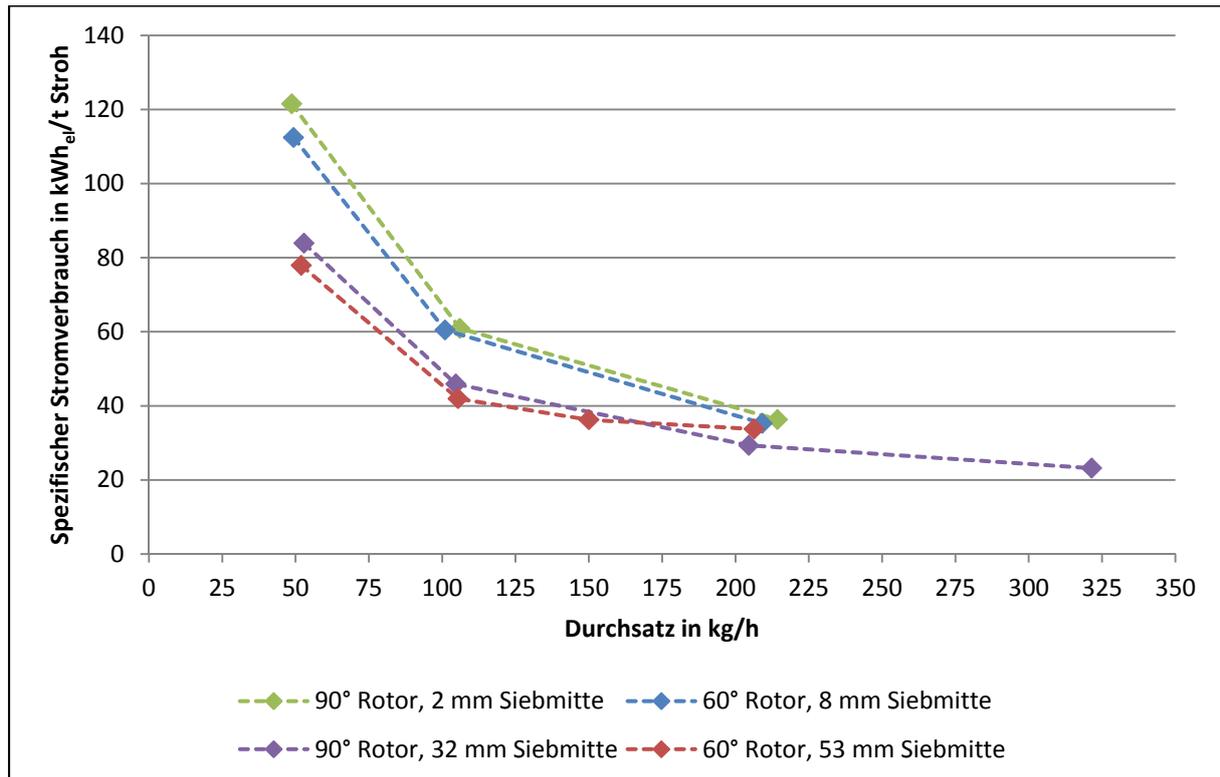


Abbildung 5-38: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 10 mm Sieb, 2.500 U/min)

Aus dem Diagramm wird deutlich, dass mit zunehmendem Abstand zwischen Prallelement und Sieb der spezifische Stromverbrauch sinkt. Jedoch gleichen sich die spezifischen Stromverbräuche mit zunehmendem Durchsatz an.

Beim Vergleich der vier Rotorkombinationen fällt auf, dass der spezifische Stromverbrauch bei der Kombination 60°-Rotor mit 53 mm Siebabstand nicht im gleichen Maße sinkt, wie bei den anderen drei Rotorkombinationen. Dies ist auch Abbildung 5-39 zu entnehmen, in der der spezifische Stromverbrauch in Abhängigkeit vom Durchsatz für die verschiedenen Rotorkombinationen und Siebweiten bei einer Drehzahl von 1.500 U/min zeigt. Die beiden Diagramme für 2.000 und 2.500 U/min befinden sich in Anhang 4 der Arbeit. Gleichzeitig wurde während der Versuche beobachtet, dass sich bei dieser Rotorkombination vor allem bei einer

Drehzahl von 1.500 U/min auffällig viel Stroh im Prallraum ansammelte. Daher lässt sich festhalten, dass größere Abstände zwar grundsätzlich positiv für Durchsatz und spezifischen Stromverbrauch sind, jedoch zu große Abstände dies ins Gegenteil verkehren. Bei diesem Einstellungsparameter scheint es ein Optimum zu geben.

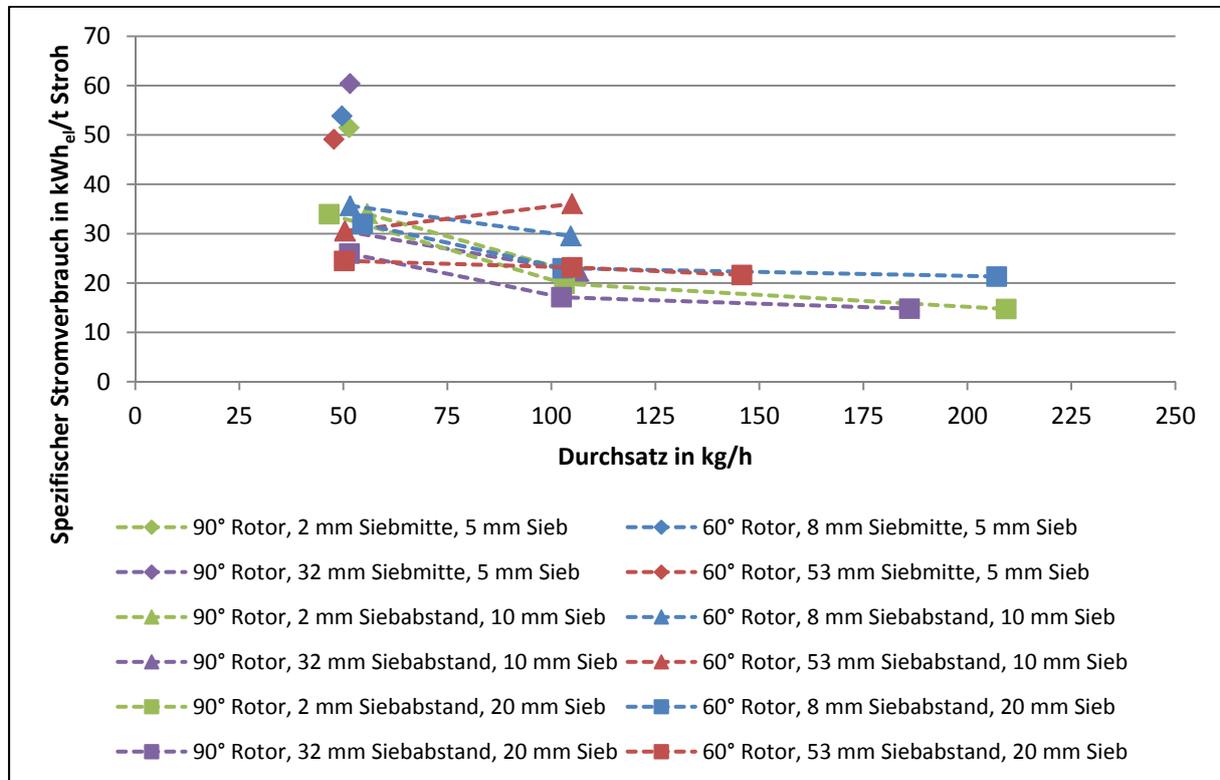


Abbildung 5-39: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 1.500 U/min)

Vor allem bei einer Drehzahl von 1.500 U/min zeigt sich ein Unterschied zwischen dem 60° und dem 90°-Rotor. Dabei hat der 90°-Rotor mit einem Siebabstand von 2 und 32 mm Vorteile gegenüber dem 60°-Rotor und Siebabständen von 8 und 53 mm. Dazu zeigt Abbildung 5-40 die Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Siebabstand bei Triticalestroh für einen Durchsatz von 100 kg/h bei verschiedenen Drehzahlen und Siebweiten.

Aus allen bisherigen Auswertungen wird deutlich, dass für einen möglichst niedrigen Stromverbrauch ein grobes Sieb, in diesem Fall mit einer Maschenweite von 20 mm, gewählt werden sollte. Ist jedoch das Ziel feines Material zu erzeugen, so ist auch ein Sieb mit kleinerer Maschenweite notwendig. Dazu zeigt Abbildung 5-41 den spezifischen Stromverbrauch in Abhängigkeit vom Siebabstand bei Triticalestroh mit einer Siebweite von 5 mm.

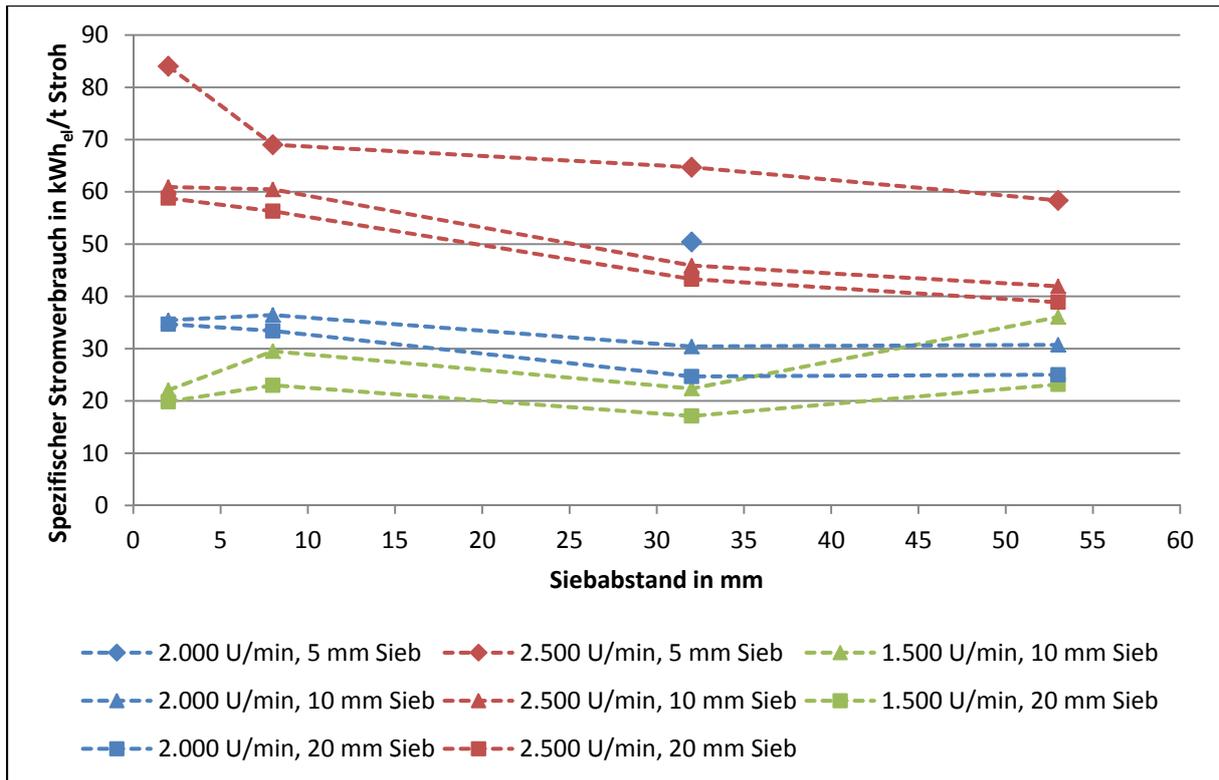


Abbildung 5-40: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Siebabstand bei Triticalestroh (Einstellungen: 100 kg/h Durchsatz)

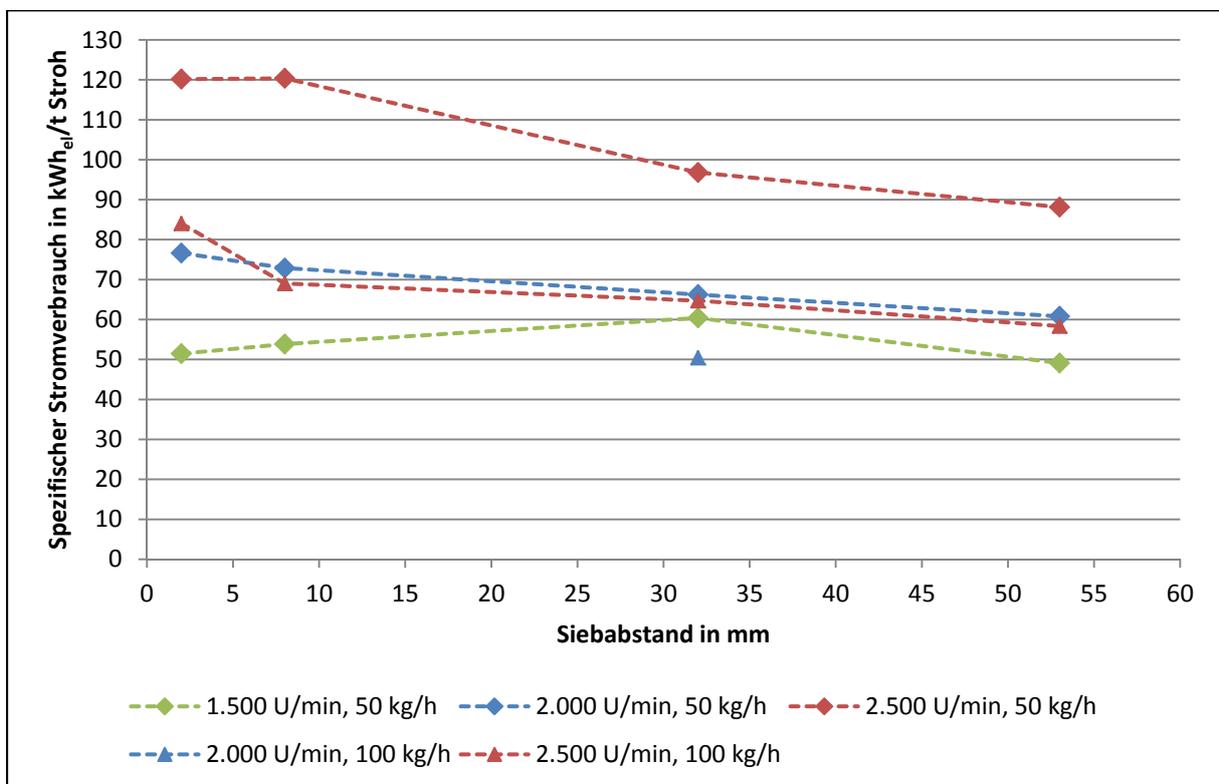


Abbildung 5-41: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Siebabstand bei Triticalestroh (Einstellungen: 5 mm Sieb)

Bei dieser Siebweite sind Durchsätze von 50 und nur teilweise 100 kg/h möglich. Der spezifische Stromverbrauch liegt im Idealfall bei etwa 50 kWh<sub>el</sub>/t mit den Einstellungen 90°-Rotor, 2 mm Siebabstand und 60°-Rotor, 53 mm Siebabstand bei 1.500 U/min und einem Durchsatz von 50 kg/h sowie bei der Einstellung 90°-Rotor, 32 mm Siebabstand bei 2.000 U/min und einem Durchsatz von 100 kg/h. Es wird jedoch die Einstellung mit dem 90°-Rotor und 2 mm Siebabstand empfohlen, da bei dieser ein zuverlässiger Betrieb ohne größere Restmengen im Prallraum realisierbar war. Die Diagramme mit der Darstellung der Versuche mit dem 10 und 20 mm Sieb befinden sich in Anhang 4 der Arbeit.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für einen möglichst niedrigen spezifischen Stromverbrauch bei der Zerkleinerung von Triticalestroh folgende Einstellungen beim Prallreaktor gewählt werden sollten:

- Großes Sieb (20 mm)
- Maximal möglicher Durchsatz
- Niedrige Drehzahl (1.500 U/min)
- Anstellwinkel von 90° beim Rotor
- Kein zu großer Abstand zwischen Prallelement und Siebmitte (32 mm bei 90° Anstellwinkel)

Eine weitere Beobachtung aus den Versuchen ist, dass die Beschaffenheit des Strohs einen großen Einfluss auf Durchsatz und spezifischen Stromverbrauch bei der Zerkleinerung von Stroh hat. Dabei ist mit Beschaffenheit hier der Anteil von Gräsern und Unkräutern sowie die Sprödigkeit des Strohs gemeint. In Vorversuchen zur Entwicklung des Versuchsaufbaus wurde bereits mit Triticalestroh von einem anderen Landwirt aus dem Vorjahr (2013) gearbeitet. Zur Veranschaulichung sind in Tabelle 5-3 die Ergebnisse für eine Kombination an Einstellungen am Prallreaktor hinsichtlich Durchsatz und spezifischen Stromverbrauch aufgeführt.

Tabelle 5-3: Vergleich der Ergebnisse aus den Zerkleinerungsversuchen von zwei Strohart an anhand einer Einstellung am Prallreaktor

| <b>Triticalestroh</b><br><b>[Jahr]</b> | <b>Rotor</b> | <b>Siebabstand</b><br><b>[mm]</b> | <b>Siebweite</b><br><b>[mm]</b> | <b>Drehzahl</b><br><b>[U/min]</b> | <b>Durchsatz</b><br><b>[kg/h]</b> | <b>Stromverbrauch</b><br><b>[kWh<sub>el</sub>/t]</b> |
|--|--------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| 2014                                   | 60°          | 8                                 | 20                              | 2.000                             | 300                               | 18,9   |
| 2013                                   | 60°          | 8                                 | 20                              | 2.000                             | 300                               | 16,3   |
| 2013                                   | 60°          | 8                                 | 20                              | 2.000                             | 400                               | 14,2   |

Beim Vergleich der Ergebnisse zeigt sich ein geringerer spezifischer Stromverbrauch von 16,3 kWh<sub>el</sub>/t für das Stroh von 2013 gegenüber 18,9 kWh<sub>el</sub>/t für 2014. Zudem wurde mit dem Stroh von 2013 ein höherer maximaler Durchsatz von 400 kg/h erzielt, wodurch gleichzeitig der spezifische Stromverbrauch zur Zerkleinerung weiter sinkt.

### Ergebnisse zum Stromverbrauch bei Hafer-Ganzpflanzensilage (Hafer-GPS)

Bei den Versuchen mit Hafer-GPS konnte ausschließlich das Sieb mit der rechteckigen Öffnung von 50 mm Höhe verwendet werden. Der geringste spezifische Stromverbrauch mit 2,2 kWh<sub>el</sub>/t wurden mit dem 60°-Rotor bei einem Abstand von 8 mm zwischen Pallelement und Siebmitte, einer Drehzahl von 1.500 U/min und einem Durchsatz von fast 2.000 kg/h erzielt. Das Diagramm in Abbildung 5-42 zeigt die Ergebnisse des spezifischen Stromverbrauchs in Abhängigkeit vom Durchsatz bei einer Drehzahl von 1.500 U/min und für die verschiedenen Rotorkonfigurationen. Die beiden Diagramme mit den spezifischen Stromverbräuchen bei einer Drehzahl von 2.000 und 2.500 U/min befinden sich in Anhang 5 der Arbeit.

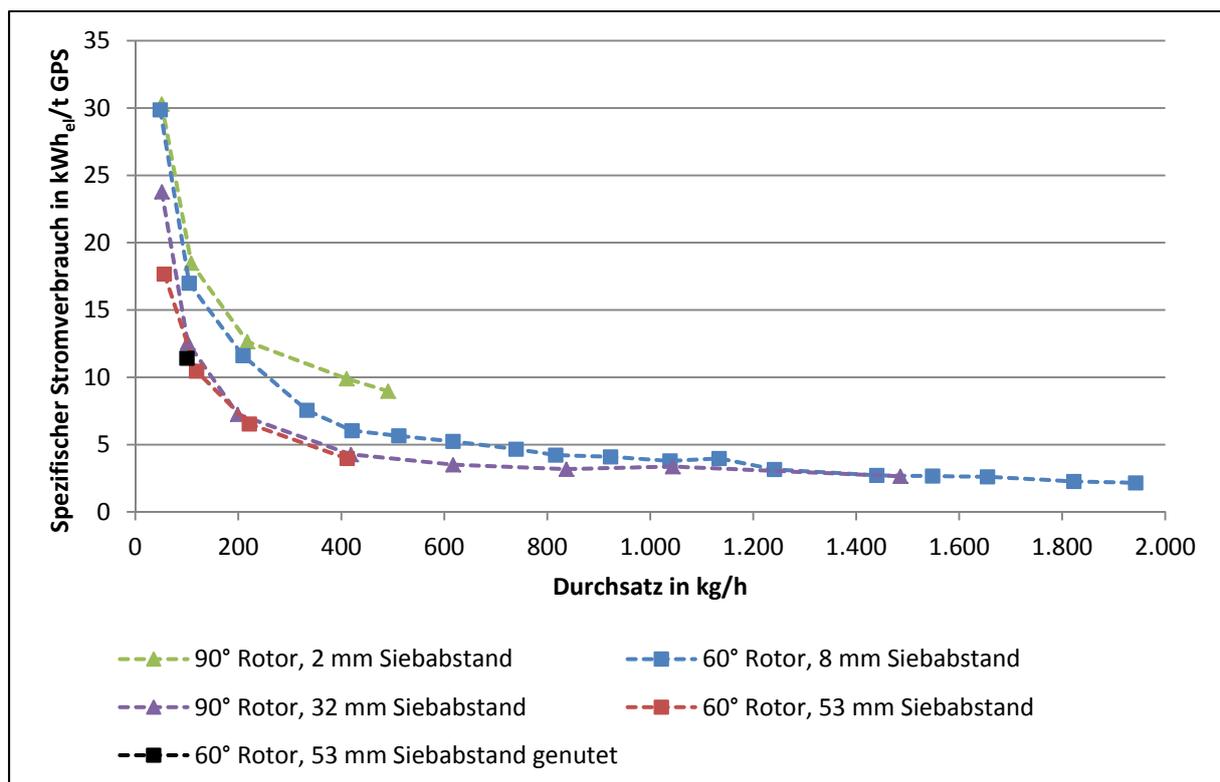


Abbildung 5-42: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Hafer-GPS (Einstellungen: 1.500 U/min)

Der spezifische Stromverbrauch sinkt mit höheren Durchsätzen und kleineren Drehzahlen. Wie bei den Versuchen mit Tritcalestroh zuvor sinkt auch bei Hafer-GPS der spezifische Stromverbrauch exponentiell mit zunehmendem Durchsatz. Dabei nähern sich die spezifi-

schen Stromverbräuche der verschiedenen Rotorkombinationen mit steigendem Durchsatz an. Die mit Abstand höchsten Durchsätze von bis zu 2.000 kg/h wurden mit den beiden Rotorkombinationen 90°-Rotor, 32 mm Siebabstand und 60°-Rotor, 8 mm Siebabstand bei einer Drehzahl von 1.500 U/min realisiert. Bei diesen beiden Varianten sinkt zudem ab einem Durchsatz von etwa 600 kg/h der spezifische Stromverbrauch nur noch geringfügig. Demgegenüber konnte mit allen weiteren Einstellungen nur ein maximaler Durchsatz zwischen 400 und 600 kg/h erzielt werden.

Im Vergleich mit den weiteren untersuchten Drehzahlen von 2.000 und 2.500 U/min konnte mit der Rotorkombination 90° Anstellwinkel und 32 mm Siebabstand die höchsten Durchsätze und zugleich niedrigsten spezifischen Stromverbräuche erzielt werden. Somit scheint es, wie bei den Versuchen mit dem Triticalestroh zuvor, ein Optimum beim Siebabstand zu geben. Dagegen hat der Anstellwinkel des Rotors für sich genommen keinen eindeutigen Einfluss auf den spezifischen Stromverbrauch. Dazu zeigt das Diagramm in Abbildung 5-43 die Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Siebabstand bei Hafer-GPS für ausgewählte Durchsätze von 50, 100, 200 und 400 kg/h bei den verschiedenen Drehzahlen.

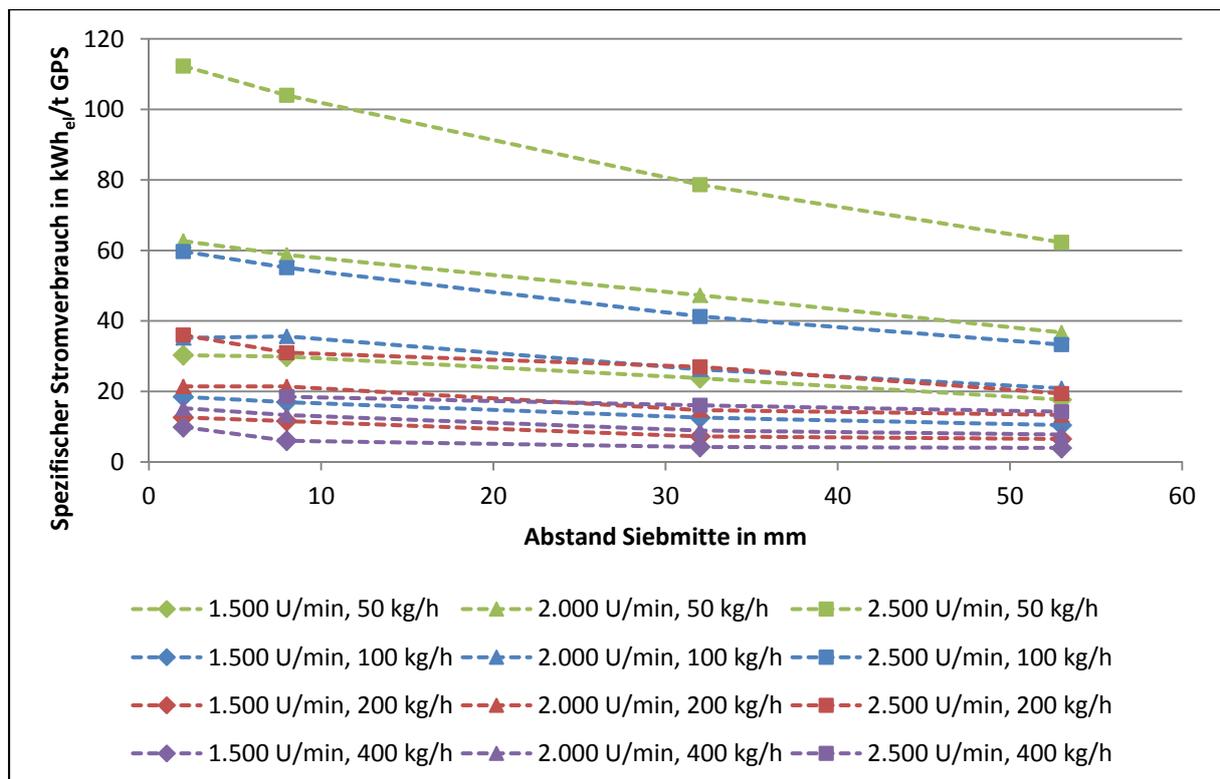


Abbildung 5-43: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Siebabstand bei Hafer-GPS für ausgewählte Durchsätze

Während der Versuche wurde beobachtet, dass sich beim Siebabstand von 53 mm die Sieböffnungen auffällig schnell mit Material zusetzten. Dies war sowohl beim glatten, als auch

beim genuteten Prallelement festzustellen. Auch ein messbarer positiver Einfluss auf den spezifischen Stromverbrauch war beim genuteten Prallelement gegenüber dem glatten nicht zu ermitteln.

In der folgenden Aufstellung sind die für einen möglichst niedrigen spezifischen Stromverbrauch beim mechanischen Aufschluss von Hafer-GPS zu wählenden Einstellungen beim Prallreaktor zusammengefasst:

- Auslassöffnung von mindestens 50 mm
- Hoher Durchsatz
- Niedrige Drehzahl (1.500 U/min)
- Anstellwinkel hat keinen entscheidenden Einfluss
- Kein zu großer Abstand zwischen Prallelement und Siebmitte (32 mm bei 90° Anstellwinkel, bzw. 8 mm bei 60° Anstellwinkel)

### **5.5.3 Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe mit verschiedenen Substraten**

Zur Validierung der Ergebnisse aus der ersten Versuchsreihe in Kapitel 5.5.2 wurden in einer zweiten Versuchsreihe die vielversprechendsten Einstellungen mit drei Wiederholungen für die Substrate Triticalestroh und Hafer-Ganzpflanzensilage erneut durchgeführt. Im Anschluss daran wurden mit den so bestätigten optimalen Einstellungen Versuche zur Zerkleinerung von Maisstroh und Pferdemist durchgeführt und hinsichtlich des Stromverbrauchs ausgewertet.

#### **Ergebnisse zum Stromverbrauch bei Triticalestroh**

In Tabelle 5-4 sind die Einstellungen für die Zerkleinerungsversuche mit Triticalestroh aufgeführt. Dabei wurden neben den ermittelten optimalen Einstellungen hinsichtlich des spezifischen Stromverbrauchs noch weitere Einstellungen untersucht. Als Durchsatz wurde der jeweils maximal mögliche aus der ersten Versuchsreihe eingestellt.

Abbildung 5-44 zeigt die Ergebnisse der Zerkleinerungsversuche mit Triticalestroh beim spezifischen Stromverbrauch aus der zweiten Versuchsreihe und zum Vergleich die Ergebnisse aus der ersten Versuchsreihe. Es wird deutlich, dass die Schwankungsbreiten aufgrund der drei Wiederholungen sehr gering sind. Beim Vergleich der Ergebnisse zwischen der ersten und zweiten Versuchsreihe weichen diese zum Teil etwas deutlicher ab. Auf die Tendenz zwischen den untersuchten Einstellungen am Prallreaktor hat dies jedoch keinen Einfluss. Es liegt die Vermutung nahe, dass diese Abweichungen, wie bereits beschrieben, im Zusammenhang mit der Beschaffenheit des verwendeten Strohs zu sehen sind.

Tabelle 5-4: Einstellungen für die Zerkleinerung von Triticalestroh

| Rotor | Siebabstand<br>[mm] | Siebweite<br>[mm] | Drehzahl<br>[U/min] | Durchsatz<br>[kg/h] |
|-------|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| 90°   | 32                  | 20                | 1.500               | 200                 |
| 90°   | 32                  | 20                | 2.000               | 300                 |
| 90°   | 32                  | 20                | 2.500               | 400                 |
| 90°   | 32                  | 10                | 1.500               | 100                 |
| 90°   | 32                  | 10                | 2.000               | 200                 |
| 90°   | 32                  | 10                | 2.500               | 300                 |
| 90°   | 2                   | 20                | 1.500               | 200                 |
| 90°   | 2                   | 20                | 2.000               | 300                 |
| 90°   | 2                   | 10                | 1.500               | 100                 |
| 90°   | 2                   | 5                 | 1.500               | 50                  |
| 60°   | 8                   | 20                | 1.500               | 200                 |
| 60°   | 8                   | 20                | 2.000               | 200                 |

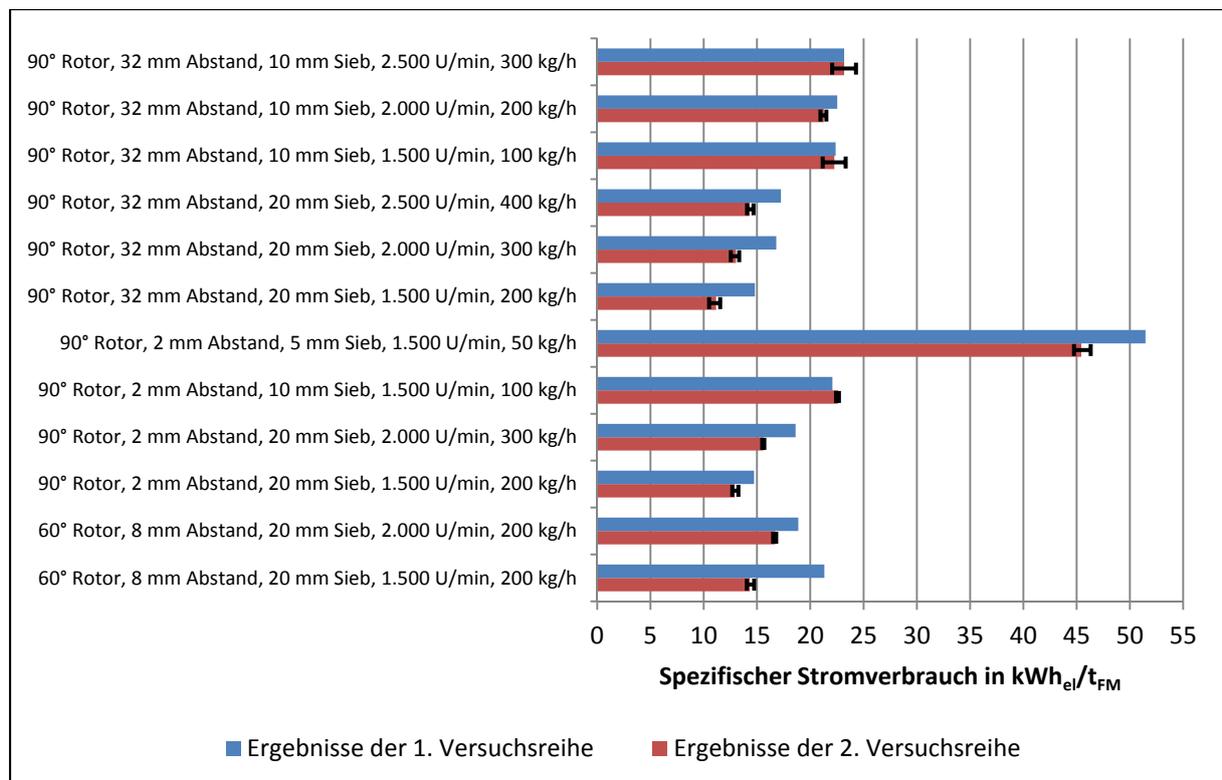


Abbildung 5-44: Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch für Triticalestroh

Die optimale Kombination der untersuchten Einstellungen stellt auch in der zweiten Versuchsreihe mit einem spezifischen Stromverbrauch von 11,2 kWh<sub>el</sub>/t der Rotor mit 90° An-

stellwinkel, einem Siebabstand von 32 mm, einer Siebweite von 20 mm, einer Drehzahl von 1.500 U/min und einem Durchsatz von 200 kg/h dar.

### Ergebnisse zum Stromverbrauch bei Hafer-Ganzpflanzensilage (Hafer-GPS)

Als beste Einstellungen beim Aufschluss von Hafer-GPS zeigte sich in der ersten Versuchsreihe sehr deutlich die beiden Einstellungen 60°-Rotor bei einem Abstand von 8 mm zwischen Prallelement und Siebmitte, einer Drehzahl von 1.500 U/min und einem Durchsatz von fast 2.000 kg/h sowie 90°-Rotor bei einem Abstand von 32 mm zwischen Prallelement und Siebmitte, einer Drehzahl von 1.500 U/min und einem Durchsatz von 1.500 kg/h. Abbildung 5-45 zeigt die Ergebnisse dieser Einstellungen für beide Versuchsreihen. Auch hier liegen die Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch sehr nah zusammen. Im direkten Vergleich der beiden Einstellungen schneidet die Rotorkombination 90° Anstellwinkel und 32 mm Siebabstand mit einem spezifischen Stromverbrauch von 2,9 kWh<sub>el</sub>/t etwas besser ab.

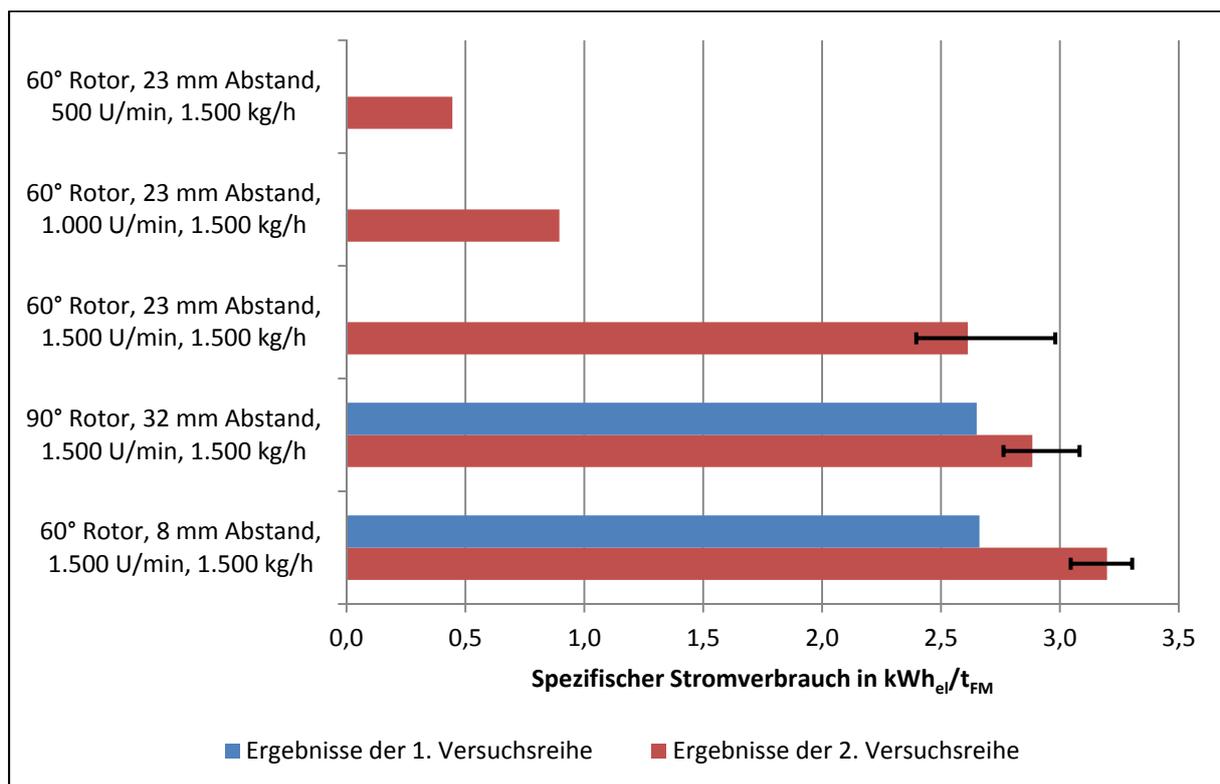


Abbildung 5-45: Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch für Hafer-Ganzpflanzensilage

Außerhalb des Versuchsprogramms wurde zudem die Rotorkombination 60° Anstellwinkel und 23 mm Siebabstand ebenfalls bei einer Drehzahl von 1.500 U/min und einem Durchsatz 1.500 kg/h getestet. Dabei liegt der spezifische Stromverbrauch mit 2,6 kWh<sub>el</sub>/t zwar noch etwas niedriger als bei den anderen beiden Kombinationen, jedoch noch auf gleichem Niveau. Dies ändert sich wesentlich bei einer Reduzierung der Drehzahl auf 1.000 und schließlich

500 U/min. Bei einer Drehzahl von 500 U/min sinkt der spezifische Stromverbrauch auf gerade einmal 0,4 kWh<sub>el</sub>/t. Bemerkenswert ist der mit 1.500 kg/h weiterhin hohe Durchsatz. Eine Wiederholung der beiden Versuche war leider nicht möglich, da kein Material mehr vorhanden war. Daher wurden auch bei der weiteren Auswertung diese beiden Ergebnisse nicht berücksichtigt. Die Tendenz ist jedoch aufgrund der geringen Schwankungen innerhalb der übrigen Versuche durchaus aussagekräftig.

### Ergebnisse zum Stromverbrauch bei Maisstroh

Für die Zerkleinerungsversuche mit Maisstroh wurden aufgrund der gewonnenen Erfahrungen aus den Untersuchungen mit dem Triticalestroh der Rotor mit 90° Anstellwinkel und 32 mm sowie 2 mm Siebabstand verwendet. Bei beiden Rotorkombinationen wurde das 20 mm Sieb und beim 2 mm Siebabstand auch das 10 mm und 5 mm Sieb eingesetzt. Das Sieb mit 10 mm Maschenweite konnte aufgrund einer beschränkten Materialmenge nur bei einem Siebabstand getestet werden. Zur Vervollständigung einer Reihe wurde der Siebabstand von 2 mm gewählt. Alle Versuche wurden bei einer Drehzahl von 1.500 U/min und den jeweils maximal möglichen Durchsätzen durchgeführt. Abbildung 5-46 zeigt die Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch für Maisstroh.

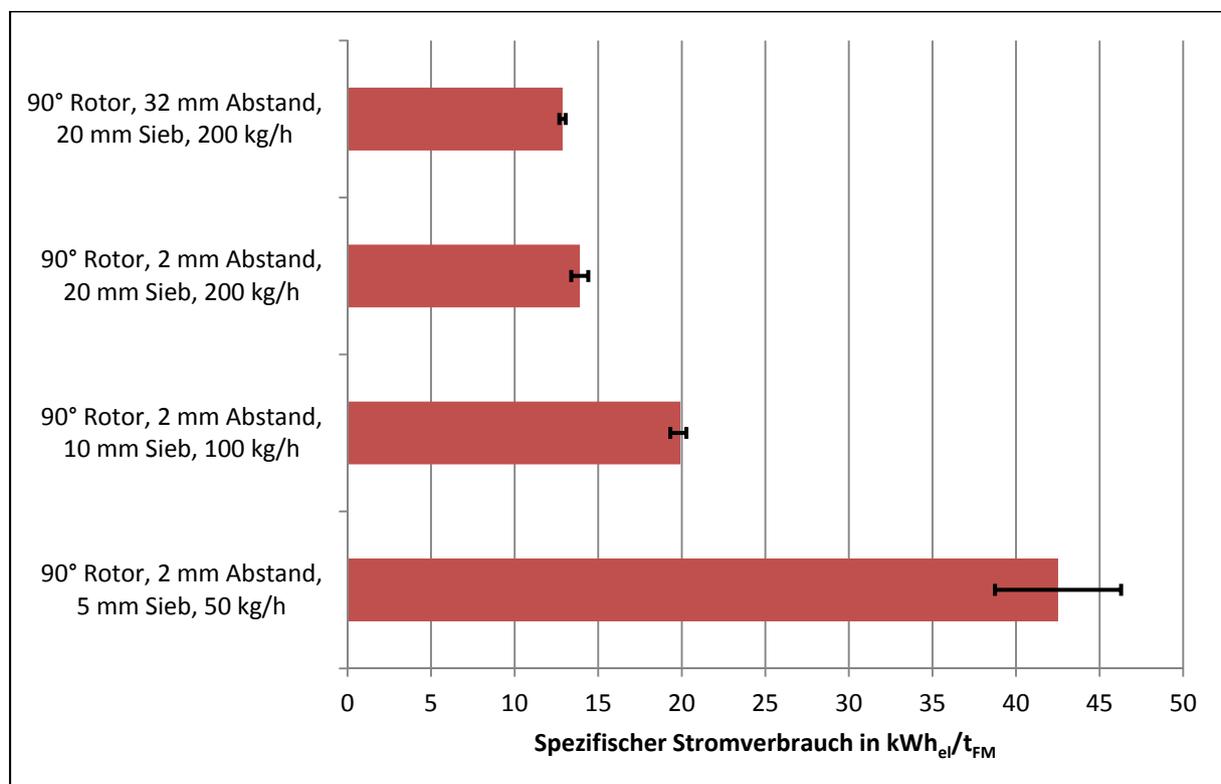


Abbildung 5-46: Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch für Maisstroh (Einstellung: 1.500 U/min)

Wie bei den Ergebnissen zum Triticalestroh liegt die Einstellung 90°-Rotor und 32 mm Sieb-  
abstand mit 12,9 kWh<sub>el</sub>/t nur geringfügig unter der Rotorkombination mit 2 mm Siebabstand  
beim 20 mm Sieb. Insgesamt liegen alle ermittelten spezifischen Stromverbräuche auf einem  
vergleichbaren Niveau mit denen bei der Zerkleinerung von Triticalestroh.

### Ergebnisse zum Stromverbrauch bei Pferdemist

Bei den Zerkleinerungsversuchen mit Pferdemist verstopften die Siebe mit der aus den Versu-  
chen mit Hafer-GPS als beste Einstellung hervorgegangenen Rotorkombination mit 90° An-  
stellwinkel und 32 mm Siebabstand. Dabei legten sich die Strohfasern aus dem Mist um die  
senkrechten Stege, wodurch sich die Verstopfung aufbaute. Daher wurde neben dem 60°-  
Rotor mit 8 mm Siebabstand bei den drei verschiedenen Drehzahlen und maximal möglichen  
Durchsätzen der 90°-Rotor mit 2 mm Siebabstand bei 1.500 und 2.000 U/min sowie ebenfalls  
maximal möglichen Durchsätzen untersucht. Abbildung 5-47 zeigt die Ergebnisse zum spezi-  
fischen Stromverbrauch für Pferdemist.

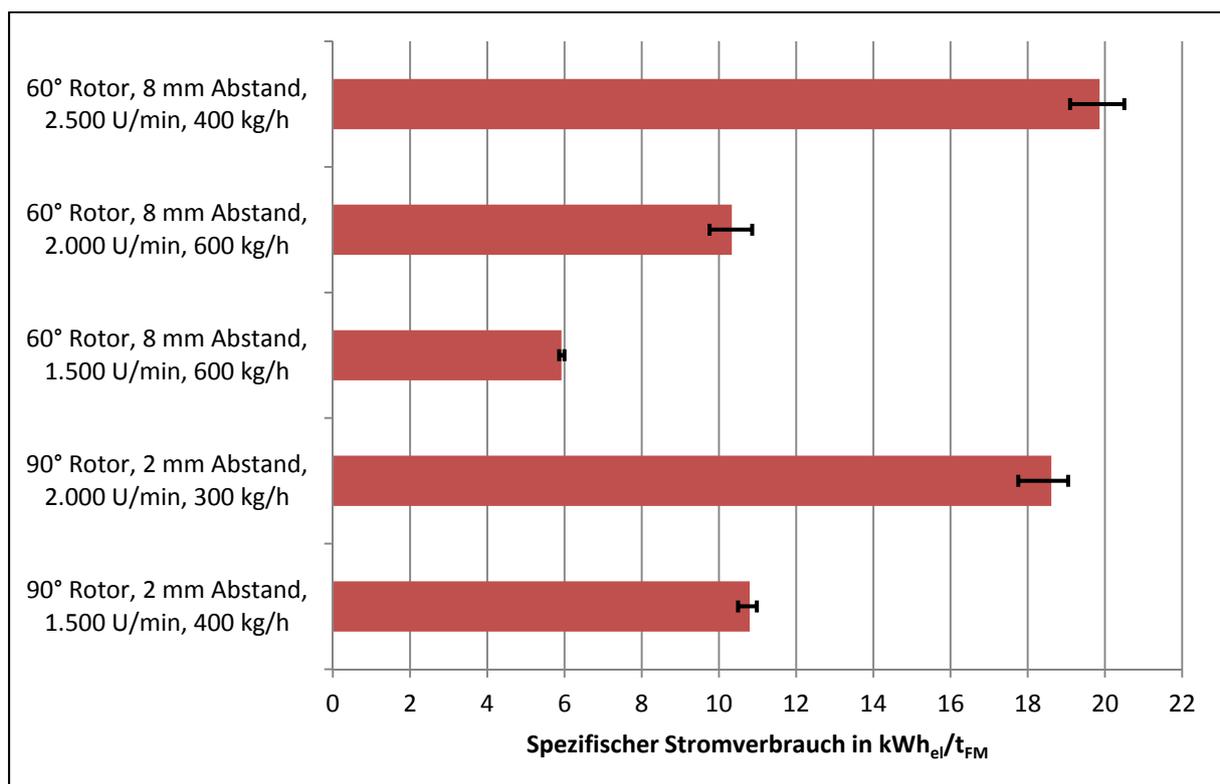


Abbildung 5-47: Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch für Pferdemist (Einstellung:  
50 mm RE Sieb)

Der geringste spezifische Stromverbrauch bei der Zerkleinerung des Pferdemistes mit  
5,9 kWh<sub>el</sub>/t wurde bei der Einstellung 60°-Rotor, 8 mm Siebabstand, 1.500 U/min und einem  
Durchsatz von 600 kg/h erreicht. Höhere Drehzahlen haben neben höheren spezifischen  
Stromverbräuchen auch niedrigere Durchsätze zur Folge. Auch lassen sich mit Pferdemist

nicht die hohen Durchsätze wie bei Hafer-GPS realisieren. Im direkten Vergleich der beiden Substrate liegen die Ergebnisse für den spezifischen Stromverbrauch, unter Berücksichtigung der gleichen Einstellungen, ebenfalls auf einem vergleichbaren Niveau.

## 5.6 Vergleichsversuch mit dem Prallreaktor an der Biogasanlage Sehanö

An der Biogasanlage Sehanö Bioenergie GmbH & Co. KG in Ovelgönne wird bereits ein Prallreaktor in der Praxis eingesetzt. Durch die langjährige Erfahrung des Betreibers mit der Anlage bot sich hier ein Vergleich gegenüber der Versuchsanlage an. Dazu werden in diesem Kapitel die Biogasanlage sowie die Erfahrungen des Betreibers mit dem Prallreaktor beschrieben und die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Die Daten zu den Aufwendungen und Kosten werden im Kapitel 6.3 zur Wirtschaftlichkeit aufgegriffen.

Die Biogasanlage hat eine installierte elektrische Leistung von 265 kW<sub>el</sub>. Der installierte Prallreaktor mit einer elektrischen Anschlussleistung von 55 kW<sub>el</sub> ist für Biogasanlagen bis zu einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW<sub>el</sub> konzipiert. Die tägliche Substratmischung besteht aus 4 t/d Silomais, 5 t/d Rinder- und Pferdemit, 6 t/d Grassilage und 15 m<sup>3</sup>/d Rindergülle. Der Trockensubstanzgehalt im Fermenter liegt immer bei über 10 %. Der durchschnittliche Stromverbrauch ausschließlich für die Zerkleinerung der festen Substrate mit dem Prallreaktor beträgt etwa 11 kWh<sub>el</sub>/t Substrat. Nach Angaben des Betreibers liegen der Eigenstromverbrauch allein für den Prallreaktor bei 3 % und der gesamte Eigenstromverbrauch bei 12 %. [SEGGGER-HARBERS 2015] Auf dem Foto in Abbildung 5-48 ist der Prallreaktor an der Biogasanlage Sehanö zu sehen.

Mit dem Prallreaktor können pro Stunde 1,5 t/h Substrat vorbehandelt werden. Bei einer täglichen Menge an festen Substraten von 15 t/d wird der Prallreaktor somit zehn Stunden pro Tag betrieben. Die Zu- und Abführung für den Prallreaktor wird über Förderschnecken realisiert, wobei die Geschwindigkeit der Zuführschnecken über die Stromaufnahme des Prallreaktors gesteuert wird. Bei Erreichen von 60 % des Wertes der maximalen Leistungsaufnahme vom Motor des Prallreaktors verlangsamt sich die Förderschnecke, bis sie bei 90 % stoppt. Sobald die Stromaufnahme unter den Wert von 40 % sinkt, läuft die Schnecke wieder mit voller Geschwindigkeit. [SEGGGER-HARBERS 2015]

Der Prallraum hat einen Durchmesser von 1 m und der 60°-Rotor wird bei einer Geschwindigkeit von 1.500 U/min betrieben. Die Höhe der genuteten Prallelemente betragen 90 mm und der Abstand zwischen Prallelement und Siebmitte 20 mm. Im Gegensatz zu der Versuchsanlage ist der Auswurf einseitig durch drei Siebplatten mit einem Schlitz von 70 mm

Höhe und einer mit 120 mm Höhe. Alle Öffnungen haben eine Breite von 200 mm. Die Gesamtanzahl der Platten ist die gleiche wie bei der Versuchsanlage, wodurch sich vier Blindplatten ergeben und zwei Platten entsprechen der Störstoffklappe. Das erste Sieb in Drehrichtung ist durchgehend verstopft. In Abbildung 5-49 sind die Siebplatten des Auswurfs und in Abbildung 5-50 der Prallraum des Prallreaktors der Biogasanlage Sehanu zu sehen.



Abbildung 5-48: Prallreaktor an der Biogasanlage Sehanu



Abbildung 5-49: Siebplatten des Prallreaktors der Biogasanlage Sehanu



Abbildung 5-50: Prallraum des Prallreaktors der Biogasanlage Sehanö

Vor allem auf dem Foto in Abbildung 5-50 sind die Verschleißspuren am genuteten Prallelement (im Vordergrund) und den Prallraum begrenzenden Platten (im Hintergrund) deutlich zu erkennen. Die Siebe und Blindplatten können etwa ein Jahr bis zum Erreichen der Verschleißgrenze genutzt werden. Dann werden sie gewendet und somit alle zwei Jahren getauscht. Die genuteten Prallelemente sind geteilt, da sie stärker zum Rand hin verschleifen und somit getrennt voneinander getauscht werden können. Während die inneren Prallelemente einmal im Jahr ersetzt werden, werden die äußeren alle sechs bis zehn Wochen erneuert. Der Verschleiß der äußeren Prallelemente war sehr unterschiedlich, wofür bisher noch keine eindeutigen Ursachen ausgemacht werden konnten. Darüber hinaus wurden alle zwei Monate sämtliche Befestigungsschrauben an den Verschleißteilen gewechselt, die mit Substrat in Kontakt kommen. Diese vorbeugende Maßnahme wird vom Betreiber durchgeführt, um einen erhöhten Aufwand bei der Instandhaltung durch korrodierte Schrauben zu vermeiden. [SEGGER-HARBERS 2015]

Nach den Erfahrungen des Betreibers mit dem Prallreaktor gefragt, berichtete dieser von einem mehrtägigen Ausfall des Prallreaktors, wodurch sich direkt eine Schwimmschicht im Fermenter bildete. Gleichzeitig wurde jedoch keine Veränderung bei der Stromaufnahme für die Rührer beobachtet. Darüber hinaus traten trotz des hohen Trockensubstanzgehaltes und der faserhaltigen Substratmischung keinerlei Problemen mit Schwimmschichten im Fermenter auf. [SEGGER-HARBERS 2015]

An trockenen und warmen Tagen wird das Substrat im Vorlagebehälter mit Wasser angefeuchtet, bzw. feucht gehalten, um einen zuverlässigen Betrieb des Prallreaktors zu sichern. Bei höheren Anteilen von angetrocknetem Substrat sank der Durchsatz und der Stromverbrauch stieg zeitgleich. Und nach Einschätzung des Betreibers sollte der Abstand zwischen Pallelement und Sieb so klein wie möglich sein, um einen zuverlässigen Betrieb und ein gutes Zerkleinerungsergebnis zu gewährleisten. [SEGGGER-HARBERS 2015]

Beim Besuch der Biogasanlage im Juli 2015 wurden zudem Untersuchungen zu Durchsatz, Wirkleistung und Stromverbrauch vorgenommen. Neben der Möglichkeit die Untersuchungen an seiner Anlage durchzuführen, wurde vom Betreiber auch Material für die Versuche mit der Versuchsanlage an der FH Münster zur Verfügung gestellt.

Für die Untersuchungen an dem Prallreaktor der Biogasanlage Sehanö wurden drei Versuche jeweils über eine Zeit von etwa 15 Minuten durchgeführt. Dazu wurde die Substratmenge, der Wirkleistungsverlauf sowie die Versuchszeit aufgenommen und hinsichtlich des Stromverbrauchs ausgewertet. In Tabelle 5-5 sind die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt.

Demnach liegt der mittlere spezifische Stromverbrauch bei 12,0 kWh<sub>el</sub>/t Substratmischung, die mittlere Wirkleistung bei etwa 29 kW<sub>el</sub> und der Durchsatz bei ca. 2.400 kg/h.

Tabelle 5-5: Ergebnisse der Untersuchungen am Prallreaktor der Biogasanlage Sehanö

|                              |                        | <b>Versuch 1</b> | <b>Versuch 2</b> | <b>Versuch 3</b> | <b>Mittelwert</b> |
|------------------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| <b>Versuchsmenge</b>         | [kg]                   | 550              | 600              | 550              | 567               |
| <b>Versuchszeit</b>          | [s]                    | 854              | 852              | 842              | 849               |
| <b>Durchsatz</b>             | [kg/h]                 | 2.319            | 2.535            | 2.352            | 2.402             |
| <b>Mittlere Wirkleistung</b> | [W <sub>el</sub> ]     | 28.289           | 29.240           | 28.775           | 28.768            |
| <b>Spez. Stromverbrauch</b>  | [kWh <sub>el</sub> /t] | 12,2             | 11,5             | 12,2             | 12,0              |

Für die Versuche mit der Substratmischung an der Versuchsanlage wurde zusätzlich die Rotorkombination 60° Anstellwinkel mit 23 mm Siebabstand getestet, da diese den Einstellungen des Prallreaktors an der Biogasanlage (60°-Rotor mit 20 mm Siebabstand) am nächsten kommt. Zudem wurde eine Drehzahl von 2.620 U/min untersucht, da diese durch Umrechnung über die Umfangsgeschwindigkeit der Drehzahl des Prallreaktors an der Biogasanlage mit 1.500 U/min entspricht.

Erstes Ergebnis der Zerkleinerungsversuche mit dem Prallreaktor ist, dass bei allen Einstellungen die Siebe verstopften. Nur bei der Rotorkombination mit einem Siebabstand von 2 mm wurde das Material durch die Siebschlitze gepresst. Da dies jedoch nicht zielführend ist,

wurde für weitere Versuche die Auswurfklappe genutzt und mit Hilfe einer Arretierung auf einen Spalt von 70 mm festgestellt. Damit war eine zuverlässige Betriebsweise gewährleistet. Abbildung 5-51 zeigt die Ergebnisse zum Stromverbrauch für die Substratmischung. Entscheidend sind dabei die beiden Ergebnisse unter Verwendung der festgestellten Auswurfklappe und der zum Vergleich an der Biogasanlage Sehanu bestimmte Stromverbrauch. Dabei wurden bei beiden Einstellungen ein Durchsatz von 400 kg/h erreicht. Als Ergänzung sind auch die Ergebnisse zum Stromverbrauch für die zwei Rotorkombinationen 90°-Rotor mit 2 mm Sieb Abstand und 60°-Rotor mit 23 mm Sieb Abstand bei 1.500 bzw. 2.620 U/min sowie verschiedenen Durchsätzen dargestellt.

Der niedrigste Stromverbrauch von 4,2 kWh<sub>el</sub>/t wurde über die arretierte Auswurfklappe bei einer Drehzahl von 1.500 U/min und einem Durchsatz von 400 kg/h mit der Rotorkombination 60° Anstellwinkel und 23 Sieb Abstand erzielt. Im Vergleich zum Prallreaktor an der Biogasanlage beträgt der Stromverbrauch damit gerade mal 35 %. Die mittlere Wirkleistung liegt bei der Versuchsanlage bei etwa 1,8 kW<sub>el</sub> gegenüber 29 kW<sub>el</sub> und der Durchsatz beträgt mit 400 kg/h ein Sechstel des Durchsatzes bei der Praxisanlage von etwa 2.400 kg/h.

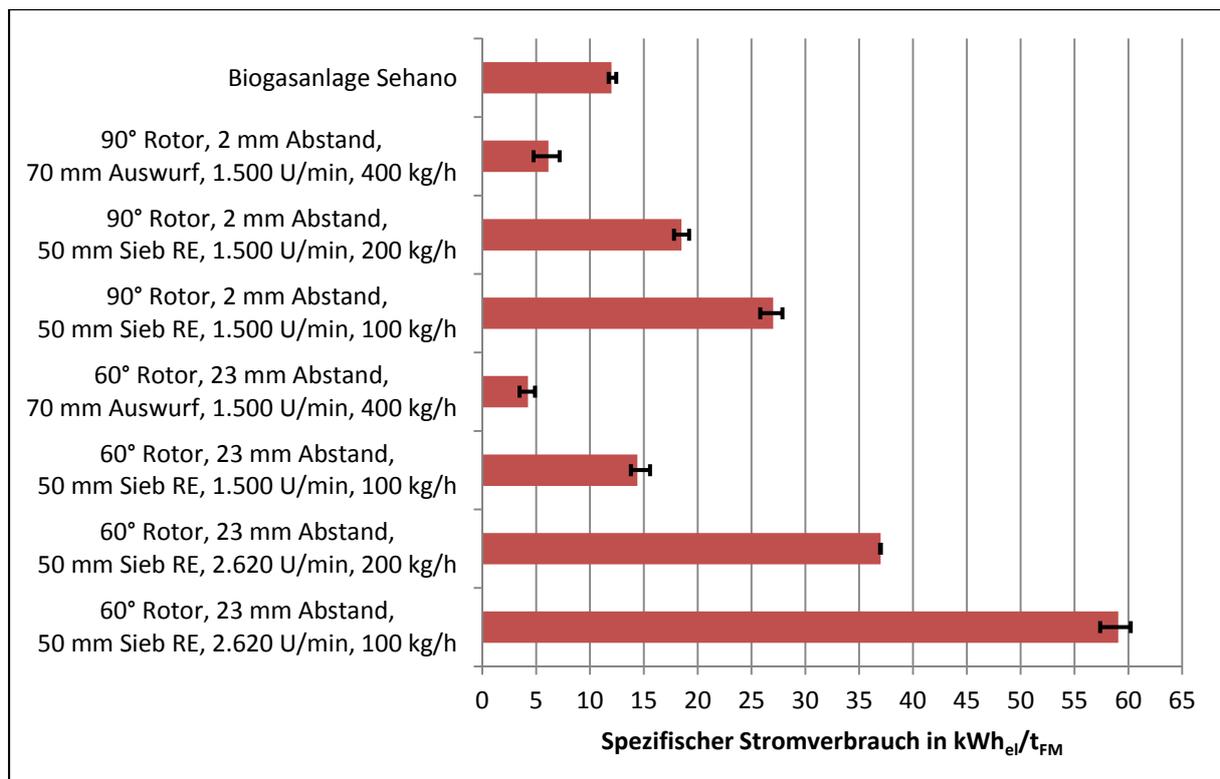


Abbildung 5-51: Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch für eine Substratmischung (53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemit)

Bei den Ergebnissen der Siebanalyse, Abbildung 5-52, zeigt sich bei Betrachtung der mittleren Partikelgröße nur geringe Veränderungen im Vergleich zur unbehandelten Probe. Dage-

gen hat die Zerkleinerung mit dem Prallreaktor bei Betrachtung des Lageparameters  $x'$  aus der RRSB-Verteilungsfunktion einen deutlichen positiven Effekt. Am besten liegen dabei die Probe von der Biogasanlage Sehana und die Rotorkombination mit  $90^\circ$  Anstellwinkel und 2 mm Sieb Abstand beim Sieb mit 50 mm Öffnung. Bei beiden Betrachtungsweisen haben die Einstellungsvarianten, die über die Sieböffnung zerkleinern und mit niedrigeren Durchsätzen betrieben wurden einen positiveren Einfluss auf die Verringerung der Partikelgröße.

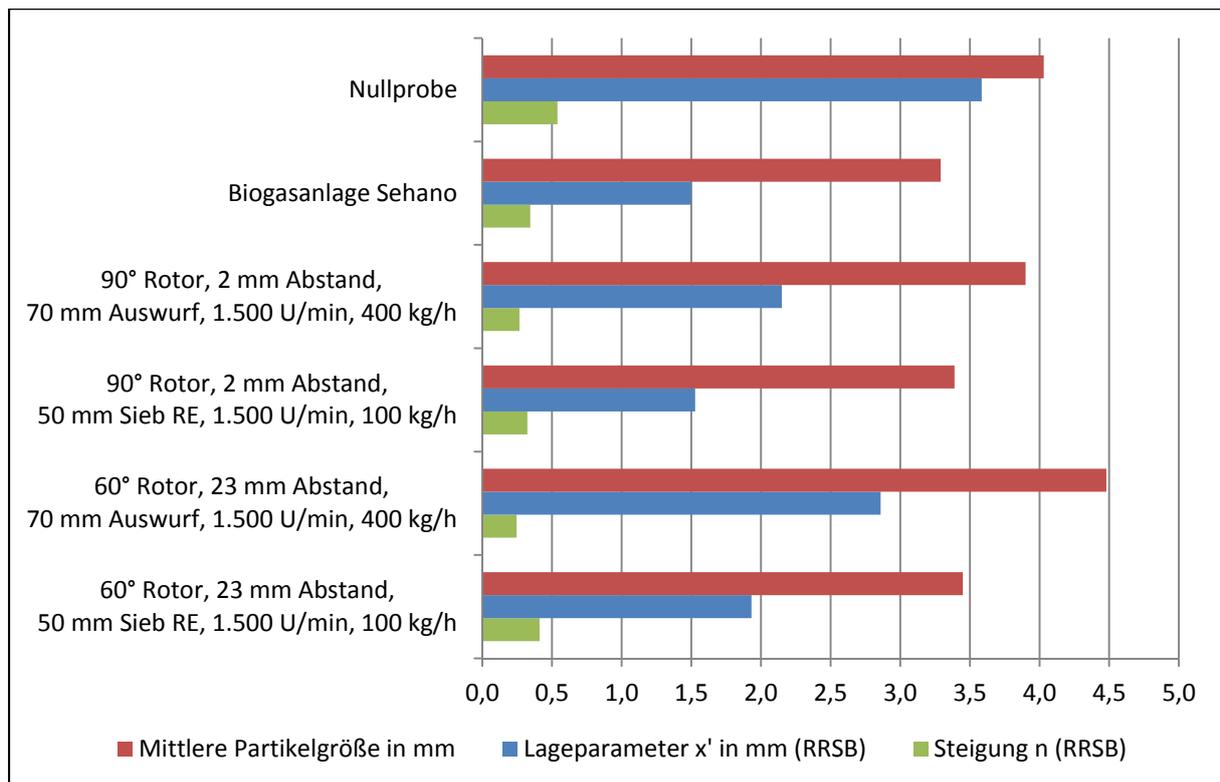


Abbildung 5-52: Ergebnis der Siebanalysen für eine Substratmischung (53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist)

Der Trockenrückstand von der Substratmischung beträgt 25,7 % TR und der organische Trockenrückstand 85,2 % oTR. Abbildung 5-53 zeigt die spezifischen Biogas- und Methanerträge der geprallten Proben der Substratmischung. Alle behandelten Proben zeigen einen deutlichen Mehrertrag an Methan zwischen 8 % und 14 % im Vergleich zur unbehandelten Probe mit 285  $l_N/kg_{oTR}$  Methan.

Beim Vergleich der Ergebnisse von Prallreaktor an der Biogasanlage und der Technikumsanlage sind der Verschleißzustand sowie die im Vergleich zum Durchsatz kleinere Siebdurchgangsfläche der großtechnischen Anlage zu berücksichtigen. Vor allem mit Blick auf die höheren Werte zum Stromverbrauch der Technikumsanlage mit dem 50 mm Sieb wird deutlich, dass sich bei der großtechnischen Anlage eine größere Auslassöffnung ebenfalls positiv

auf die energetische Effizienz auswirken sollte. Zudem zeigen die Ergebnisse zum Methanertrag keine deutliche Abweichung in Abhängigkeit der Auslassöffnung.

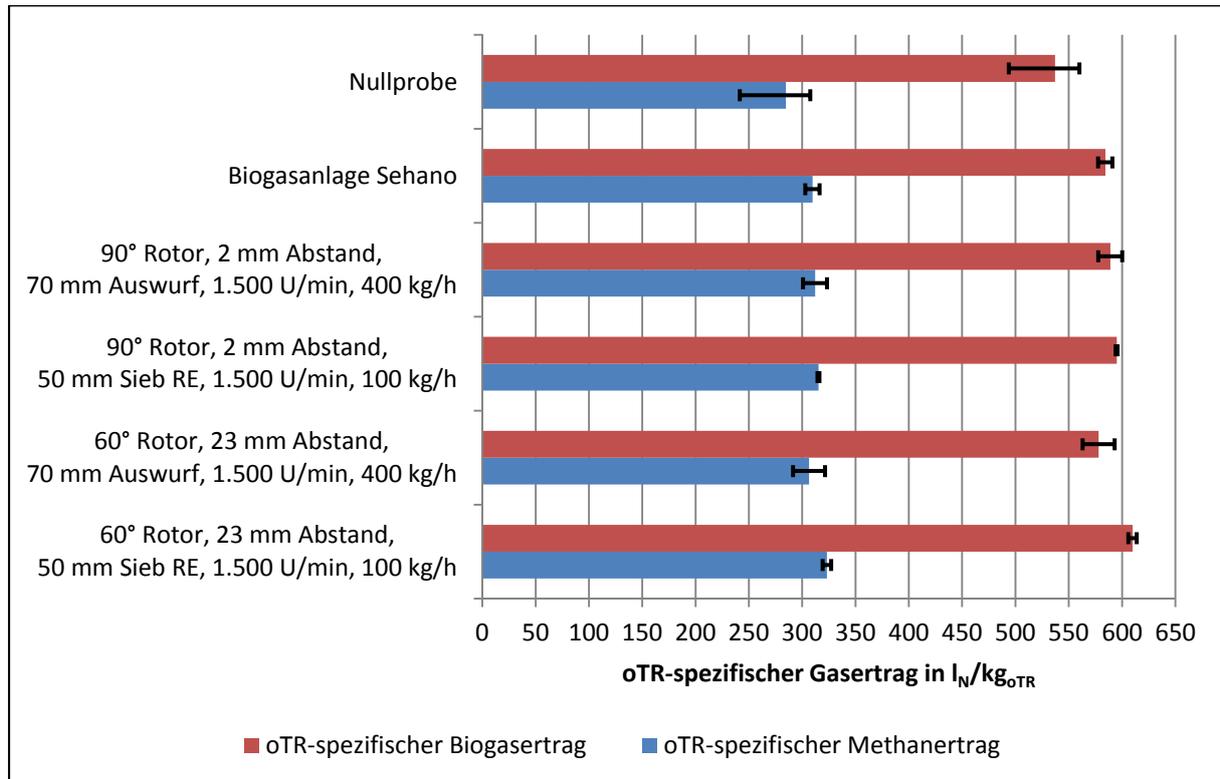


Abbildung 5-53: oTR-spezifischer Biogas- und Methanertrag der gepalltem Substratmischung (53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemit)

## 5.7 Versuche mit dem Extruder

Für die Zerkleinerungsversuche mit dem Extruder wurde der Laborextruder der Fa. Lehmann Maschinenbau des Labors für Umwelttechnik der FH Münster genutzt. Als Substrate wurden die aus der parallel durchgeführten zweiten Versuchsreihe mit dem Prallreaktor verwendet. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen mit dem Extruder dienen der Einordnung und dem Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen mit dem Prallreaktor.

Der Laborextruder hat eine Antriebsleistung von 3 kW<sub>el</sub> und die Schneckendrehzahl beträgt 78 U/min. Die Extruderschnecken haben einen Durchmesser von 53 mm und eine wirksame Länge von 320 mm. Dabei lassen sie sich in die drei Zonen Einzug mit 130 mm, Verdichtung mit 140 mm und Austrag mit 50 mm einteilen. Die runde Austragsöffnung hat einen Durchmesser von 30 mm. Es sind keine Einstellungen an der Anlage möglich. Die Aufgabe des Versuchsgutes erfolgte händisch. In Abbildung 5-54 ist der Versuchsaufbau mit dem Extruder dargestellt.



Abbildung 5-54: Versuchsaufbau Extruder

Die Versuche wurden bei jedem Substrat mit drei Wiederholungen durchgeführt. Der Stromverbrauch wurde wie in Kapitel 5.5.1 beschrieben bestimmt und ausgewertet. Durch Einwaage der Versuchsmenge und Messung der Dauer der Zugabe konnte der Durchsatz berechnet werden. In Abbildung 5-55 ist am Beispiel von Pferdemist der optische Erfolg der Extrusion deutlich zu erkennen.



Abbildung 5-55: Pferdemist vor (links) und nach (rechts) Extrusion

Bei den trockenen Substraten Triticalestroh und Maisstroh musste Wasser zugegeben werden, um den Gutfluss zu verbessern und ein Verstopfen zu vermeiden. Zudem dient das Wasser

dazu, einen Teil der während des Extrudierens entstehenden Wärme abzuführen. Das Wasser wurde dazu ebenfalls händisch gleichzeitig mit dem Stroh in den Zufuhrtrichter des Extruders gegeben. Dabei wurde nur so viel Wasser wie nötig dazu gegeben und die Menge ausgewogen. Tabelle 5-6 zeigt die eingewogenen Substratmengen, die Menge an zusätzlichem Wasser bei Triticale- und Maisstroh sowie die Trockenrückstandsgehalte vor und nach der Wasserzugabe. Um 200 g Triticalestroh mit dem Extruder zu zerkleinern waren zusätzlich 650 g Wasser notwendig. Dadurch sank der Trockenrückstandsgehalt von 93 % auf 22 % in der extrudierten Probe.

Tabelle 5-6: Eingewogene Mengen und Trockenrückstandsgehalte

|  |      | <b>Substrat-<br/>mischung</b> | <b>Hafer-<br/>GPS</b> | <b>Pferde-<br/>mist</b> | <b>Triticale-<br/>stroh</b> | <b>Mais-<br/>stroh</b> |
|--|------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------|
| <b>Eingewogene Menge</b>                 | [kg] | 1,0                           | 1,0                   | 0,4                     | 0,2                         | 0,2                    |
| <b>Wasserzugabe</b>                      | [kg] |                               |                       |                         | 0,65                        | 0,50                   |
| <b>TR-Gehalt</b>                         | [%]  | 25,7%                         | 24,6%                 | 34,6%                   | 93,0%                       | 93,1%                  |
| <b>TR-Gehalt<br/>(nach Wasserzugabe)</b> | [%]  |                               |                       |                         | 22,0%                       | 26,7%                  |
| <b>oTR-Gehalt</b>                        | [%]  | 85,2%                         | 91,7%                 | 85,6%                   | 96,3%                       | 94,9%                  |

TR: Trockenrückstand; oTR: organischer Anteil des Trockenrückstandes; GPS: Ganzpflanzensilage

In Tabelle 5-7 sind die Ergebnisse aus den Versuchen mit dem Extruder dargestellt. Dabei ist die zugegebene Wassermenge mit aufgeführt, fließt in die Ergebnisse von Durchsatz und Stromverbrauch jedoch nicht ein. Auch bei den weiteren Auswertungen zum spezifischen Stromverbrauch bleibt die zugegebene Wassermenge unberücksichtigt, um Verzerrungen in den Ergebnissen zu vermeiden.

Tabelle 5-7: Ergebnisse der Versuche mit dem Extruder (bezogen auf die Substratmenge ohne Wasserzugabe)

|                              |                        | <b>Substrat-<br/>mischung</b> | <b>Hafer-<br/>GPS</b> | <b>Pferde-<br/>mist</b> | <b>Triticale-<br/>stroh</b> | <b>Mais-<br/>stroh</b> |
|------------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------|
| <b>Eingewogene Menge</b>     | [kg]                   | 1,0                           | 1,0                   | 0,4                     | 0,2                         | 0,2                    |
| <b>Wasserzugabe</b>          | [kg]                   |                               |                       |                         | 0,65                        | 0,50                   |
| <b>Versuchszeit</b>          | [s]                    | 42,3                          | 50,2                  | 116,8                   | 147,3                       | 178,3                  |
| <b>Durchsatz</b>             | [kg/h]                 | 85,9                          | 74,7                  | 15,1                    | 5,2                         | 4,1                    |
| <b>Mittlere Wirkleistung</b> | [W <sub>el</sub> ]     | 1.294                         | 1.497                 | 1.391                   | 1.345                       | 1.245                  |
| <b>Spez. Stromverbrauch</b>  | [kWh <sub>el</sub> /t] | 15,2                          | 20,6                  | 95,0                    | 271,1                       | 308,1                  |

GPS: Ganzpflanzensilage

Der erzielbare Durchsatz (ohne Berücksichtigung der Wasserzugabe) schwankt in Abhängigkeit vom Substrat sehr stark. So liegt dieser für Maisstroh bei 4,1 kg/h gegenüber der Substratmischung mit 85,9 kg/h. Ähnlich verhält es sich mit dem spezifischen Stromverbrauch, bei der Substratmischung mit 15,2 kWh<sub>el</sub> den niedrigsten und Maisstroh mit 308,1 kWh<sub>el</sub> den höchsten Wert aufweist. Zudem unterliegen die spezifischen Stromverbräuche innerhalb der drei Wiederholungen für jedes Substrat bei steigendem Stromverbrauch höheren Schwankungen. Dies wird in Abbildung 5-56, die die Ergebnisse bezüglich des Stromverbrauchs beim Extruder zeigt, deutlich. Im Vergleich zu den Ergebnissen beim Prallreaktor liegen diese bei allen Substraten deutlich über den dort erzielten Stromverbräuchen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass für die Versuche mit dem Extruder ein Gerät im halbtechnischen Maßstab verwendet wurde. Dadurch können nur bedingt Rückschlüsse auf den Stromverbrauch einer großtechnischen Ausführung gezogen werden und auch ein Vergleich mit den Ergebnissen aus den Versuchen mit dem Prallreaktor ist nicht zulässig.

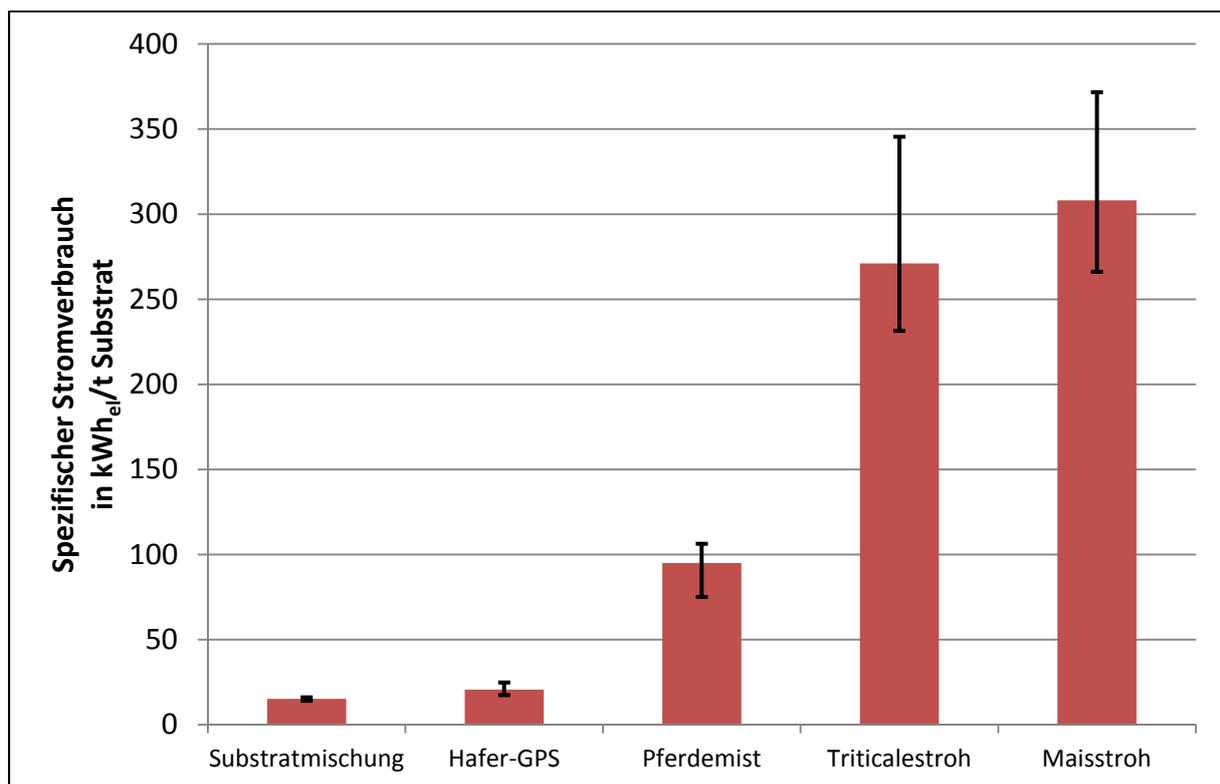


Abbildung 5-56: Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch bei der Vorbehandlung mit dem Extruder (ohne Berücksichtigung der Wasserzugabe; Substratmischung: 53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist)

Aus den Ergebnissen zum Durchsatz und Stromverbrauch wird ersichtlich, dass bei feuchteren Substraten höhere Durchsätze bei gleichzeitig niedrigerem Stromverbrauch realisiert werden können. Um dabei den Einfluss des Trockenrückstandgehalts auf die Ergebnisse abschätzen zu können, sind in Tabelle 5-8 die auf den organischen Trockenrückstand bezogenen Ergebnisse der Versuche mit dem Extruder aufgeführt.

Tabelle 5-8: oTR-spezifischer Durchsatz und Stromverbrauch der Versuche mit dem Extruder

|                             |  | <b>Substrat-<br/>mischung</b> | <b>Hafer-<br/>GPS</b> | <b>Pferde-<br/>mist</b> | <b>Triticale-<br/>stroh</b> | <b>Mais-<br/>stroh</b> |
|-----------------------------|--|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------|
| <b>TR-Gehalt</b>            | [%]                                    | 25,7%                         | 24,6%                 | 34,6%                   | 93,0%                       | 93,1%                  |
| <b>oTR-Gehalt</b>           | [%]                                    | 85,2%                         | 91,7%                 | 85,6%                   | 96,3%                       | 94,9%                  |
| <b>Eingewogene Menge</b>    | [kg <sub>oTR</sub> ]                   | 0,219                         | 0,225                 | 0,129                   | 0,179                       | 0,177                  |
| <b>Durchsatz</b>            | [kg <sub>oTR</sub> /h]                 | 18,6                          | 16,2                  | 4,0                     | 4,4                         | 3,6                    |
| <b>Spez. Stromverbrauch</b> | [kWh <sub>el</sub> /t <sub>oTR</sub> ] | 69,5                          | 92,6                  | 349,0                   | 307,2                       | 349,0                  |

TR: Trockenrückstand; oTR: organischer Anteil des Trockenrückstandes; GPS: Ganzpflanzensilage

Aus dieser Betrachtung der Ergebnisse kristallisieren sich zwei Substratgruppen mit ähnlichen erzielbaren Durchsätzen und Stromverbräuchen heraus. Bei der einen Gruppe handelt es sich um Silagen und bei der anderen um Stroh. Mit den Silagen können gegenüber Stroh und Mist höhere Durchsätze und niedrigere Stromverbräuche realisiert werden. Um dazu einen möglichen Zusammenhang zeigen zu können, sind in Abbildung 5-57 alle Einzelversuche hinsichtlich des spezifischen Stromverbrauchs in Abhängigkeit vom Durchsatz in einem Diagramm abgebildet.

Aus dieser Darstellung lässt sich eine Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz in Form einer Exponentialfunktion erkennen. Würde sich dieser Zusammenhang bestätigen, könnte aus dem erzielbaren Durchsatz beim Laborextruder auf den spezifischen Stromverbrauch geschlossen werden. Daher wurde in Abbildung 5-58 das Diagramm aus Abbildung 5-57 in logarithmischer Form dargestellt und die Trendlinie gezogen. Dabei ergibt sich in dieser Darstellung eine Gerade mit einem Bestimmtheitsmaß von 99,59 %, wodurch ein deutlicher Zusammenhang zwischen Durchsatz und spezifischem Stromverbrauch beim verwendeten Extruder gezeigt wird.

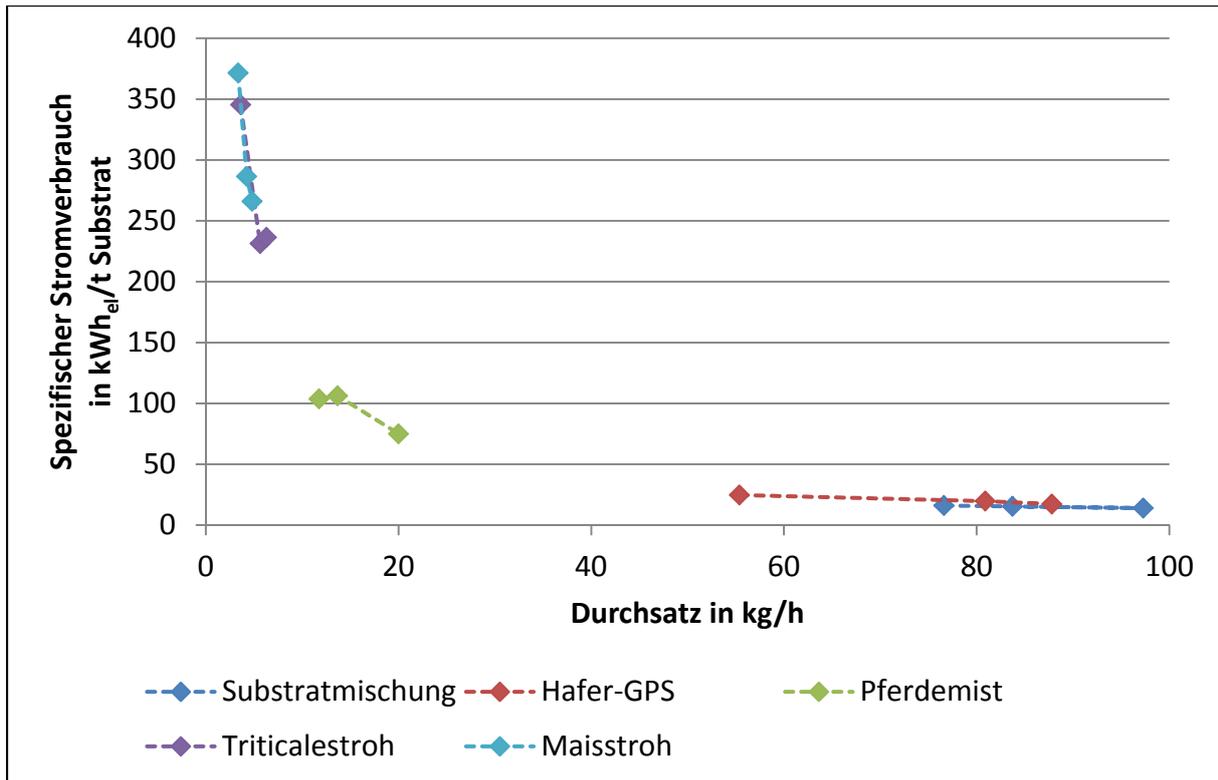


Abbildung 5-57: Spezifischer Stromverbrauch Extruder in Abhängigkeit vom Durchsatz (ohne Berücksichtigung der Wasserzugabe; Substratmischung: 53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist)

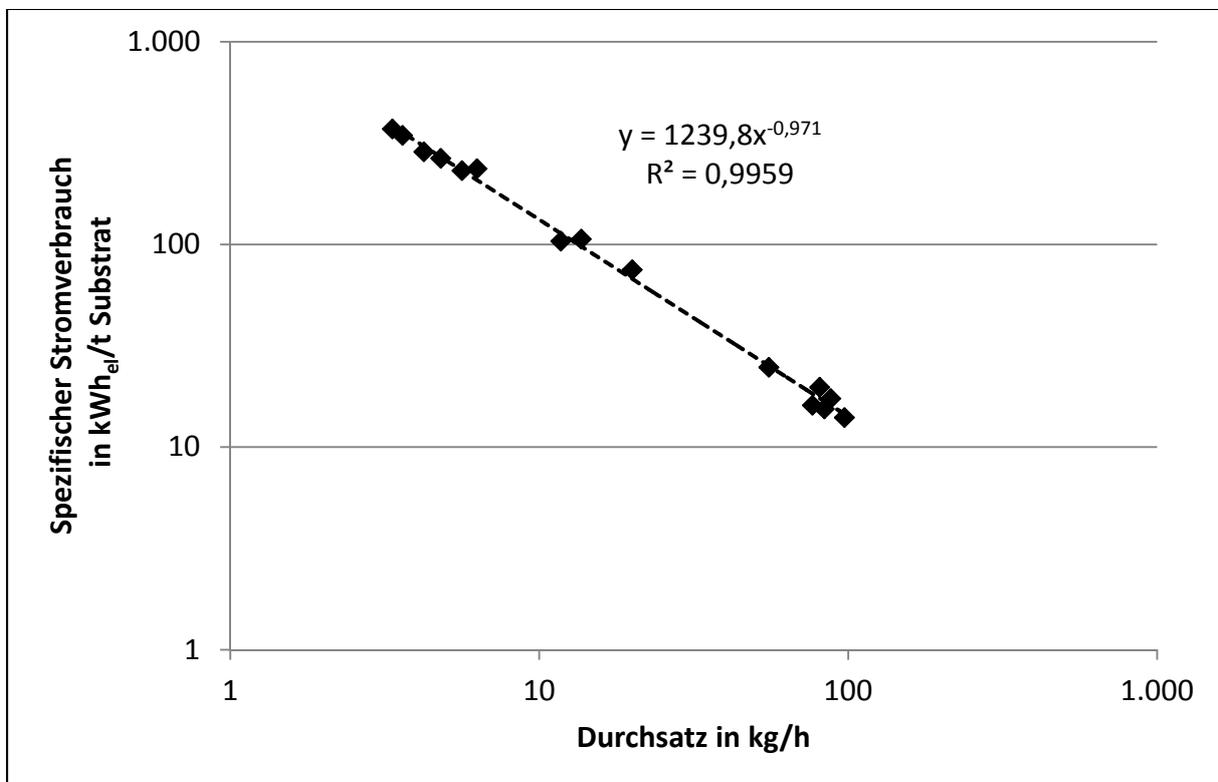


Abbildung 5-58: Logarithmische Darstellung mit Trendlinie des spezifischen Stromverbrauchs in Abhängigkeit vom Durchsatz beim Extruder (ohne Berücksichtigung der Wasserzugabe)

Abbildung 5-59 zeigt die Ergebnisse der Siebanalysen für die extrudierten Substrate. Im Vergleich liegt die mittlere Partikelgröße des extrudierten Triticalestrohs mit 4,3 mm im oberen Bereich von den über das 20 mm Sieb geprallten Proben. Maisstroh dagegen liegt mit der mittleren Partikelgröße von 1,6 mm im Bereich der über das 10 mm Sieb geprallten Probe. Bei der Hafer-GPS führte die Extrusion zu einer deutlichen Verringerung der mittleren Partikelgröße auf 2,1 mm gegenüber dem besten Ergebnis beim Prallreaktor mit 4,2 mm. Auch die mittlere Partikelgröße von Pferdemist fällt durch die Extrusion mit 4,0 mm niedriger aus als der beste Wert durch das Prallen mit 4,6 mm. Bei der Substratmischung reiht sich die mittlere Partikelgröße von 4,0 mm in die Ergebnisse mit dem Prallreaktor ein und liegt auf einem Niveau mit der unbehandelten Probe.

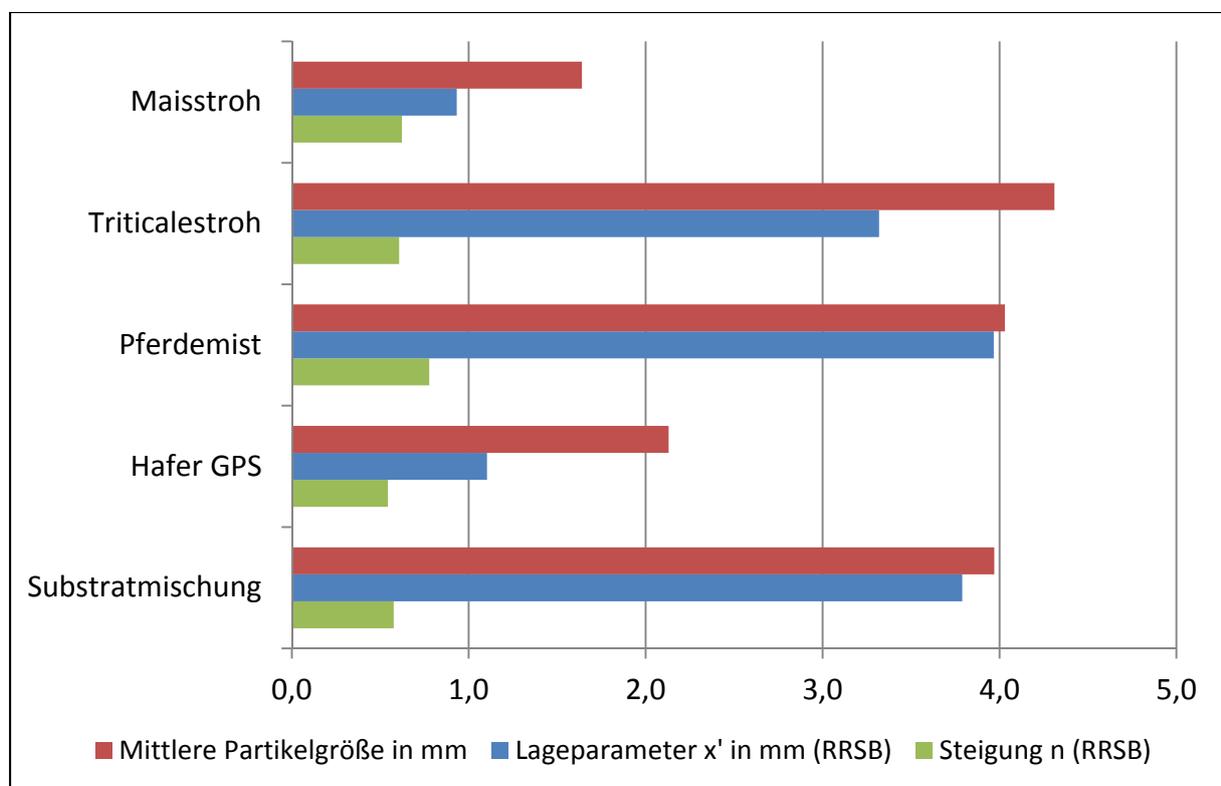


Abbildung 5-59: Ergebnis der Siebanalysen der extrudierten Proben (Substratmischung: 53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist)

Der Aufschluss mit dem Extruder kann je nach Substrat zu Mehrerträgen an Methan führen. So wurde bei Pferdemist eine Steigerung des Methanertrags von 35 % realisiert. Auch bei der Substratmischung und beim Triticalestroh ergab sich ein deutlicher Mehrertrag von bis zu 20 %. Dagegen wurde bei Hafer-GPS und Maisstroh, wie beim Prallreaktor, durch die Vorbehandlung kein Mehrertrag an Methan erreicht. Abbildung 5-60 zeigt die spezifischen Methanerträge der extrudierten Substrate im Vergleich zu den unbehandelten Proben. Die Methanerträge wurden wie in Kapitel 5.4.1 beschrieben bestimmt und ausgewertet.

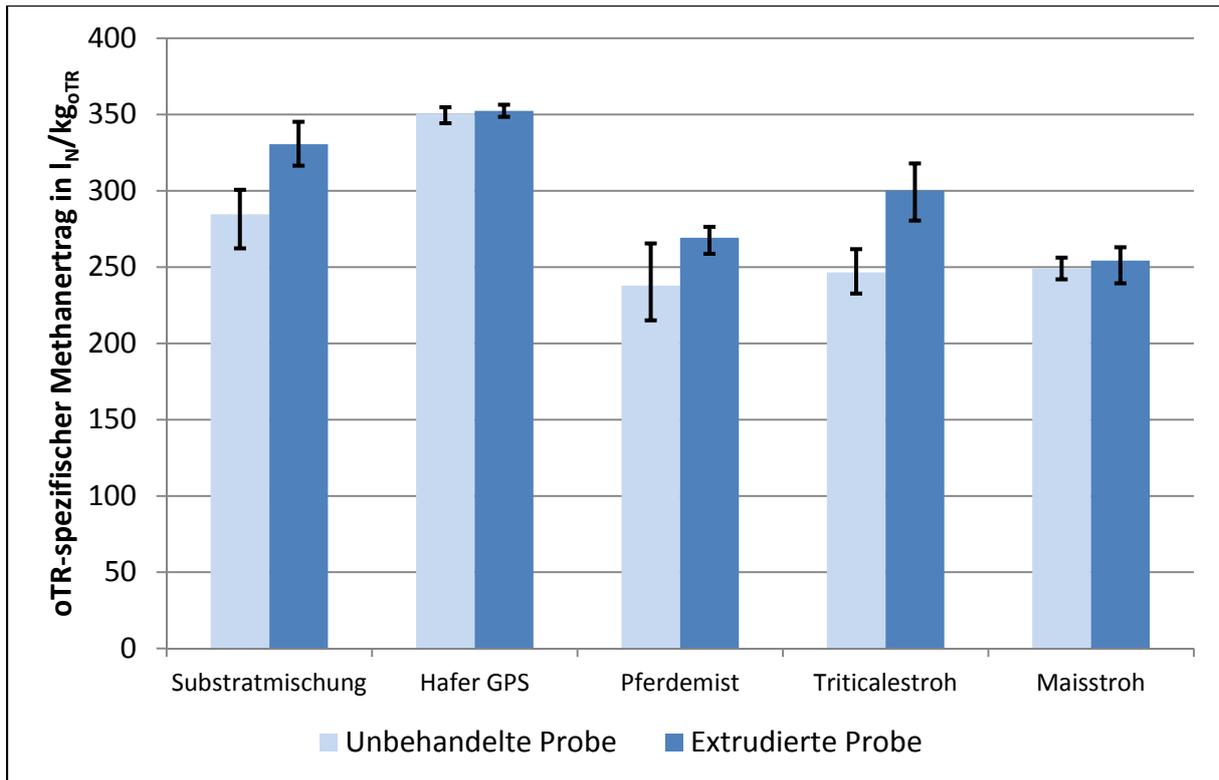


Abbildung 5-60: oTR-spezifischer Methanertrag der extrudierten Proben (Substratmischung: 53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist)

## 6 AUSWERTUNG DER UNTERSUCHUNGEN

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe zusammengeführt und hinsichtlich der Energieeffizienz, dem Zusammenhang zwischen Partikelgröße und Stromverbrauch bzw. Methanertrag sowie der Wirtschaftlichkeit ausgewertet. Weitere mögliche positive Effekte auf den Biogasprozess, wie z.B. ein geringerer Eigenstromverbrauch der Biogasanlage oder eine geringere Menge an Gärrest aufgrund eines höheren Abbaugrades, wurden im Rahmen der Arbeit nicht untersucht und bleiben daher auch in dieser Auswertung unberücksichtigt. Aufgrund der unterschiedlichen technischen Maßstäbe von Prallreaktor und Extruder wurde in diesem Kapitel der Schwerpunkt auf die Ergebnisse mit dem Prallreaktor gelegt.

### 6.1 Energetische Bilanzierung

Zur Erstellung der Energiebilanz für die Versuche zur mechanischen Vorbehandlung werden der Aufwand an Prozessenergie in Form von Strom für die Zerkleinerung und der energetische Mehrertrag an Biogas gegenübergestellt. Mit Hilfe dieser Bilanzierung werden dann die aus energetischer Sicht effizientesten Versuchseinstellungen für die verschiedenen Substrate herausgefiltert.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen Stromverbrauch und Methanertrag herzustellen, wurde die Annahme getroffen, dass der Stromverbrauch für die Zerkleinerung durch die Umwandlung des zusätzlichen Methanertrags in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) bereitgestellt wird. Dazu wird der Mehrertrag an Methan mit einem Energiegehalt von  $9,968 \text{ kWh/m}^3_{\text{N}}$  Methan und einem elektrischen Wirkungsgrad des BHKW von 40 % auf einen Mehrertrag an elektrischer Energie umgerechnet [KTBL 2013].

Abbildung 6-1 zeigt die Energiebilanz für die Zerkleinerungsversuche mit Triticalestroh. Bis auf eine Einstellung fällt die Energiebilanz bei allen untersuchten Kombinationen positiv aus. Der höchste zusätzliche Energieertrag wird demnach mit den Einstellungen 90°-Rotor bei einem Abstand zur Siebmitte von 2 mm, einer Drehzahl von 1.500 U/min, dem 20 mm Sieb und einem Durchsatz von 200 kg/h erzielt. Bei allen untersuchten Rotorkombinationen ist die energetische Effizienz bei einer Drehzahl von 1.500 U/min und dem 20 mm Sieb am größten. Dagegen sinkt mit steigender Drehzahl und auch bei feineren Sieben der energetische Vorteil. Dies gilt sowohl für den Stromverbrauch, als auch für den Mehrertrag an Methan.

Abbildung 6-2 zeigt die Energiebilanz für die Versuche mit Hafer-GPS. Da sich bereits bei der Betrachtung der Biogaserträge keine deutlichen Mehrerträge an Methan gegenüber dem

unbehandelten Substrat ergeben haben, fällt auch die Energiebilanz dementsprechend aus. Mit keiner der untersuchten Einstellungen am Prallreaktor wurde ein positives Ergebnis erzielt.

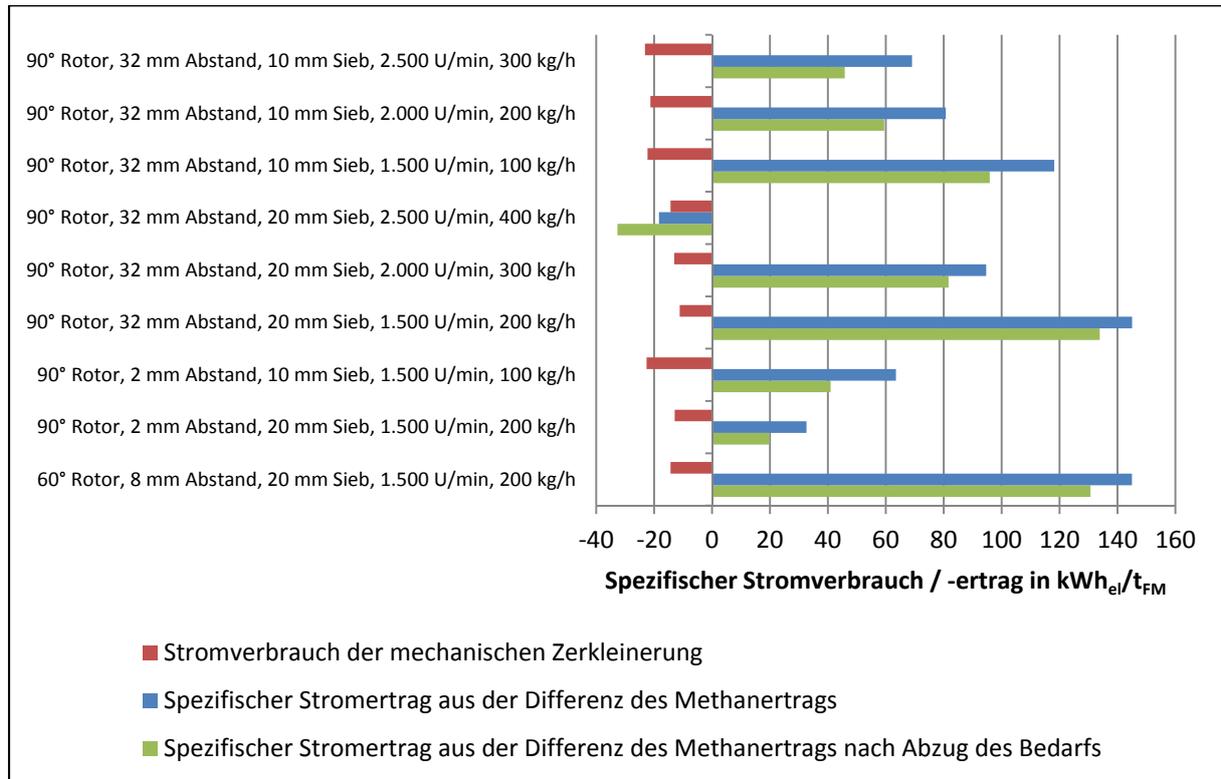


Abbildung 6-1: Energiebilanz für Triticalestroh

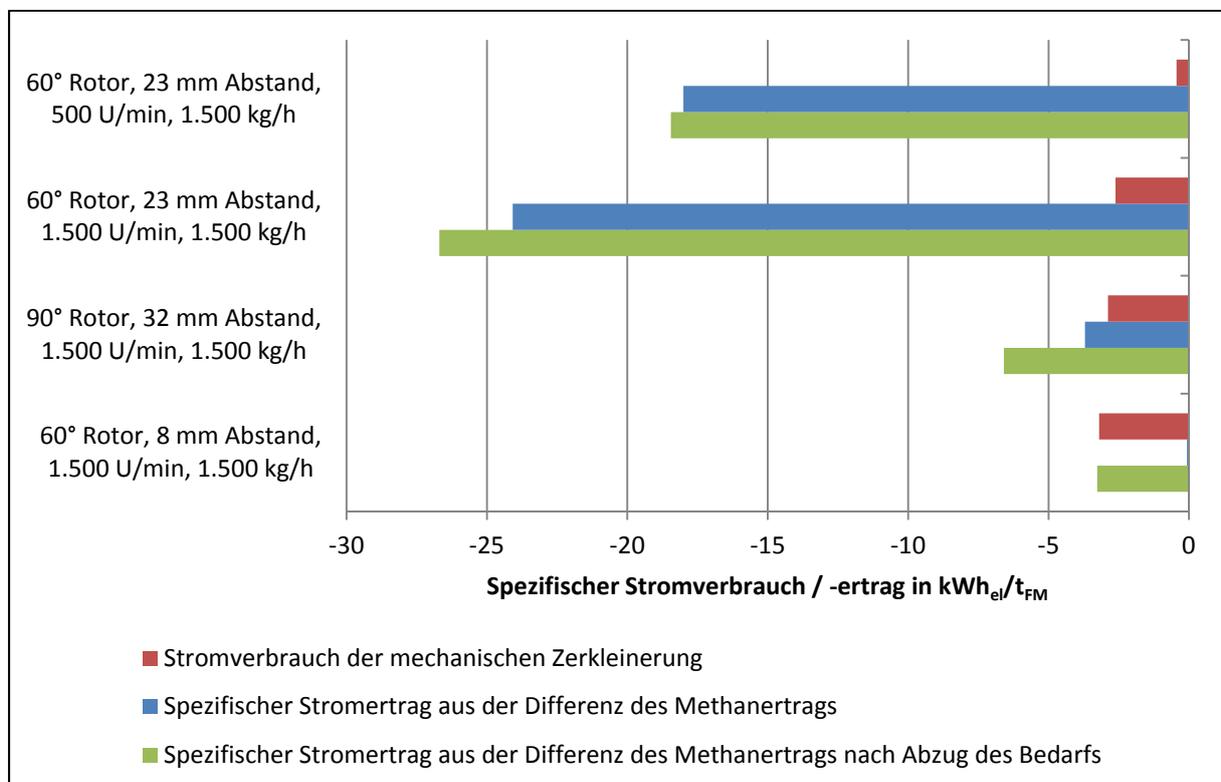


Abbildung 6-2: Energiebilanz für Hafer-Ganzpflanzsilage

Die energetische Bilanzierung der Versuche mit Maisstroh in Abbildung 6-3 zeigt ein differenziertes Bild. Das beste Ergebnis mit zusätzlichen  $18 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  wird unter Verwendung des 5 mm Siebes erzielt. Trotz des höheren Stromverbrauchs übertrifft der Mehrertrag an Methan diesen am deutlichsten im Vergleich mit den weiteren untersuchten Einstellungen. Allerdings ist die Spannbreite aus der Biogaspotenzialbestimmung im Vergleich überproportional groß. Ein ebenfalls positives Ergebnis wird mit der Rotorkombination aus  $90^\circ$  Anstellwinkel und 32 mm Siebabstand bei einem Sieb von 20 mm erzielt. Bei allen weiteren Einstellungen fällt das Ergebnis der Energiebilanz negativ aus.

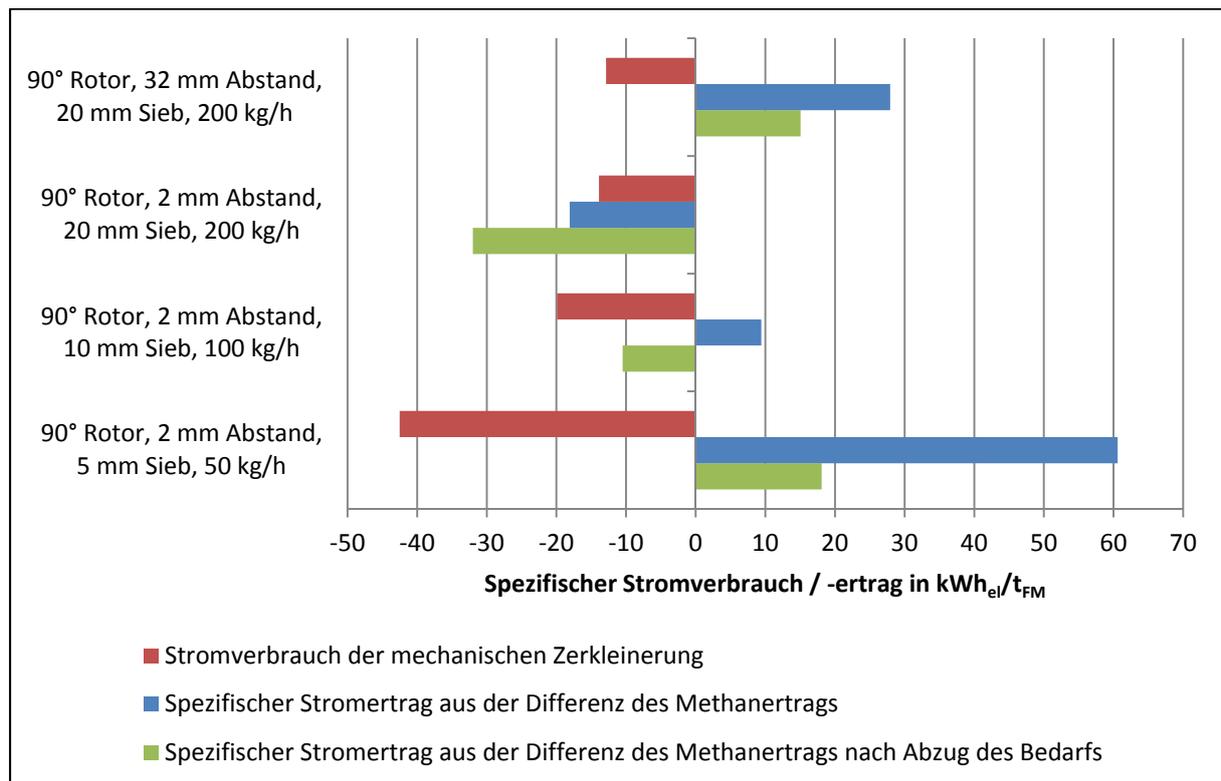


Abbildung 6-3: Energiebilanz für Maisstroh (Drehzahl: 1.500 U/min)

Eine mechanische Zerkleinerung von trockenem Maisstroh oder Hafer-GPS mit dem Ziel einer Erhöhung des Biogasertrages erscheint somit nicht sinnvoll. Wird jedoch beim Maisstroh das Ziel verfolgt, durch die Zerkleinerung den Einsatz in einer Biogasanlage zu ermöglichen, so empfehlen sich aus den Ergebnissen die beiden Einstellungen  $90^\circ$  Anstellwinkel mit 2 mm Siebabstand bei einer Drehzahl von 1.500 U/min, dem 5 mm Sieb und einem maximalen Durchsatz von 50 kg/h sowie die Rotorkombination aus  $90^\circ$  Anstellwinkel mit 32 mm Siebabstand bei einer Drehzahl von 1.500 U/min, dem 20 mm Sieb und einem maximalen Durchsatz von 200 kg/h. Durch die Erfahrungen und Ergebnisse aus den Vergleichsversuchen mit dem Prallreaktor im Praxismaßstab der Biogasanlage Sehan, sind die ermittel-

ten Einstellungen direkt übertragbar. Lediglich der maximale Durchsatz wird aufgrund des größeren Durchmessers vom Prallraum erheblich größer ausfallen.

Abbildung 6-4 zeigt die Energiebilanz für die Versuche mit Pferdemist. Bis auf den Versuch mit einer Drehzahl von 2.500 U/min ergibt sich für alle Varianten ein positives Ergebnis. Dabei steigt bei beiden Rotorkombinationen der energetische Mehrertrag mit sinkender Drehzahl. Den höchsten energetischen Mehrertrag von 28,7 kWh<sub>el</sub>/t Pferdemist wird mit dem 90°-Rotor bei einem Siebabstand von 2 mm, einer Drehzahl von 1.500 U/min und einem Durchsatz von 400 kg/h erzielt.

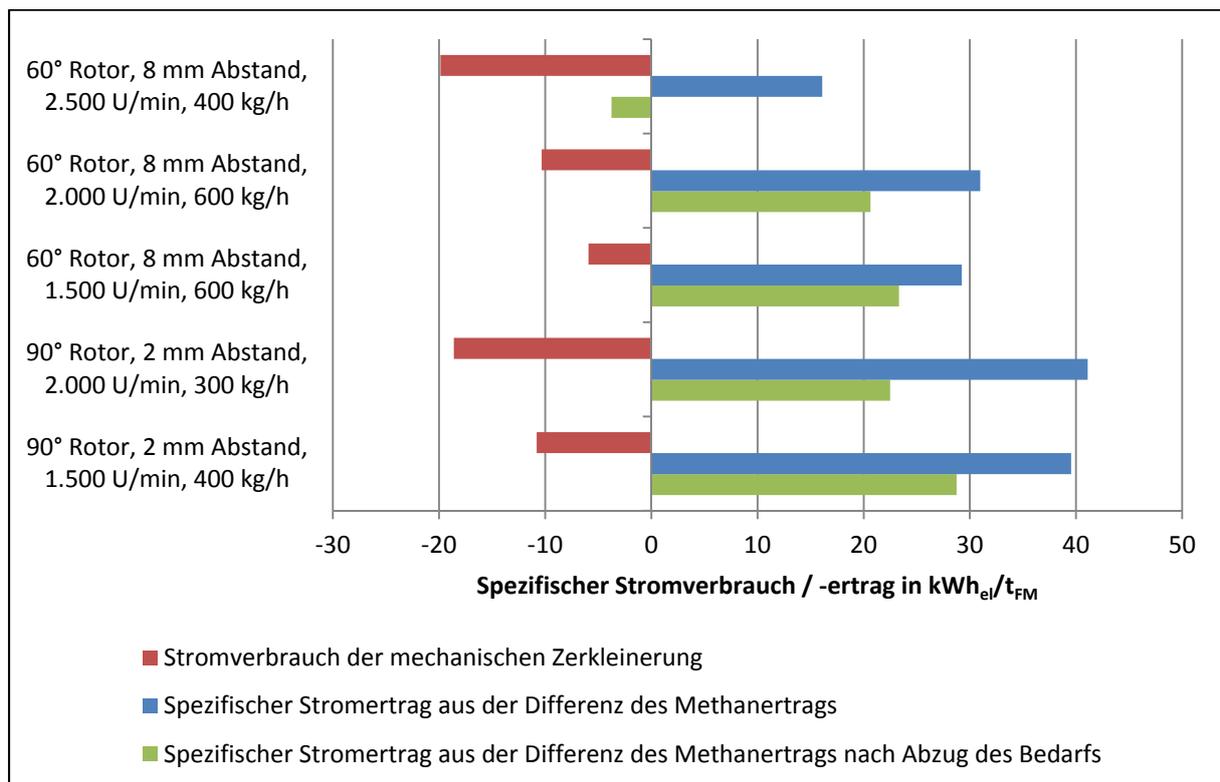


Abbildung 6-4: Energiebilanz für Pferdemist

Die Energiebilanz der Versuche mit der Substratmischung in Abbildung 6-5 zeigt für alle untersuchten Einstellungen ein positives Ergebnis. Das beste Ergebnis wird mit einem energetischen Mehrertrag von 19,4 kWh<sub>el</sub>/t bei dem Einsatz des 60°-Rotors, einem Siebabstand von 23 mm und dem rechteckigen 50 mm Sieb erzielt. Jedoch verstopfte bei den Versuchen dieses Sieb, wodurch beim Vergleich der beiden Rotorkombination mit einer arretierten Auswurfklappe auf 70 mm Öffnungsweite die mit einem Anstellwinkel von 90° und einem Siebabstand von 2 mm besser abschneidet. Mit dieser Einstellung beträgt der energetische Mehrertrag immerhin noch 18,0 kWh<sub>el</sub>/t. Beim Vergleich der Ergebnisse mit der Versuchsanlage der FH Münster mit dem Ergebnis der Versuche am Prallreaktor der Biogasanlage Sehan zeigt sich ein vergleichbares Resultat.

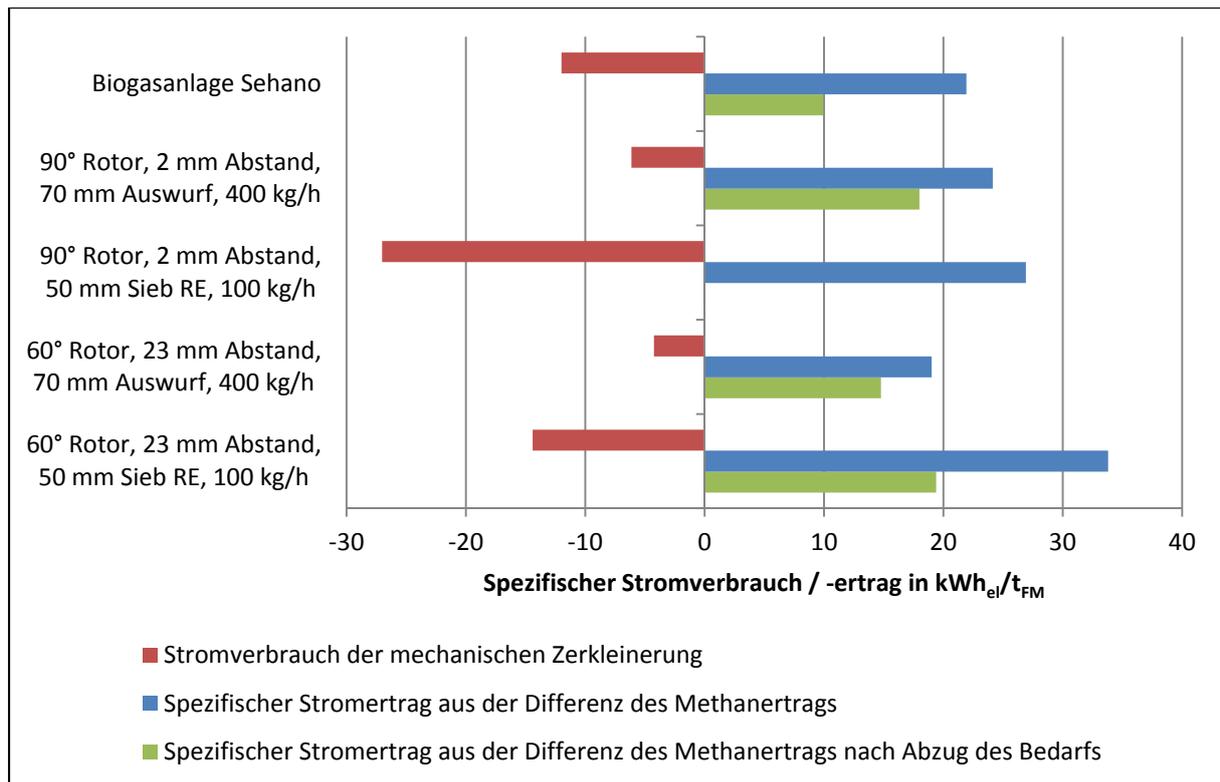


Abbildung 6-5: Energiebilanz für eine Substratmischung (53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist; Drehzahl: 1.500 U/min)

Während bei den Substraten Triticalestroh, Pferdemist und dem Sehan-Mix mit großen Anteilen Grassilage die mechanische Vorbehandlung deutlich zu einem positiven energetischen Ergebnis führt, lässt sich für Maisstroh und vor allem Hafer-GPS kein wesentlicher Mehrertrag feststellen. Den größten Einfluss auf die energetische Bilanz hat dabei der jeweilige Biogasertrag und dessen Schwankungsbreite. Demgegenüber fällt der Stromverbrauch nicht so sehr ins Gewicht. Somit kann sich der Aufwand für die Vorbehandlung selbst bei niedrigen Mehrerträgen an Methan aus energetischer Sicht rentieren.

## 6.2 Vergleich Partikelgröße zu Energieaufwand und Methanertrag

Für den Vergleich von mittlerer Partikelgröße und Stromverbrauch bzw. Methanertrag bei den untersuchten Proben, werden die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe mit dem Prallreaktor für die einzelnen Substrate grafisch ausgewertet. Mit Hilfe dieser Auswertung wird ermittelt, ob Abhängigkeiten zwischen der mittleren Partikelgröße und dem Aufwand an elektrischer Energie zur Zerkleinerung bzw. dem potenziellen Ertrag an Methan bestehen.

Abbildung 6-6 zeigt die Ergebnisse zum Stromverbrauch der Versuche mit Triticalestroh in Abhängigkeit von der mittleren Partikelgröße. Dazu wurden nur die Werte aus den Zerkleinerungsversuchen mit dem Prallreaktor abgebildet.

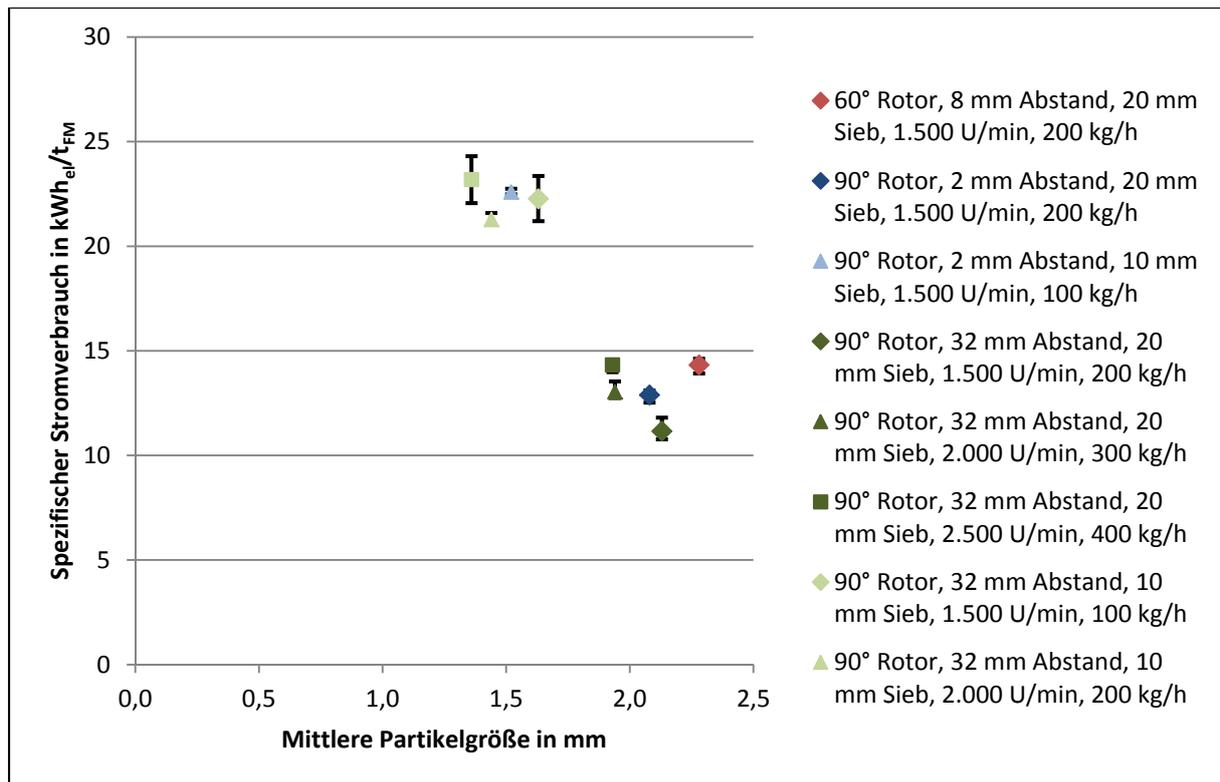


Abbildung 6-6: Vergleich von mittlerer Partikelgröße und spezifischem Stromverbrauch für Triticalestroh

Demnach erfordert eine feinere Partikelgröße einen größeren Stromverbrauch. Dabei zeigt sich auch hier die überwiegende Abhängigkeit der Partikelgröße von der Siebweite. Ebenso wird deutlich, dass höhere Drehzahlen kleinere Partikelgrößenverteilungen erzeugen.

Ähnlich verhält es sich bei allen weiteren untersuchten Substraten (siehe Anhang 6). Kleinere mittlere Partikelgrößen gehen in der Regel mit höheren Stromverbräuchen für die Zerkleinerung einher. Eine direkte Abhängigkeit über diesen Zusammenhang hinaus kann jedoch nicht gezeigt werden. Dazu haben Substrat und Einstellungen am Prallreaktor zu großen Einfluss auf das Ergebnis.

Bei der Auftragung der Ergebnisse zum Methanertrag über die mittlere Partikelgröße für Triticalestroh in Abbildung 6-7 und Pferdemit in Abbildung 6-8 lässt sich trotz unterschiedlicher Methanerträge keine Abhängigkeit in Bezug auf die Partikelgröße feststellen. Kleinere Partikelgrößen erzeugen bei dieser Form der Zerkleinerung nicht zwingend höhere Methanerträge.

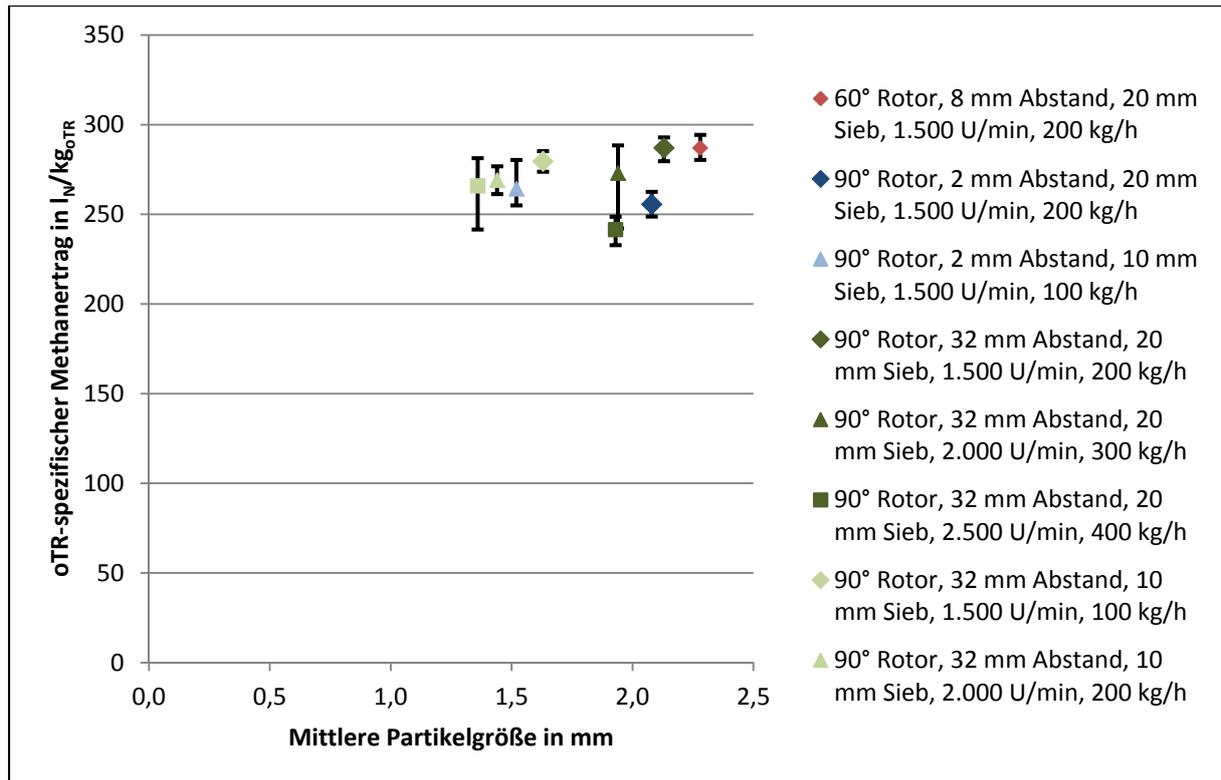


Abbildung 6-7: Vergleich von mittlerer Partikelgröße und oTR-spezifischem Methanertrag für Triticalestroh

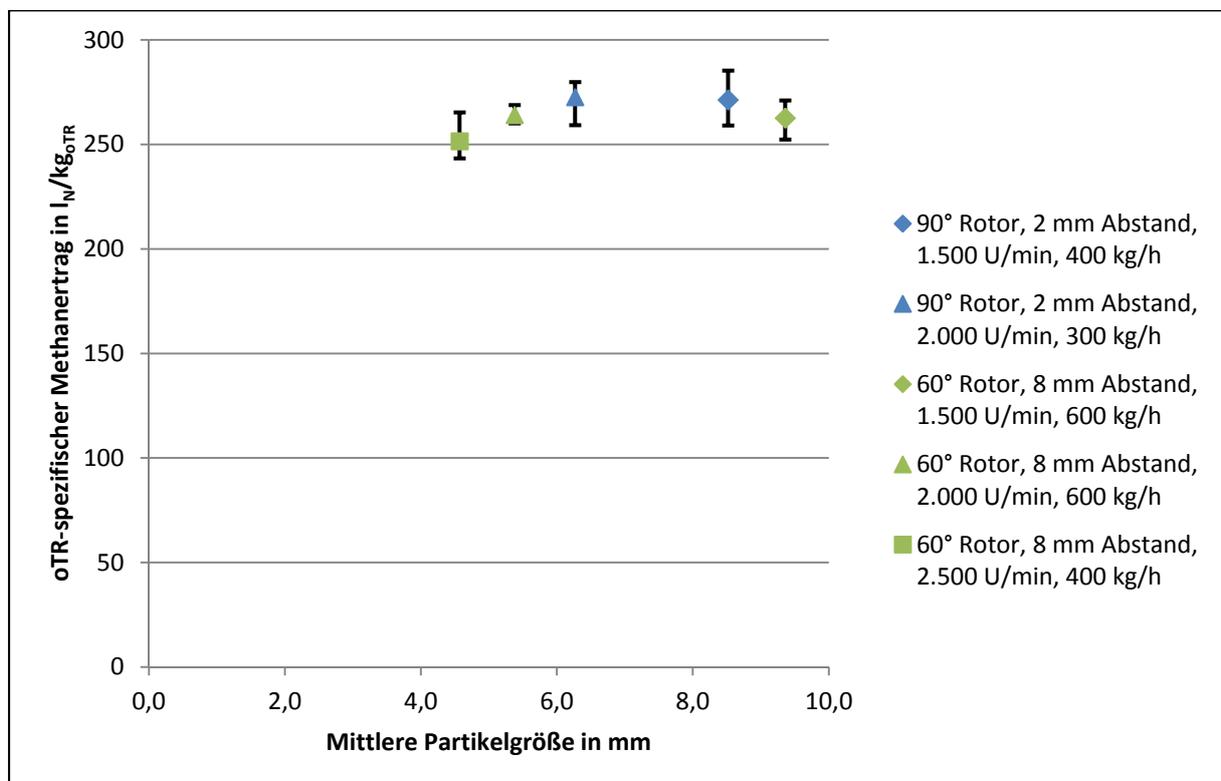


Abbildung 6-8: Vergleich von mittlerer Partikelgröße und oTR-spezifischem Methanertrag für Pferdemist

Bei Triticalestroh sind lediglich geringere Abweichungen im Methanertrag bei kleineren Partikelgrößen festzustellen und bei Pferdemit werden bei höheren Drehzahlen zwar feinere Partikelgrößen, aber keine höheren Methanerträge erzielt. Auch für Maisstroh, Hafer-GPS und die Substratmischung waren bei dieser Form der Auswertung keine weiteren Erkenntnisse zu gewinnen. Die Diagramme für diese Substrate sind als Anhang 7 der Arbeit beigelegt.

### **6.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der mechanischen Zerkleinerung werden die Kosten für die Vorbehandlung mit dem Prallreaktor berechnet. Demgegenüber stehen Einsparungen durch einen geringeren Substrateinsatz aufgrund des Biogasmehrertrages und durch günstigere, bisher nicht einsetzbare, Substrate. Daher werden in diesem Kapitel die Kosten für die Vorbehandlung ermittelt, wie viel die Alternativsubstrate in Verbindung mit der Zerkleinerung im Vergleich zu Silomais kosten dürfen und wie weit der Mehrertrag aus der Vorbehandlung die Kosten dafür deckt. Aus dem Vergleich des finanziellen Aufwandes für die Vorbehandlung und dem verminderten Kostenaufwand bei den eingesetzten Substraten wird die Wirtschaftlichkeit der Vorbehandlung beurteilt. Weitere mögliche Einflüsse auf den Biogasprozess fanden keine Berücksichtigung in dieser Betrachtung.

#### **Kosten der Vorbehandlung mit dem Prallreaktor am Beispiel der Biogasanlage Sehan**

Da die Versuchsanlage nicht dem Maßstab einer großtechnischen Anlage entspricht, wird die Kostenbetrachtung anhand des Prallreaktors der Biogasanlage Sehan durchgeführt. An dieser Anlage wurde der erste Prallreaktor installiert, weswegen hier auch die größten Erfahrungen in Bezug auf Betrieb und Kosten bestehen. Die Investitionskosten des Prallreaktors werden mit 90.000 € und zusätzlich etwa 10.000 bis 30.000 € für die Einbindung, abhängig von der bereits vorhandenen technischen Ausstattung der Biogasanlage, kalkuliert [SEGGGER-HARBERS 2015]. Dazu kommen jährlich etwa 4.000 – 5.000 €/a an Kosten für Verschleißteile [SEGGGER-HARBERS 2015]. Für die Berechnung der Arbeitskosten ist im Schnitt eine tägliche Arbeitszeit von 15 Minuten kalkuliert [SEGGGER-HARBERS 2015] und für die Stromkosten der in Kapitel 5.6 ermittelte Stromverbrauch für die Zerkleinerung von 12 kWh<sub>el</sub>/t sowie überschlägig bestimmte 1,3 kWh<sub>el</sub>/t für die Zu- und Abfuhr. In Tabelle 6-1 sind die Gesamtkosten und in Tabelle 6-2 die spezifischen Kosten der Vorbehandlung am Beispiel der Biogasanlage Sehan berechnet.

Tabelle 6-1: Kosten der Vorbehandlung am Beispiel der Biogasanlage Sehano

|   |                                       |                  |
|---|---------------------------------------|------------------|
| Investitionskosten                      | [€]                                   | 110.000,00       |
| Abschreibung (6 Jahre)                  | [€/a]                                 | 18.333,33        |
| Zinsen (2 %/a)                          | [€/a]                                 | 1.100,00         |
| Verschleißteilkosten                    | [€/a]                                 | 4.500,00         |
| Arbeitszeit                             | [h/d]                                 | 0,25             |
| Arbeitskosten (15 €/h)                  | [€/a]                                 | 1.368,75         |
| Substratmenge                           | [t <sub>FM</sub> /d]                  | 15,00            |
|   | [t <sub>FM</sub> /a]                  | 5.475,00         |
| Stromverbrauch Zerkleinerung            | [kWh <sub>el</sub> /t <sub>FM</sub> ] | 12,00            |
| Stromverbrauch Zu- u. Abfuhr            | [kWh <sub>el</sub> /t <sub>FM</sub> ] | 1,30             |
| Stromverbrauch Gesamt                   | [kWh <sub>el</sub> /a]                | 72.817,50        |
| Stromkosten (0,20 €/kWh <sub>el</sub> ) | [€/a]                                 | 14.563,50        |
| <b>Gesamtkosten</b>                     | <b>[€/a]</b>                          | <b>39.865,58</b> |

<sup>1</sup> [HLBS 2010]

Tabelle 6-2: Spezifische Kosten der Vorbehandlung am Beispiel der Biogasanlage Sehano

|                      |                           |             |
|----------------------|---------------------------|-------------|
| Investitionskosten   | [€/t <sub>FM</sub> ]      | 3,55        |
| Verschleißteilkosten | [€/t <sub>FM</sub> ]      | 0,82        |
| Arbeitskosten        | [€/t <sub>FM</sub> ]      | 0,25        |
| Stromkosten          | [€/t <sub>FM</sub> ]      | 2,66        |
| <b>Gesamt</b>        | <b>[€/t<sub>FM</sub>]</b> | <b>7,28</b> |

Demnach betragen die Gesamtkosten für die Vorbehandlung bei einer täglichen Substratmenge von 15 t<sub>FM</sub>/d etwa 39.900 €/a und die spezifischen Kosten liegen bei etwa 7,30 €/t<sub>FM</sub> Substrat. Dabei machen die Kosten für Anschaffung und Finanzierung etwa die Hälfte der spezifischen Kosten aus und die Stromkosten etwa ein Drittel.

Diese Kosten wurden für eine tägliche vorbehandelte Substratmenge von 15 t<sub>FM</sub>/d ermittelt, wie es für die Biogasanlage Sehano zutrifft. Potenziell können jedoch auch größere Mengen mit dem Prallreaktor aufbereitet werden. So könnten bei einem Durchsatz von 2,5 t<sub>FM</sub>/h, wie er in Kapitel 5.6 für die Anlage bestimmt wurde, bis zu 60 t<sub>FM</sub>/d bei einem Betrieb über 24 h zerkleinert werden. Unter diesen Bedingungen sinken die spezifischen Kosten für die Vorbehandlung der Substratmischung auf 4,40 €/t<sub>FM</sub>. Der Einfluss der täglich zerkleinerten Substratmenge auf die spezifischen Kosten der Vorbehandlung zeigt Abbildung 6-9.

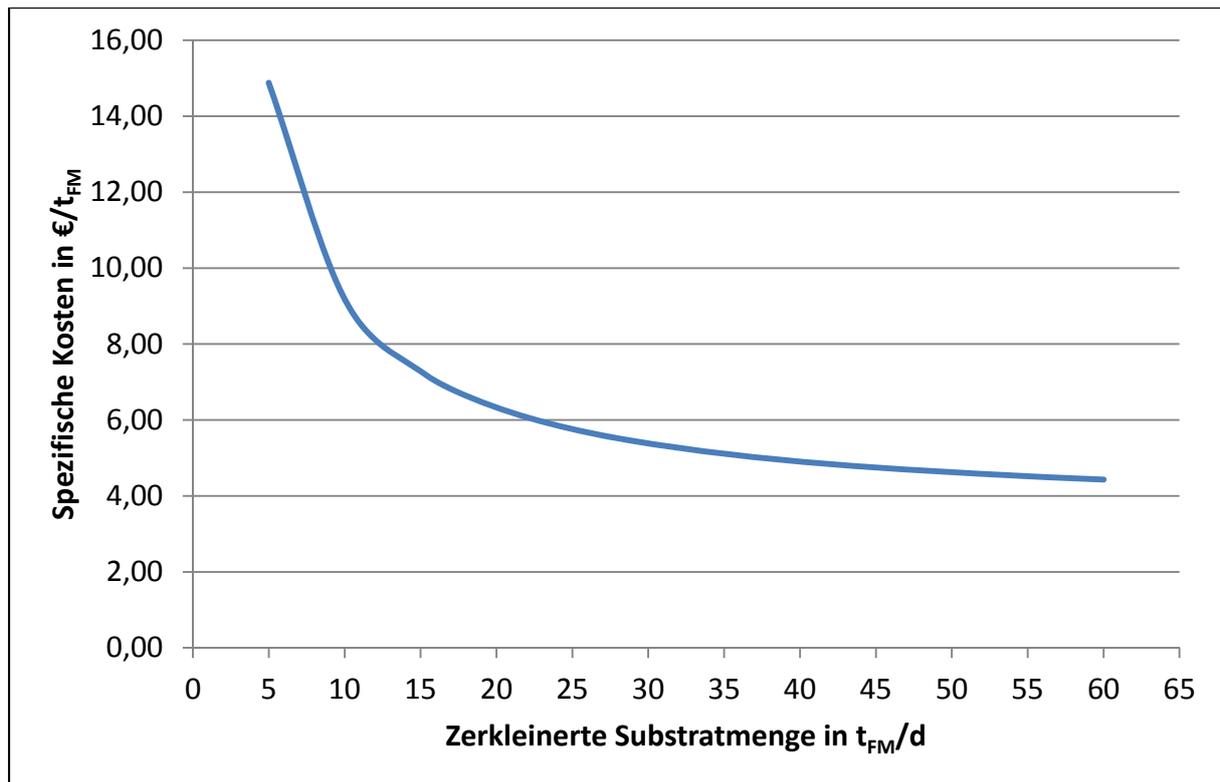


Abbildung 6-9: Spezifische Kosten der Vorbehandlung in Abhängigkeit der täglich zerkleinerten Substratmenge am Beispiel der Biogasanlage Sehan

### Ökonomische Bilanzierung der mechanischen Vorbehandlung mit dem Ziel der Steigerung des Biogasertrags

Ist das Ziel der Vorbehandlung den Biogasertrag der eingesetzten Substrate zu erhöhen, ist die Wirtschaftlichkeit des Vorbehandlungsverfahrens gegeben, wenn der Mehrertrag aus Biogas bzw. der daraus resultierenden Vergütung höher ist als die Kosten der Vorbehandlung. Dazu sind in Tabelle 6-3 die Ergebnisse aus der energetischen Bilanzierung in Kapitel 6.1 und den daraus resultierenden Erlösen ( $20 \text{ Ct}/\text{kWh}_{el}$ ) mit den Kosten für die Vorbehandlung verrechnet. Bei den Kosten für die Zerkleinerung wurden die Stromkosten dafür abgezogen, da der Stromverbrauch für die Vorbehandlung bereits im Mehrertrag aus der Energiebilanz berücksichtigt wurde.

Das mit Abstand beste Ergebnis wird bei dieser Betrachtungsweise bei Triticalestroh erzielt. Aus dem Mehrertrag der Energiebilanz mit  $134 \text{ kWh}_{el}/t_{FM}$  ergeben sich zusätzliche Erlöse von etwa  $27 \text{ €/}t_{FM}$ , die die Kosten für die mechanische Vorbehandlung um etwa  $15 \text{ €/}t_{FM}$  übertreffen. Mit einem leichten Plus schneidet Pferdemit mit  $1,42 \text{ €/}t_{FM}$  ab. Damit decken die Mehrerträge durch die Vorbehandlung bei diesen beiden Substraten die Kosten dafür. Bei Hafer-GPS konnte kein Biogasmehrertrag durch die Vorbehandlung erzeugt werden, wodurch sowohl Energiebilanz, als auch die ökonomische Bilanzierung negativ ausfallen. Ebenfalls mit

einem Minus von etwa 5 €<sub>t<sub>FM</sub></sub> schneidet Maisstroh ab. Hier reichen die zusätzlichen Erträge an Biogas gerade einmal dazu aus, um etwa die Hälfte der Kosten für die mechanische Vorbehandlung zu decken.

Tabelle 6-3: Ökonomische Bilanzierung der mechanischen Vorbehandlung mit dem Ziel der Steigerung des Biogasertrags

| Substrat       | Mehrertrag aus Energiebilanz<br>[kWh <sub>el</sub> /t <sub>FM</sub> ] | Erlös aus Mehrertrag<br>[€t <sub>FM</sub> ] | Kosten Zerkleinerung abzgl. Stromkosten<br>[€t <sub>FM</sub> ] | Differenz<br>[€t <sub>FM</sub> ] |
|----------------|---|---|--|----------------------------------|
| Triticalestroh | 133,9   | 26,78                                       | 12,00  | 14,78                            |
| Hafer-GPS      | -3,3  | -0,66                                       | 4,08   | -4,74                            |
| Maisstroh      | 27,9  | 5,58  | 10,65  | -5,07                            |
| Pferdemist     | 28,7  | 5,74  | 4,32   | 1,42                             |

FM: Frischmasse

### Ermittlung der maximalen Bereitstellungskosten für die Alternativsubstrate beim Ersatz von Silomais

Neben der Steigerung der Biogaserträge ist ein weiteres Ziel der Vorbehandlung mit dem Prallreaktor die Erschließung alternativer Substrate für die Substitution von Silomais. Dazu sind für die Berechnung der Kosten zur Zerkleinerung der in dieser Arbeit untersuchten Substrate neben unterschiedlichen Stromverbräuchen auch andere Mengen aufgrund der unterschiedlichen Trockenrückstandsgehalte und Methanerträge zu berücksichtigen. Für eine Vergleichbarkeit der Kosten wird daher ein Szenario mit folgenden Annahmen getroffen:

- Die spezifischen Kosten für Verschleißteile werden mit 0,82 €<sub>t<sub>FM</sub></sub> fix gesetzt (aufgrund fehlender Erfahrungswerte für die verschiedenen Substrate wird auf den Erfahrungswert der Biogasanlage Sehan zurückgegriffen)
- Es wird eine Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW<sub>el</sub> und einem elektrischen Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerkes von 40 % [KTBL 2013] bei 8.200 Betriebsstunden pro Jahr angenommen
- Der Ausgangs-Substratmix besteht aus 35 % Rinder- und Schweinegülle sowie 65 % Silomais
- Die Hälfte des Silomaisanteils soll durch das alternative Substrat ersetzt werden
- Nur das alternative Substrat wird mit dem Prallreaktor vorbehandelt

In Tabelle 6-4 sind für die in dieser Arbeit mit dem Prallreaktor untersuchten Substrate die aus der Energiebilanz in Kapitel 6.1 ermittelten optimalen Einstellungen mit Stromverbrauch und Methanertrag aufgeführt.

Tabelle 6-4: Übersicht der optimalen Einstellungen, Stromverbrauch und Methanertrag

| Substrat       | Rotor              |                 | Sieb-<br>weite<br>[mm] | Drehzahl<br>[U/min] | Durch-<br>satz<br>[kg/h] | Strom-<br>verbrauch<br>[kWh <sub>el</sub> /t <sub>FM</sub> ] | Methan-<br>ertrag<br>[l <sub>N</sub> /kg <sub>oTR</sub> ] |
|----------------|--------------------|-----------------|------------------------|---------------------|--------------------------|--|---|
|                | Anstell-<br>winkel | Abstand<br>[mm] |                        |                     |                          |  |   |
| Triticalestroh | 90°                | 2               | 20                     | 1.500               | 200                      | 12,9   | 287   |
| Hafer-GPS*     | 60°                | 23              | 50                     | 1.500               | 1.500                    | 2,6  | 331   |
| Maisstroh      | 90°                | 32              | 20                     | 1.500               | 200                      | 12,9   | 257   |
| Pferdemist     | 90°                | 2               | 50                     | 1.500               | 400                      | 10,8   | 271   |

\*gehäckselt; oTR: organischer Anteil des Trockenrückstands; FM: Frischmasse

Für die Berechnung der zu ersetzenden Silomaismenge unter den gemachten Annahmen ist in Tabelle 6-5 die Substratmenge für eine Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW<sub>el</sub> dargestellt. Demnach werden zum Betrieb der Biogasanlage pro Jahr fast 5.000 t/a Rinder- und Schweinegülle sowie 9.000 t/a Silomais benötigt. In

Tabelle 6-6 sind daraus die Mengen an Alternativsubstrat berechnet, um die Hälfte des Silomais von 4.500 t/a, bzw. 12,3 t/d, durch eines der in dieser Arbeit untersuchten Substrate zu ersetzen.

Tabelle 6-5: Berechnung der Substratmengen für eine 500 kW<sub>el</sub> Biogasanlage [KTBL 2013]

| Substrat      | TR-<br>Gehalt | oTR-<br>Gehalt | Methanertrag                         |   | Strom-<br>ertrag                      | Mengen-<br>anteil | Substrat-<br>menge   |
|---------------|---------------|----------------|--------------------------------------|---|---------------------------------------|-------------------|----------------------|
|               | [%]           | [%]            | [l <sub>N</sub> /kg <sub>oTR</sub> ] | [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /t <sub>FM</sub> ] | [kWh <sub>el</sub> /t <sub>FM</sub> ] | [%]               | [t <sub>FM</sub> /a] |
| Rindergülle   | 10            | 80             | 210                                  | 17  | 67                                    | 20%               | 2.769                |
| Schweinegülle | 6             | 80             | 250                                  | 12  | 48                                    | 15%               | 2.077                |
| Maissilage    | 33            | 95             | 340                                  | 107   | 424                                   | 65%               | 8.999                |
| <b>Summe</b>  |               |                |                                      |   |                                       | <b>100%</b>       | <b>13.845</b>        |

TR: Trockenrückstand; oTR: organischer Anteil des Trockenrückstands; FM: Frischmasse

Tabelle 6-6: Berechnung der jeweiligen Substratmengen zum Ersatz der Hälfte des bisher nötigen Silomaisanteils von 12,3 t<sub>FM</sub>

| Substrat       | TR-<br>Gehalt | oTR-<br>Gehalt | Methanertrag                         |   | Strom-<br>ertrag                      | Substratmenge        |                      |
|----------------|---------------|----------------|--------------------------------------|---|---------------------------------------|----------------------|----------------------|
|                | [%]           | [%]            | [l <sub>N</sub> /kg <sub>oTR</sub> ] | [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /t <sub>FM</sub> ] | [kWh <sub>el</sub> /t <sub>FM</sub> ] | [t <sub>FM</sub> /a] | [t <sub>FM</sub> /d] |
| Triticalestroh | 93            | 96             | 287                                  | 257   | 1.028                                 | 1.855                | 5,1                  |
| Hafer-GPS      | 25            | 92             | 331                                  | 75  | 298                                   | 6.391                | 17,5                 |
| Maisstroh      | 93            | 95             | 257                                  | 227   | 908                                   | 2.101                | 5,8                  |
| Pferdemist     | 35            | 86             | 271                                  | 80  | 321                                   | 5.934                | 16,3                 |

TR: Trockenrückstand; oTR: organischer Anteil des Trockenrückstands; FM: Frischmasse

Aus den Ergebnissen wird der Einfluss von Trockenrückstandsgehalt und Methanertrag der verschiedenen Substrate deutlich. So wird von den trockenen Substraten Triticalestroh mit 5,1 t<sub>FM</sub>/d und Maisstroh mit 5,8 t<sub>FM</sub>/d bedeutend weniger an Masse zum energetischen Ersatz von 12,3 t<sub>FM</sub>/d Silomais benötigt. Dagegen sind die Mengen zum Ersatz des Silomais bei den feuchteren bzw. vom Trockenrückstandsgehalt vergleichbaren Substraten etwas höher. Zum Beispiel sind 16,3 t<sub>FM</sub>/d an Pferdemist notwendig, um 12,3 t<sub>FM</sub>/d Silomais zu ersetzen.

Mit Hilfe dieser Werte und den getroffenen Annahmen sind in Tabelle 6-7 die spezifischen Kosten und in Abbildung 6-10 die jährlichen Gesamtkosten der Vorbehandlung mit dem Prallreaktor für die verschiedenen Substrate dargestellt.

Tabelle 6-7: Spezifische Kosten der Vorbehandlung für die untersuchten Substrate

| Substrat              |                          | Triticalestroh | Hafer-GPS   | Maisstroh    | Pferdemist  |
|-----------------------|--------------------------|----------------|-------------|--------------|-------------|
| Investitionskosten    | [€t <sub>FM</sub> ]      | 10,44          | 3,04        | 9,18         | 3,27        |
| Verschleißteilkosten* | [€t <sub>FM</sub> ]      | 0,82           | 0,82        | 0,82         | 0,82        |
| Arbeitskosten*        | [€t <sub>FM</sub> ]      | 0,74           | 0,21        | 0,65         | 0,23        |
| Stromkosten           | [€t <sub>FM</sub> ]      | 2,84           | 0,78        | 2,84         | 2,42        |
| <b>Summe</b>          | <b>[€t<sub>FM</sub>]</b> | <b>14,84</b>   | <b>4,86</b> | <b>13,49</b> | <b>6,74</b> |

\*Mittelwert aus praktischen Erhebungen; FM: Frischmasse

Die Kostenermittlung zeigt sehr differenzierte Ergebnisse, die auch mit den unterschiedlichen Substraten und deren Eigenschaften zusammenhängen. Während die spezifischen Kosten bei Triticalestroh mit 14,84 €t<sub>FM</sub> am Höchsten ausfallen, liegen die Gesamtkosten mit 27.600 €a am Niedrigsten im Vergleich aller untersuchten Substrate. Ähnliches gilt für Maisstroh mit spezifischen Kosten von 13,49 €t<sub>FM</sub> und Gesamtkosten von 28.500 €a. Im Gegensatz dazu fallen bei Pferdemist die höchsten Gesamtkosten mit 40.000 €a und vergleichsweise niedrigen spezifischen Kosten von 6,74 €t<sub>FM</sub> an. Eine Ausnahme bildet hier Hafer-GPS aufgrund der sehr niedrigen Stromkosten mit den niedrigsten spezifischen Kosten von 4,86 €t<sub>FM</sub> und Gesamtkosten von 31.000 €a.

Allerdings gilt auch hier, dass die spezifischen Kosten wesentlich von der behandelten Substratmenge abhängen. Daher zeigt Abbildung 6-11 die spezifischen Kosten der Vorbehandlung von Triticale- und Maisstroh, Pferdemist sowie Hafer-Ganzpflanzensilage in Abhängigkeit von der täglich zerkleinerten Substratmenge. Die maximal zu behandelnden Mengen an Substrat wurden dabei für die großtechnische Ausführung des Prallreaktors hochskaliert. Insbesondere bei Triticale- und Maisstroh wären durch einen größeren Einsatz dieser Substrate erhebliche Kostensenkungen möglich.

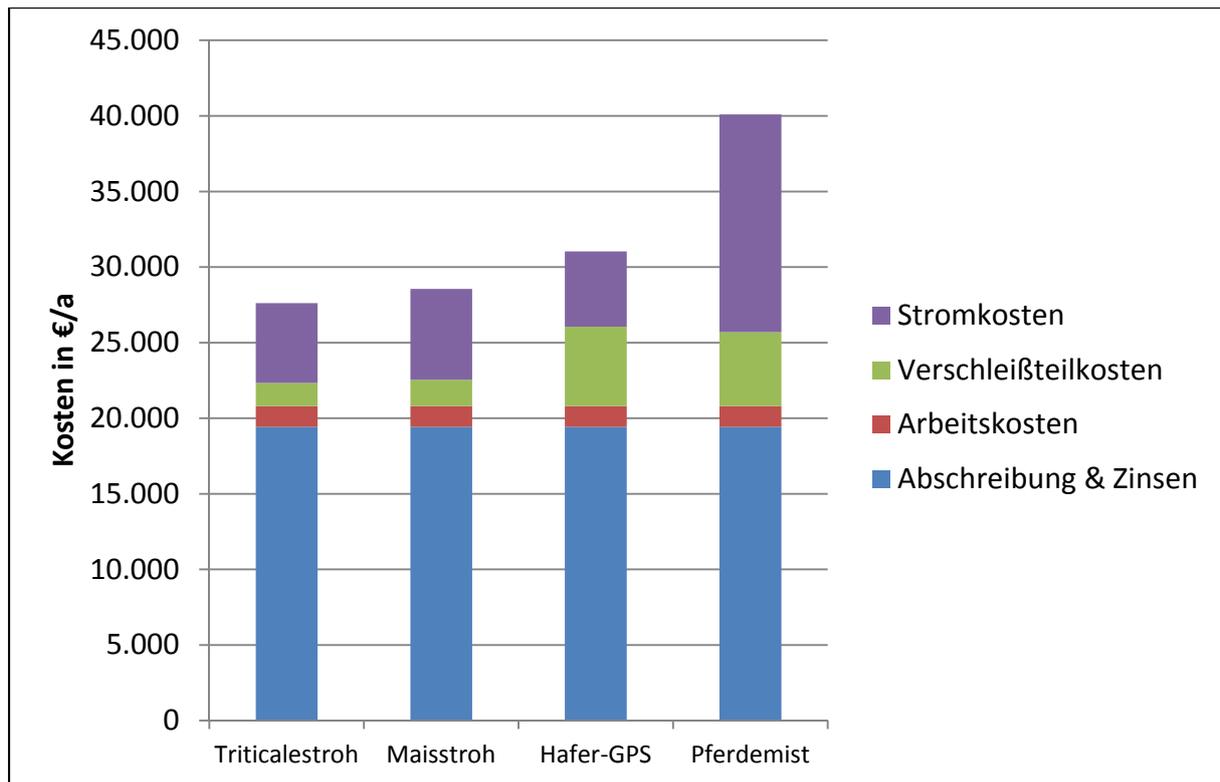


Abbildung 6-10: Jährlichen Kosten der Vorbehandlung für die untersuchten Substrate

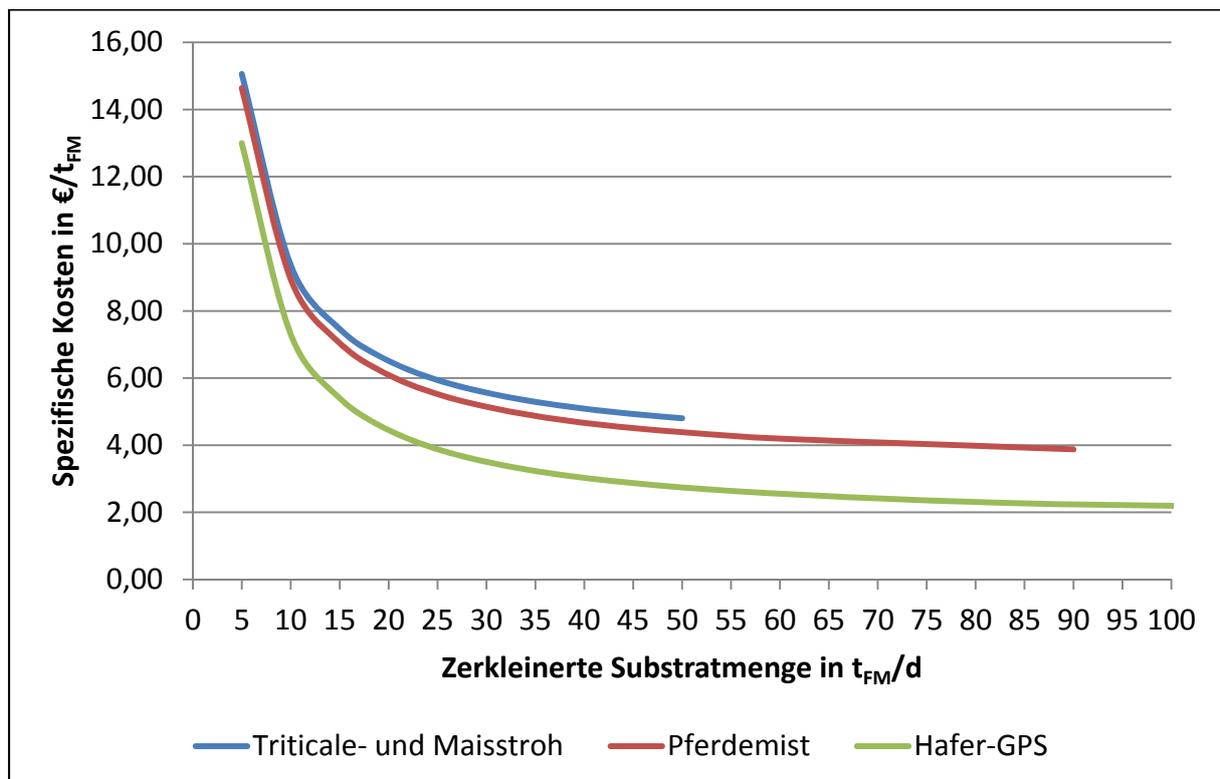


Abbildung 6-11: Spezifische Kosten der Vorbehandlung in Abhängigkeit der täglich zerkleinerten Substratmenge

Beim Ersatz von Silomais steht den Kosten für die Vorbehandlung ein Wert für den eingesparten Silomais gegenüber. Bei einem angenommenen Preis von 40 €/t<sub>FM</sub> frei Fermenter und

einer eingesparten Menge Silomais von 4.500 t<sub>FM</sub>/a entspricht dies einer jährlichen Einsparung von 157.500 €/a. Mit der Differenz zwischen Silomaiswert und Vorbehandlungskosten müssen für eine Wirtschaftlichkeit der Marktwert des Ersatzsubstrats bzw. die Bereitstellungskosten für Bergung, Transport, Lagerung und weiterer Aufwendungen gedeckt werden. Diese Kosten wurden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, da sie in Abhängigkeit von der regionalen Verfügbarkeit der untersuchten Substrate sowie der verfügbaren Berge- und Transporttechnik stehen. Auch spielen bisherige Nutzungswege, wie zum Beispiel bei Getreidestroh als Einstreu, eine Rolle. Um einen Eindruck zu erhalten, was die Alternativsubstrate im Vergleich zu Silomais kosten dürfen, sind in Tabelle 6-8 die Substratmengen zum Ersatz von 1 t<sub>FM</sub> Silomais und die daraus resultierenden maximalen Bereitstellungskosten für die in dieser Arbeit untersuchten Alternativsubstrate, inklusive der Kosten für die Vorbehandlung, aufgeführt.

Tabelle 6-8: Maximale Bereitstellungskosten für die Alternativsubstrate zum Ersatz von Silomais (frei Fermenter)

| Substrat       | Menge zum Ersatz<br>von 1 t <sub>FM</sub> Silomais | Vorbehandlungs-<br>kosten | Maximale Bereit-<br>stellungskosten |
|----------------|--|---------------------------|-------------------------------------|
|                | [t <sub>FM</sub> /t <sub>FM</sub> ]                | [€t <sub>FM</sub> ]       | [€t <sub>FM</sub> ]                 |
| Triticalestroh | 0,41   | 14,84                     | 82,19                               |
| Hafer-GPS      | 1,42   | 4,86                      | 23,30                               |
| Maisstroh      | 0,47   | 13,49                     | 72,19                               |
| Pferdemist     | 1,32   | 6,74                      | 23,59                               |

FM: Frischmasse

Für Triticalestroh wurden maximale Bereitstellungskosten von 82 €t<sub>FM</sub> ermittelt. Davon abgezogen werden müssen jedoch noch mögliche Kosten für die Lagerung des Strohs an der Biogasanlage. Bei Marktpreisen von ca. 60 bis 80 €t<sub>FM</sub> frei Anlage kann Triticalestroh auf jeden Fall eine Alternative sein.

Das Ergebnis für Hafer-GPS mit maximalen Bereitstellungskosten von 23 €t<sub>FM</sub> ist dagegen aufgrund des nicht vorhandenen Biogasmehrertrags durch die Vorbehandlung zu vernachlässigen. Auch liegt der Marktpreis für Hafer-GPS auf einem vergleichbaren Niveau wie Silomais. Trotzdem kann Hafer-GPS unter günstigen Rahmenbedingungen, zum Beispiel im Anbau als Zwischenfrucht, konkurrenzfähig zu Mais sein. Eine weitere Vorbehandlung über das Häckseln und Silieren hinaus ist jedoch nicht notwendig.

Bei der Nutzung von Maisstroh als Ersatz für Silomais stehen 72 €t<sub>FM</sub> für die Bereitstellung zur Verfügung. FLESCHHUT UND STROBL [2017] haben die Kosten der gesamten Erntelogistik

(Schwaden, Bergung mit Feldhäcksler, Transport im Umkreis von 5 km, Lagerung im Fahrilo mit 8 % Lagerverlusten) bis hin zur Einbringung in den Fermenter abgeschätzt. Unter der Bedingung, dass das Maisstroh kostenfrei anfällt wurden Vollkosten von 243 €/ha für einen Maisstrohertrag von 4,9 t<sub>TM</sub>/ha ermittelt. Daraus ergeben sich Kosten von ca. 50 €/t<sub>TM</sub> für Maisstroh frei Fermenter. Im Vergleich zu den ermittelten maximalen Bereitstellungskosten von 72 €/t<sub>FM</sub> bzw. 77 €/t<sub>TM</sub> im Fall des in dieser Arbeit verwendeten Maisstrohs lässt sich ein wirtschaftlicher Vorteil erkennen.

Ähnlich positiv verhält es sich mit der Wirtschaftlichkeit bei Pferdemist. Hier wurde ein finanzieller Spielraum von fast 24 €/t<sub>FM</sub> für die Bereitstellung ermittelt. Demgegenüber stehen lediglich Kosten für Transport und Lagerung. Durch den regelmäßigen Anfall kann Pferdemist auch regelmäßig frei Anlage geliefert werden, wodurch nur geringe Mengen über kurze Zeiträume gelagert werden müssen. Zudem wird Pferdemist durchaus auch ohne Kosten frei Anlage geliefert, wodurch für die Bereitstellung nahezu keine Kosten mehr anfallen.

Die Ergebnisse können in Abhängigkeit von der Substratqualität stark schwanken. Insbesondere bei den Reststoffen führen niedrigere TR- und oTR-Gehalte sowie niedrigere Methanerträge zu geringeren Ersparnissen. Eine Einzelbetrachtung bleibt daher für jedes Projekt unerlässlich.

## 7 DISKUSSION

Ein verstärkter Einsatz lignocellulosehaltiger Nebenprodukte und Reststoffe aus der Landwirtschaft in Biogasanlagen erfordert in der Regel eine geeignete Vorbehandlung. Neben dem Einsatz solcher Stoffe soll durch eine Vorbehandlung häufig auch der Biogasertrag gesteigert und somit eine bessere energetische Ausnutzung der eingesetzten Substrate ermöglicht werden. Ziel der Arbeit war es, die Pralltechnologie als mechanisches Vorbehandlungsverfahren technisch zu optimieren und zu bewerten. Dazu wurde die Effizienz der Zerkleinerung hinsichtlich Stromverbrauch und Partikelgröße sowie der Wirkung auf den Biogasertrag für verschiedene Substrate untersucht.

Die optimalen Einstellungen am Prallreaktor für einen effizienten Aufschluss wurden durch energetische Bilanzierung des Stromverbrauchs für die Zerkleinerung mit dem Mehrertrag an Methan aufgrund der Vorbehandlung für die untersuchten Substrate ermittelt (siehe auch Tabelle 6-4 in Kapitel 6.1). Dabei handelte es sich nicht unbedingt um die Einstellungskombination mit dem geringsten Stromverbrauch oder dem höchsten Biogasertrag. Eine ausschließliche Betrachtung von Stromverbrauch oder Biogasmehrertrag hätte für die Bestimmung der optimalen Einstellungen am Prallreaktor nicht ausgereicht.

Für die nach energetischer Bilanzierung optimalen Einstellungen wurden für die untersuchten Substrate folgende Stromverbräuche ermittelt: 12,9 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> für Triticale- und Maisstroh, 2,6 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> für Hafer-GPS, 10,8 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> für Pferdemist und 6,1 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> für die Substratmischung. Dabei beziehen sich die angegebenen Stromverbräuche auf die reine Zerkleinerungsarbeit im Prallreaktor. Dazu kommt der Stromverbrauch der zusätzlichen Aggregate für die Zu- und Abfuhr der Substrate mit etwa 3 kWh<sub>el</sub>/h.

Aus den Ergebnissen zum Stromverbrauch konnten die Abhängigkeiten und Zusammenhänge der verschiedenen Einstellungen für die untersuchten Substrate eindeutig herausgearbeitet werden. Dabei wichen die ermittelten Stromverbräuche maximal bis zu 9 % bzw. 1,20 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> vom Mittelwert ab. Darüber hinaus zeigte sich bei gleichen Einstellungen eine hohe Übereinstimmung bei den Stromverbräuchen zwischen der ersten und zweiten Versuchsreihe.

Durch die exakte zeitliche Kennzeichnung von Beginn und Ende der Substratzuführung in den Daten war der Durchsatz genau bestimmbar. Dies war vor dem Hintergrund der händischen Aufgabe, bei der eine fehlerfreie Ausführung nie ausgeschlossen werden kann, wichtig. So lag die durchschnittliche Abweichung zwischen eingestelltem und tatsächlichem Durchsatz bei allen Substraten, mit Maisstroh als Ausreißer, unter 6 %. Trotzdem hat sich die Steue-

rung der Zufuhr mit dem händisch beschickten Förderband bewährt, da dadurch mit geringem Aufwand eine gleichmäßige Belastung des Prallreaktors möglich war.

Geringe Stromverbräuche sind mit entscheidend für einen wirtschaftlichen Erfolg der mechanischen Vorbehandlung. Trotzdem sind in der Literatur nur wenige Informationen dazu verfügbar [LINDMARK ET AL. 2012]. So ermittelte MÖNCH-TEGEDER [2014] für die Zerkleinerung von Pferdemist mit dem MeWa BIO QZ im Praxiseinsatz Stromverbräuche zwischen  $13,8 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  (15 Sekunden Behandlungszeit) und  $20,5 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  (30 Sekunden Behandlungszeit) etwas höhere Stromverbräuche gegenüber den in dieser Arbeit ermittelten  $10,8 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$ . Für Roggen-Ganzpflanzensilage wurden etwas geringere Stromverbräuche zwischen  $11,8 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  (15 Sekunden Behandlungszeit) und  $16,3 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  (30 Sekunden Behandlungszeit) und für Grassilage zwischen  $11,3 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  (15 Sekunden Behandlungszeit) und  $14,0 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  (30 Sekunden Behandlungszeit) ermittelt [MÖNCH-TEGEDER 2014]. Und LINDMARK ET AL. [2012] ermittelten Stromverbräuche zwischen 7 und  $55 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  für die Vermahlung von Grassilage. Damit liegen die in dieser Arbeit ermittelten Stromverbräuche auch im Bereich der von KRATKY UND JIROUT [2011] zusammengestellten Stromverbräuche einer Hammermühle für Mais- und Weizenstroh mit  $7 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  bis  $52 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  in Abhängigkeit von der Zielpartikelgröße.

Die Biogaserträge wurden mittels Eudiometerversuchen nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie 4630 „Vergärung organischer Stoffe“ [VDI-GESELLSCHAFT ENERGIETECHNIK 2006, 2014] bestimmt. Dabei erfolgte die Auswertung des Methanertrages  $\text{oTR}$ -spezifisch, um Einflüsse durch abweichende Trockenrückstandsgehalte oder erhöhte Mineralgehalte auszuschließen. Zudem werden in diesem Verfahren die Proben ohne weitere Behandlung direkt vergoren. Demgegenüber waren Methoden, bei denen über die chemische Zusammensetzung der Substrate die Biogaspotenziale theoretisch abgeschätzt werden, keine Option. Da durch die Vorbehandlung die Zugänglichkeit für einen anaeroben Abbau erhöht werden soll und sich die chemische Zusammensetzung nicht verändert [MÖNCH-TEGEDER 2014], wären mit diesen Methoden keine Unterschiede für verschieden zerkleinerte Proben detektierbar gewesen.

Als Methanerträge wurden nach Vorbehandlung mit den aus der Energiebilanz optimalen Einstellungen  $287 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{oTR}}$  für Triticalestroh,  $257 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{oTR}}$  für Maisstroh,  $331 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{oTR}}$  für Hafer-GPS,  $271 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{oTR}}$  für Pferdemist und  $312 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{oTR}}$  für die Substratmischung ermittelt. Während damit für die Substrate Triticalestroh bis zu 16 %, für Pferdemist bis zu 14 % und für die Substratmischung bis zu 10 % Mehrerträge an Methan erzielt wurden, konnten für

Hafer-GPS und Maisstroh keine eindeutigen Mehrerträge durch die Vorbehandlung erzeugt werden.

Durch die Zerkleinerung bei der Ernte und den Silierprozess ist Hafer-GPS offensichtlich für eine Vergärung bereits ausreichend vorbehandelt. Dies stimmt auch mit den Ergebnissen von MÖNCH-TEGEDER [2014] sowie BRÜCKNER UND SAWATZKI [2011] überein, die ebenfalls für vergleichbare Getreide- und Maissilagen keinen Biogasmehrertrag durch eine zusätzliche mechanische Vorbehandlung erzielten. Die ermittelten Methanerträge für Hafer-GPS von  $324 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$  bis  $351 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$  sind dabei vergleichbar mit den Ergebnissen zum Methanertrag von HERRMANN ET AL. [2011] für Triticale-GPS ( $323 - 340 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$ ) und Roggen-GPS ( $293 - 317 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$ ) sowie DANDIKAS ET AL. [2014] ebenfalls für Triticale-GPS ( $323 - 340 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$ ) und Roggen-GPS ( $318 - 352 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$ ). Demgegenüber liegen die ermittelten Methanerträge für unbehandeltes Triticalestroh mit  $247 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$  bzw. dem zerkleinerten mit  $287 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$  im oberen Bereich der Ergebnisse von MOLLER ET AL. [2004], AMON ET AL. [2007] und TRIOLO ET AL. [2011], die für Weizen- und Gerstenstroh Methanerträge von 189 bis  $290 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$  ermittelten.

Entgegen den Erwartungen aus den Ergebnissen zum Mehrertrag an Methan für zerkleinertes Triticalestroh wurde für das getrocknete Maisstroh keine Verbesserung der Verfügbarkeit durch die Vorbehandlung erzielt. Ein Einsatz in Biogasanlagen wäre jedoch ohne die Zerkleinerung der langen Pflanzenfasern technisch nur schwer möglich. Dadurch wird deutlich, dass ein erfolgreicher Einsatz der mechanischen Zerkleinerung nicht nur vom Mehrertrag an Methan abhängig ist, sondern auch von der Einsatzfähigkeit der alternativen Substrate und dem möglichen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber dem zu substituierendem Substrat. Im Vergleich dazu beträgt der von FLESCHHUT UND STROBL [2017] bestimmte Methanertrag für gehäckseltes und siliertes Maisstroh im Schnitt  $320 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTM}}$ . Die Vergärung silierten Maisstrohs erscheint dadurch aussichtsreicher als die Vergärung getrockneten Maisstrohs.

Auch MÖNCH-TEGEDER [2014] konnte durch die Vorbehandlung von Pferdemist mit dem MeWa BIO QZ eine signifikante Verbesserung der anaeroben Abbaubarkeit bei Pferdemist nachweisen. Dabei wurde der Methanertrag um bis zu 10 % gesteigert und liegt damit in einer vergleichbaren Größenordnung zu den Ergebnissen in dieser Arbeit. Im Vergleich zu Triticalestroh fällt der Methanertrag für Pferdemist erwartungsgemäß niedriger aus und ist vergleichbar mit den ermittelten maximalen Methanerträgen von KUSCH ET AL. [2008] ( $277 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$ ) und WARTELL ET AL. [2012] ( $273 \text{ l}_\text{N}/\text{kg}_{\text{oTS}}$ ).

Nach Zusammenführung der Ergebnisse zum Stromverbrauch und Mehrertrag an Methan ergab sich für Triticalestroh ein energetischer Gewinn durch die mechanische Vorbehandlung von  $133,9 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$ , für Pferdemist von  $28,7 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  und für die Substratmischung von  $32,6 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$ . Aufgrund der nicht vorhandenen Mehrerträge an Methan, war bei Hafer-GPS und Maisstroh auch kein positives Ergebnis in der Energiebilanz erzielbar. Auch MÖNCH-TEGEDER [2014] hat in seinen Versuchen mit Pferdemist nach der gleichen Methodik zur Aufstellung der Energiebilanz einen energetischen Gewinn von  $12,6 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  für Pferdemist erzielen können. Gleichzeitig wurde für kurzgehäckselte Silagen von Mais, Gras und Roggenganzpflanzen kein energetischer Gewinn erzielt [MÖNCH-TEGEDER 2014], was sich mit dem Ergebnis zu Hafer-GPS in dieser Arbeit deckt. Zur Beurteilung der Effektivität eines Vorbehandlungsverfahrens ist die energetische Bilanzierung somit ein geeignetes Instrument, da ohne positive Energiebilanz auch kein wirtschaftlicher Gewinn durch die Vorbehandlung zu erwarten ist.

Als Maß für den Erfolg einer mechanischen Zerkleinerung wurde die Feinheit der zerkleinerten Substrate als Partikelgrößenverteilung mittels Siebanalyse bestimmt. Es wurde erwartet, dass mit feineren Partikelgrößen auch ein höherer Umsatz beim mikrobiologischen Abbau und der damit verbundenen Biogaserzeugung einhergeht. Die Ergebnisse belegen für alle untersuchten Substrate eine kleinere mittlere Partikelgröße durch die Zerkleinerung. Dabei zeigte sich durchaus ein Zusammenhang zwischen Stromverbrauch und Partikelgröße, da für feinere Partikelgrößen ein höherer Aufwand und somit Stromverbrauch notwendig war. Die gleiche Abhängigkeit haben auch HAEFFNER ET AL. [2010] bei der Vermahlung von Biertreiber mit einer Kolloid- und einer Rührwerkskugelmühle festgestellt.

Allerdings konnte zwischen Partikelgröße und Mehrertrag an Methan aus den Ergebnissen kein direkter Zusammenhang hergestellt werden. Somit erscheint die mittels Siebanalyse bestimmte mittlere Partikelgröße als Parameter zur Beurteilung der mechanischen Vorbehandlung hinsichtlich Biogasmehrtrag als nicht aussagefähig genug.

Bei der Prallzerkleinerung spleißen die Pflanzenfasern auf und brechen an den natürlichen Bruchkanten. Vor allem durch das Auffasern verändert sich die Oberfläche in größerem Maße als die Größe der einzelnen Partikel. Dies haben auch WETTER ET AL. [2012] beim Vergleich von Schnitt- und Prallzerkleinerung am Beispiel Getreidestroh festgestellt. So wurde bei den mittels Schnitt zerkleinerten Proben ein steigender Methanertrag mit abnehmender Partikelgröße erzielt. Dieser Effekt war dagegen bei den mittels Prall zerkleinerten Proben nicht zu sehen. Hier war allerdings eine deutliche Auffaserung der Proben zu erkennen, was einen

größeren Einfluss auf die Oberfläche und weniger auf die Größe der einzelnen Partikel hat. [WETTER ET AL. 2012]

Mit Hilfe der Siebanalyse wird jedoch nur die Partikelgröße, nicht aber die für den mikrobiellen Abbau entscheidendere Partikeloberfläche ermittelt. Zwar lässt sich die spezifische Oberfläche aus der Partikelgrößenverteilung der Siebanalyse indirekt berechnen, dabei wird jedoch von kugelförmigen Partikeln ausgegangen [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1976]. Die Partikel der Substrate aus den Versuchen in dieser Arbeit sind allerdings nadelförmig, was die grundsätzliche Herausforderung bei der Adaption dieser Methoden für Biomassen zeigt, da sie ursprünglich für die Analyse von Stoffen wie Sand oder Kohle entwickelt wurden. Laut STIEB [2009] „werden in der Praxis hauptsächlich drei verschiedene Methoden zur Oberflächenmessung benutzt: Sorptionsverfahren, Durchströmungsverfahren und fotometrische Verfahren“.

Ein Beispiel für ein solches Messverfahren ist die Gasadsorption. Dabei werden die Moleküle eines inerten Messgases an der Oberfläche des Partikels gebunden. Die Menge des adsorbierten Gases hängt dabei nur von der für die Messgasmoleküle zugänglichen Oberfläche ab. Unter Kenntnis der für die Bedeckung einer Molekülschicht erforderlichen Gasmenge und dem Platzbedarf eines Moleküls lässt sich die Oberfläche der eingewogenen Feststoffmenge bestimmen. [STIEB 2009]

Wie bei allen Verfahren zur Partikelgrößen- und Oberflächenanalyse definiert die Wahl des Messverfahrens das Ergebnis [STIEB 2009]. Dies macht eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Untersuchungen nahezu unmöglich. Trotzdem sollten in zukünftigen Untersuchungen die genannten Verfahren auf ihre Tauglichkeit als alternative Messmethode zur Bestimmung der Oberflächengröße für eine Bewertung der mechanischen Vorbehandlung von Biomasse getestet werden.

Ein zentrales Untersuchungsziel war es, den Einfluss der am Prallreaktor verfügbaren Einstellungen auf den Erfolg der Zerkleinerung zu prüfen und die optimalen Einstellungsparameter hinsichtlich Stromverbrauch und Biogasertrag für ausgewählte Substrate zu ermitteln. Die im Rahmen der Testreihen mit dem Prallreaktor untersuchten Einstellungen waren der Anstellwinkel vom Rotor, der Abstand zwischen Rotor und Sieb, die Drehzahl, die Siebweite und der Durchsatz.

Für alle untersuchten Substrate stellte sich heraus, dass eine minimale Drehzahl bei maximaler Siebweite und maximalem Durchsatz die geringsten Stromverbräuche verursachte. Auch

in Verbindung mit dem Biogaspotenzial stellten diese Einstellungen nach der energetischen Bilanzierung das beste Ergebnis dar.

Beim Durchsatz sollte stets das Maximum in Abhängigkeit von den weiteren Einstellungen angestrebt werden. Geringere Durchsätze hatten keinen erkennbaren positiven Einfluss auf Stromverbrauch, Partikelgröße oder Biogaspotenzial. Dabei hingen die maximalen Durchsätze vornehmlich vom Substrat ab. So konnten bei Triticale- und Maisstroh Durchsätze bis 200 kg/h, bei Pferdemist sowie der Substratmischung bis 400 kg/h und bei Hafer-GPS sogar 1.500 kg/h erreicht werden. Dabei hat jedoch die Beschaffenheit des Substrates einen Einfluss auf Durchsatz und Stromverbrauch. Bei Versuchen mit zwei unterschiedlichen Getreidestrohpartien wurde eine nennenswerte Abweichung bei Durchsatz und Stromverbrauch beobachtet. Eine Partie war vom subjektiven Eindruck her härter und spröder und mit dieser konnten auch höhere Durchsätze und geringere Stromverbräuche realisiert werden.

Bemerkenswert ist die Abhängigkeit des Durchsatzes von der Drehzahl. Während bei Triticalestroh der Durchsatz mit steigenden Drehzahlen erwartungsgemäß ebenfalls steigt, sinkt bei Hafer-GPS der mögliche Durchsatz bei höheren Drehzahlen. Ähnlich verhält es sich bei Pferdemist, wo auch mit niedrigen Drehzahlen höhere Durchsätze erzielt werden konnten. Einen Grund dafür konnte in den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden. An dieser Stelle besteht Forschungsbedarf, der in zukünftigen Untersuchungen berücksichtigt werden sollte.

Neben dem im Versuchsprogramm festgeschriebenen drei Drehzahlen 1.500, 2.000 und 2.500 U/min wurden mit Hafer-GPS zwei weitere Drehzahlen, 1.000 und 500 U/min, getestet. Ergebnis dieser beiden Versuche war eine erhebliche Reduzierung des Stromverbrauchs bei gleichbleibendem Durchsatz von 1.500 kg/h. Vor diesem Hintergrund konnte der Stromverbrauch von  $2,6 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  bei 1.500 U/min auf  $0,4 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  bei 500 U/min, bei sonst gleichbleibenden Einstellungen, erheblich reduziert werden. Dies zeigt ein Potenzial auf, das in zukünftigen Untersuchungen Berücksichtigung finden sollte.

Beim Einfluss der Drehzahl auf die Partikelgrößenverteilung konnte kein eindeutiger Zusammenhang gezogen werden. Während bei Pferdemist durchaus höhere Geschwindigkeiten mehr Feingut erzeugten, wie auch von PAHL ET AL. [1993] in der Theorie zur mechanischen Verfahrenstechnik beschrieben, trat bei Hafer-GPS der gegenteilige Effekt auf. Bei Triticalestroh wiederum konnte kein eindeutiger Zusammenhang belegt werden.

Darüber hinaus hat die Größe der Auslassöffnung, bzw. die Siebweite, einen wesentlich bedeutenderen Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung. So wurden bei der Zerkleinerung von

Triticale- und Maisstroh mit kleineren Siebweiten erwartungsgemäß auch eindeutig feinere Partikelgrößenverteilungen erzeugt. Gleichzeitig fällt der Biogasertrag bei den feiner zerkleinerten Substraten tendenziell höher aus. Dies kehrt sich jedoch bei Betrachtung der Energiebilanz um, da der Mehrertrag an Methan den höheren Aufwand an elektrischer Energie für die Zerkleinerung nicht ausgleichen kann.

Grundsätzlich ist bei den Auslassöffnungen zwischen zwei Formen in Abhängigkeit vom Substrat zu unterscheiden. Für trockene und spröde Biomassen wie Triticale- und Maisstroh haben sich Siebe mit quadratischen Öffnungen, wie sie in den Versuchen eingesetzt wurden, bewährt. Diese sind jedoch für feuchte Substrate wie Silagen und Mist aufgrund ihrer Verstopfungsneigung nicht geeignet. Für diese Biomassen wurden bei den Versuchen im Rahmen dieser Arbeit Siebplatten mit jeweils einer rechteckigen Auslassöffnung mit einer Höhe von 50 mm verwendet. Während diese Öffnung für die Behandlung von Hafer-GPS ausreichend war, zeigten sich bei Pferdemist und besonders bei der Substratmischung Ansätze zum Verstopfen. Daher wurde bei der Substratmischung in zusätzlichen Versuchen die Auswurfklappe auf eine Höhe von 70 mm zur Ausschleusung fixiert. Im direkten Vergleich konnte dadurch der Durchsatz auf 400 kg/h vervierfacht und der Stromverbrauch mit  $4,2 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  auf weniger als ein Drittel gesenkt werden. Gleichzeitig blieb der Biogasertrag gleich. Somit ist die Empfehlung, die Größe der Auslassöffnung bei Mist und Silagen vor allem von einem zuverlässigen Betrieb ohne Verstopfen und niedrigem Stromverbrauch abhängig zu machen. Die Ausschleusung über einen in der Höhe verstellbaren Schieber wird auch bei der Mehrzahl der angebotenen und in der Praxis eingesetzten Maschinen zur mechanischen Zerkleinerung im kontinuierlichen Betrieb eingesetzt (siehe auch Tabelle 2-6) [BOMATIC O.J., LINDNER O.J., XERGI O.J.].

Gegenüber den bisher beschriebenen Einstellungen fielen die Ergebnisse für die Varianten beim Rotor unterschiedlich aus. Dabei sind die Unterschiede, unter Beibehaltung der weiteren Einstellungen, größtenteils nur vergleichsweise gering. Auf Grundlage der Ergebnisse sollte auf jeden Fall kein zu großer Abstand zwischen Prallelement und Sieb gewählt werden. Beim mit 53 mm größten untersuchten Abstand verblieb auffällig viel Material von den untersuchten Substraten im Prallraum, wodurch eine Zerkleinerung und Ausschleusung nicht sichergestellt war.

Die ebenfalls mit dem Abstand von 53 mm getesteten genutzten Prallelemente schnitten im direkten Vergleich nicht besser ab. Ob diese Gestaltung der Prallelemente jedoch positive Auswirkungen in weiteren Rotorkombinationen haben kann, konnte aufgrund fehlender Teile

nicht getestet werden. Dies müssen mögliche Folgeversuche zeigen. Zu berücksichtigen sind dann jedoch auch die höheren Kosten dieser Verschleißteile.

Für den Anstellwinkel konnte kein entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis festgestellt werden, wobei eine Platzierung der Prallelemente im rechten Winkel zum Sieb gegenüber dem 60°-Winkel häufig besser abschnitt. So konnte für alle Substrate bis auf Hafer-GPS eine Rotorkombination mit dem 90°-Winkel als optimale Einstellung ermittelt werden.

Grundsätzlich lässt sich somit zu Gestaltung und Betrieb von mechanischen Zerkleinerungsanlagen für die Vorbehandlung von Biogassubstraten festhalten, dass eine schnelle Zerkleinerung für den wirtschaftlichen Erfolg wichtiger ist als eine intensive. So wurde auch in den Untersuchungen von MÖNCH-TEGEDER [2014] mit dem MeWa BIO-QZ im diskontinuierlichen Betrieb für Pferdemist eine kurze Behandlungszeit von 15 Sekunden als ideal ermittelt. Eine Steigerung der Intensität durch eine längere Behandlungsdauer führte lediglich zu einem höheren Stromverbrauch, ohne eine Steigerung des Methanertrages zu bewirken [MÖNCH-TEGEDER 2014]. Im Vergleich von kontinuierlicher und diskontinuierlicher Betriebsweise ist daher auch eher der kontinuierliche Betrieb der Zerkleinerungsanlage zu bevorzugen.

Eine niedrige Drehzahl in Verbindung mit einem möglichst hohen Durchsatz und einem nicht zu großen Abstand zwischen Prallelement und Sieb bzw. Wand stellten sich als Optimum bei den untersuchten Einstellungen heraus. Der Einfluss der weiteren Rotor- und Prallelementgestaltung scheint darüber hinaus gering zu sein. Zudem ist eine dem Substrat angepasste Auslassöffnung für einen zuverlässigen Betrieb entscheidend. Insgesamt sollte bei der Konstruktion einer entsprechenden Zerkleinerungsanlage ein unkomplizierter Aufbau genügen und dabei auf eine wartungsfreundliche sowie verschleißarme Gestaltung der Anlage geachtet werden. Nicht zuletzt sind Einbauten auch wieder Verschleißteile, für die entsprechende Kosten anfallen. Vor dem Hintergrund des vergleichsweise großen Einflusses der Verschleißteilkosten, mit 5 bis 20 % von den Gesamtkosten in Abhängigkeit vom Substrat, ist auch unter diesem Gesichtspunkt eine einfache Konstruktion vorzuziehen.

Viele landwirtschaftliche Roh- und Reststoffe fallen diskontinuierlich an und müssen daher für einen Einsatz in Biogasanlagen entweder siliert oder trocken eingelagert werden, um die Haltbarkeit zu gewährleisten. Mist dagegen fällt kontinuierlich an und kann dementsprechend ohne längere Lagerungszeiten direkt vergoren werden. Dadurch lassen sich die ermittelten potenziell geeigneten landwirtschaftlichen Roh-, Rest- und Abfallstoffe in Abhängigkeit von Häufigkeit des Anfalls und Lagerungsform in die drei Gruppen trockene Biomassen, Silagen und Mist unterscheiden. Dabei zeigten die Versuche, dass für Mist und Silagen vergleichbare

Ergebnisse hinsichtlich der Einstellungen beim Prallreaktor erzielt wurden, womit eine Unterscheidung in lediglich zwei Stoffgruppen, trockene und feuchte Substrate, genügt.

Als modellhafte Substrate wurden für die Versuche zur mechanischen Vorbehandlung Triticalestroh, Hafer-Ganzpflanzensilage, Maisstroh, Pferdemist und die Substratmischung der Biogasanlage Sehanö mit großen Anteilen Grassilage (53 % Grassilage, 40 % Maissilage und 7 % Rinder- und Pferdemist) eingesetzt. Durch die Trocknung des Maisstrohs zählt es zusammen mit dem Triticalestroh zu den trockenen Substraten. Alternativ wäre auch eine Bergung und Silierung des frischen und noch feuchten Maisstrohs möglich, dann würde es jedoch den feuchten Substraten zugerechnet.

Aus den Versuchen lässt sich innerhalb der beiden Substratgruppen eine Übertragbarkeit der Ergebnisse für die optimalen Einstellungen bei der Zerkleinerung mit dem Prallreaktor feststellen. So wurde für Maisstroh ein vergleichbares Niveau zu Triticalestroh beim Stromverbrauch bei gleichen Einstellungen erreicht. So betrug zum Beispiel der Stromverbrauch bei der Einstellung 90°-Rotor mit 2 mm Siebabstand, 1.500 U/min, 20 mm Sieb und einem Durchsatz von 100 kg/h für Triticalestroh 12,9 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> und für Maisstroh 13,9 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub>. Ebenfalls auf einem vergleichbaren Niveau liegen im direkten Vergleich der beiden Substrate Pferdemist und Hafer-GPS die Ergebnisse für den Stromverbrauch, unter Berücksichtigung der gleichen Einstellungen. Als Beispiel dafür sei hier die Variante 60°-Rotor mit 8 mm Siebabstand, 1.500 U/min, 50 mm hohe Sieböffnung und einem Durchsatz von 600 kg/h angeführt, bei der für Hafer-GPS ein Stromverbrauch von 5,2 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> und für Pferdemist 5,9 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> ermittelt wurde. Daher liegt der Schluss nahe, dass eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auch auf weitere vergleichbare Substrate erwartet werden kann.

In der Praxis werden in der Regel Substratmischungen eingesetzt, bei denen alle Feststoffe über einen Dosierer der Biogasanlage zugeführt werden. So wird zum Beispiel an der Biogasanlage Sehanö der gesamte Feststoffmix mit dem Prallreaktor vorbehandelt, obwohl von dem Anteil Silomais kein Biogasmehrertrag zu erwarten ist. Eine gemeinsame Behandlung macht jedoch aus Gründen der Homogenisierung durchaus Sinn. Zudem kann auf eine weitere Fütterungslinie verzichtet werden, die mit zusätzlichen Kosten verbunden wäre. Lediglich bei einem gleichzeitigen Einsatz von trockenen und feuchten Substraten sollte eine getrennte Zerkleinerung zumindest in Betracht gezogen werden. Alternativ wäre auch eine vorgelagerte Anfeuchtung des trockenen Reststoffs, zum Beispiel mit Gülle, eine Option. Auch eine in die Zerkleinerung integrierte Anfeuchtung ist technisch möglich, jedoch noch nicht untersucht worden. In jedem Fall sollten für individuelle Substratmischungen eigene Versuche zur Zer-

kleinerung durchgeführt werden. Dies ist zum Beispiel mit Vorführgeräten der Hersteller möglich.

Ein genereller Vorteil des Prallreaktors und vergleichbarer Techniken besteht in der Möglichkeit der einfachen Nachrüstung auch an bestehenden Biogasanlagen. Dazu wird die Zerkleinerungsanlage in der Regel zwischen dem Vorlagebehälter und der Fütterungseinheit des Fermenters in die Verfahrenskette der Biogasanlage eingebunden. Wichtig ist dabei der unmittelbare Eintrag des vorbehandelten Substrats in den Fermenter, um Verluste an organischer Substanz durch aeroben Abbau zu vermeiden [MÖNCH-TEGEDER 2014].

In den Vorversuchen stellte sich die Zuführung leichter Substrate, wie zum Beispiel Stroh, zum Zerkleinerungswerkzeug als Herausforderung dar. Durch die geschlossenen Substratauslässe konnte die Luft aus dem Prallreaktor nicht entweichen und es stellte sich ein leichter Überdruck im Prallraum ein. Diesen konnte das fallende Stroh zum Großteil nicht überwinden und wurde durch den Zufuhrschacht wieder zurück geschleudert. Als Lösung wurden nach Rücksprache mit dem Hersteller zwei Verbindungsschläuche zwischen dem Raum nach den Sieben und dem Zufuhrschacht eingebaut. Diese bewirkten eine Zirkulation der Luft im Prallreaktor, wodurch auch leichte Substrate mit dem Luftstrom direkt dem Zerkleinerungswerkzeug zugeführt wurden.

Insbesondere bei Mist besteht die Gefahr von Fremdkörpern im Material. Zum Schutz der Vorbehandlungsanlage und allen weiteren nachfolgenden technischen Anlagenteilen der Biogasanlage ist eine gezielte Ausschleusung der Störstoffe unabdingbar. Im Falle des Prallreaktors wurde dies über eine Auswurfklappe sichergestellt, die sich bei Detektion eines Fremdkörpers sofort öffnet, diesen auswirft und danach automatisch wieder schließt. Dadurch werden die Verschleißteile geschont und der Arbeitsaufwand für die Entfernung der Fremdkörper bleibt gering.

Zum Vergleich wurden alle untersuchten Substrate auch mit einem Extruder im Labormaßstab aufgeschlossen. Die dabei ermittelten Stromverbräuche betragen zwischen  $15,2 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  für die Substratmischung und  $308,1 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  für Maisstroh. Im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem Prallreaktor fallen die Stromverbräuche hoch aus, was vor allem dem Labormaßstab des Extruders geschuldet ist. Deutlich wird dies beim Vergleich mit den Ergebnissen von HJORTH ET AL. [2011], von denen an einem großtechnischen Extruder Stromverbräuche zwischen  $4 - 10 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{FM}}$  bei einem Durchsatz von  $1,5 \text{ t}_{\text{FM}}/\text{h}$  ermittelt wurden und damit auf einem vergleichbaren Niveau mit den Ergebnissen vom Prallreaktor liegen. Die Aussagekraft der Ergebnisse zum Stromverbrauch sind somit als gering einzuschätzen.

Aus den Ergebnissen zum spezifischen Stromverbrauch konnte allerdings ein deutlicher Zusammenhang zum Durchsatz gezogen werden, wobei der erzielbare Durchsatz im Wesentlichen vom Trockensubstanzgehalt des jeweiligen Substrates abhängig ist. Diese signifikante Korrelation zwischen Trockensubstanzgehalt und Stromverbrauch wird auch von HJORTH ET AL. [2011] beschrieben. LEHMANN UND FRIEDRICH [2012] gehen noch einen Schritt weiter und empfehlen Substrate mit hohem Trockensubstanzgehalt, wie Stroh, vor dem extrudieren mit Gülle oder Gärresten zu mischen. Durch so gequollenes Stroh konnte der Energieverbrauch gegenüber dem Trockenaufschluss auf ca. ein Drittel gesenkt werden.

Auch beim Prallreaktor kann die Vermischung trockener Substrate mit Flüssigkeiten, wie zum Beispiel Gülle, eine Option darstellen. Dabei könnte dies sowohl über eine vorgeschaltete Quellung, als auch direkt durch Zugabe in den Prallreaktor realisiert werden. Den möglichen positiven Effekten auf Homogenisierung, Rühraufwand und Aufschwimmverhalten der Substrate im Fermenter stehen jedoch höhere Kosten für die Vorbehandlung gegenüber. So fallen zum Beispiel für die Zerkleinerung von 5 t<sub>FM</sub>/d Triticalestroh etwa 15 €<sub>t<sub>FM</sub></sub> an spezifischen Kosten und somit 75 €<sub>d</sub> an täglichen Gesamtkosten an. Nach der Vermischung von Triticalestroh mit Gülle im Verhältnis 1:1 (vergleichbar zu Mist) sinken die spezifischen Kosten auf etwa 9 €<sub>t<sub>FM</sub></sub> (Annahme aus den Ergebnissen zu Pferdemist) und die täglichen Gesamtkosten steigen auf ca. 90 €<sub>t<sub>FM</sub></sub>. Zwar sinken die spezifischen Kosten für die Vorbehandlung durch die höhere Auslastung des Prallreaktors, jedoch steigen gleichzeitig die Gesamtkosten durch die größere zu behandelnde Menge. Die zusätzlichen Kosten für eine vorgeschaltete Quellung sind dabei noch nicht berücksichtigt. Trotzdem kann die Vermischung bzw. Quellung in bestimmten Fällen interessant sein und sollte in zukünftigen Untersuchungen eingehender betrachtet werden.

Durch den Aufschluss mit dem Extruder konnten wie beim Prallreaktor für Triticalestroh (+ 22 %), Pferdemist (+ 35 %) und die Substratmischung (+ 16 %) Steigerungen beim Methanertrag erzielt werden. Vor allem Pferdemist sticht gegenüber den Ergebnissen mit dem Prallreaktor mit einer deutlicheren Steigerung heraus. Für Hafer-GPS und Maisstroh wurden dagegen keine signifikanten Mehrerträge an Methan ermittelt. Steigerungen beim Methanertrag wurden auch von LEHMANN UND FRIEDRICH [2012] mit 21 % bei Stroh sowie von HJORTH ET AL. [2011] mit 10 % bei Stroh und 6 % bei Gras mit Hilfe des Extruders erzielt.

Die Ergebnisse aus den Siebanalysen zur mittleren Partikelgröße sind mit den Proben aus dem Prallreaktor vergleichbar. Lediglich bei Hafer-GPS führte die Extrusion zu einer deutlichen Verringerung der mittleren Partikelgröße.

In Übereinstimmung mit HJORTH ET AL. [2011] eignet sich der Extruder damit vor allem für faserreiche Substrate mit niedrigem Trockensubstanzgehalt und einem Steigerungspotenzial beim Methanertrag. Damit lässt sich auch nach energetischer Bilanzierung die höchste Effizienz generieren. [HJORTH ET AL. 2011]

Die Kosten für die Behandlung mit dem Prallreaktor reichen in dem angenommenen Szenario für die untersuchten Substrate unter Verwendung der optimalen Einstellungen von 4,90 €<sub>t<sub>FM</sub></sub> für Hafer-GPS über 6,70 €<sub>t<sub>FM</sub></sub> für Pferdemist und 13,50 €<sub>t<sub>FM</sub></sub> für Maisstroh bis 14,80 €<sub>t<sub>FM</sub></sub> für Triticalestroh. Bei einer höheren Auslastung der Zerkleinerungsanlage sind insbesondere bei Triticale- und Maisstroh deutlich geringere spezifische Kosten zu erwarten. Für die untersuchte Biogasanlage Sehanö betragen die Kosten für die Vorbehandlung der Substratmischung 7,30 €<sub>t<sub>FM</sub></sub>. Zum Vergleich liegt die Abschätzung von MÖNCH-TEGEDER [2014] über die Kosten für die Aufbereitung von Pferdemist mit dem MeWa BIO QZ bei etwa 8,00 €<sub>t<sub>FM</sub></sub>. In der Literatur sind nur wenige Angaben zur Wirtschaftlichkeit oder zu den Kosten der mechanischen Vorbehandlung zu finden. Dabei stammen die häufigsten Angaben von den Herstellern (siehe auch Tabelle 2-5 in Kapitel 2.6) und sind ohne Bezug zum Substrat als Spannbreiten angegeben.

Die ermittelten Kosten sind bei der Übertragung auf Praxisanlagen jedoch nur als Richtwerte zu sehen, da für jeden Anwendungsfall eine individuelle Betrachtung erforderlich ist. Insbesondere Systemauswahl, Einbindekosten und Steuerungsablauf der Vorbehandlung sowie die Verfügbarkeit der alternativen Substrate und der Stromverbrauch dafür sind dabei zu beachten. Nicht zu vergessen sind auch ein veränderter Gärrestanfall und Trockensubstanzgehalt im Fermenter sowie daraus resultierende Einflüsse auf das Gesamtsystem der jeweiligen Biogasanlage.

### **Fazit**

Der Prallreaktor eignet sich grundsätzlich für die Vorbehandlung verschiedener Substrate. Durch die Zerkleinerung war bei der Mehrzahl der untersuchten Substrate ein Mehrertrag an Methan erzielbar. Lediglich bei kurzgehäckselten Silagen und trockenem Maisstroh konnten keine Mehrerträge detektiert werden.

Durch die erstmalige systematische Untersuchung verschiedener Einstellungen bei der mechanischen Vorbehandlung anhand des Prallreaktors konnten grundlegende Erkenntnisse zur konstruktiven Gestaltung von Prallmühlen für einen energieeffizienten Aufschluss lignocellulosehaltiger Stoffe gewonnen werden. Dabei sind in Abhängigkeit vom Substrat zum Teil abweichende Einstellungen zu wählen, weshalb bei einem flexiblen Betrieb entsprechende

Anpassungen, wie zum Beispiel durch einen in der Höhe verstellbarer Schieber als Auslassöffnung, möglich sein sollten. Bei der Bewertung der untersuchten Einstellungen zeigte sich, dass eine schnelle Zerkleinerung effizienter ist als eine intensive. Daher ist eine weitere Reduzierung der Drehzahl ein Ansatzpunkt für die weitere technische Optimierung.

Während sich die verwendeten Methoden zur Bestimmung von Stromverbrauch und Biogaspotenzial bewährt haben, zeigte sich die Partikelgrößenbestimmung mittels Siebanalyse als nur beschränkt einsetzbar. Die Bestimmung der Oberflächengröße über alternative Messverfahren ist eine Option, die in zukünftigen Untersuchungen Berücksichtigung finden sollte. An dieser Stelle zeigt sich auch die Herausforderung bei der Anwendung von Methoden der mechanischen Verfahrungs-technik für Biomasse, die ursprünglich für mineralische Stoffe und Kohle entwickelt wurden.

Auch der Extruder eignet sich als Vorbehandlungsverfahren für alle untersuchten Substrate. Allerdings ist für Substrate mit hohem Trockensubstanzgehalt, wie zum Beispiel Stroh, die Zugabe von Flüssigkeit in Form von Wasser oder Gülle vorzusehen. Aufgrund der Baugröße (Labormaßstab) des verwendeten Extruders ist eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse zum Stromverbrauch auf Praxisanlagen nicht gegeben. Insbesondere für Pferdemist zeigten sich vielversprechende Ergebnisse beim Methanertrag, die im großtechnischen Maßstab überprüft werden sollten.

In der Praxis werden in der Regel Substratmischungen eingesetzt, was eine weitere Überprüfung der Ergebnisse an Praxisanlagen erfordert. Vor allem zu möglichen Synergieeffekten durch Kombination von Aufbereitungsverfahren und Substratmix sind noch keine Untersuchungen bekannt. Auch hinsichtlich des Einflusses beim Einsatz zerkleinerter lignocellulosehaltiger Substrate auf den Biogasprozess bedarf es noch weiterer Untersuchungen.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Biogastechnologie existieren verschiedenste Ansätze zur Optimierung des Verfahrens. Eine Möglichkeit ist die Vorbehandlung der eingesetzten Substrate, um höhere Biogasausbeuten zu erzielen, neue Substrate zu erschließen und die Gesamtwirtschaftlichkeit von Biogasanlagen zu erhöhen. Für diese Vorbehandlung werden vor allem mechanische Zerkleinerungstechnologien eingesetzt, die konstruktiv sehr unterschiedlich gestaltet sind. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit erstmalig eine systematische Untersuchung der mechanischen Vorbehandlung anhand eines Prallreaktors hinsichtlich Partikelgrößenverteilung, Biogasertrag und Stromverbrauch für verschiedene Substrate durchgeführt. Ziel dieser Arbeit war somit die Optimierung und Bewertung der Technologie „Prallreaktor“ zur Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Substrate für eine landwirtschaftliche Biogasanlage.

Für die Versuche wurden Substrate mit modellhaftem Charakter ausgewählt, die eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auch auf vergleichbare Substrate zulassen. Dabei handelte es sich um Triticalestroh, Hafer-Ganzpflanzensilage, Maisstroh und Pferdemist. Zudem wurde die Substratmischung einer Biogasanlage, bei der auch ein Prallreaktor für die Vorbehandlung eingesetzt wird, mit hohen Anteilen Grassilage (53 % Grassilage, 40 % Maissilage und 7 % Rinder- und Pferdemist) untersucht.

Bei allen untersuchten Substraten zeigte sich durch die Vorbehandlung eine Verringerung der Partikelgröße. Wie zu erwarten, war für feinere Partikelgrößen auch ein höherer Aufwand und somit Stromverbrauch erforderlich. Allerdings konnte kein direkter Zusammenhang zwischen einer feineren Partikelgröße und einem Mehrertrag an Methan hergestellt werden. Somit führt eine Steigerung der Aufbereitungsintensität nicht unbedingt zu einer Steigerung des mikrobiellen Abbaus.

Wesentliches Ziel der Substratvorbehandlung war neben dem Einsatz alternativer Substrate die Steigerung der Biogaserträge. So war durch die mechanische Vorbehandlung von Triticalestroh eine Steigerung beim Methanertrag von bis zu 16 %, bei Pferdemist bis zu 14 % und bei der Substratmischung bis zu 10 % möglich. Demgegenüber waren bei Hafer-Ganzpflanzensilage und Maisstroh keine Mehrerträge an Methan zu verzeichnen. Offenbar sind kurzgehäckselte Silagen bereits durch die Silierung ausreichend aufgeschlossen. Um mögliche Verluste durch aeroben Abbau zu vermeiden, ist der direkte Eintrag der vorbehandelten Substrate in den Fermenter vorzusehen. Daher sollte die Vorbehandlung idealerweise zwischen Bevorratung und dem Eintragungssystem in die Verfahrenstechnik der Biogasanlage eingebunden werden.

Zur Einordnung der Ergebnisse mit dem Prallreaktor wurden zusätzlich Zerkleinerungsversuche mit einem Extruder im Labormaßstab durchgeführt. Grundsätzlich war der Extruder ebenfalls für alle untersuchten Substrate geeignet, jedoch musste bei Substraten mit hohem Trockensubstanzgehalt (Stroh), Flüssigkeit zugegeben werden. Die Ergebnisse zur Steigerung der Methanerträge waren vergleichbar.

Neben den Investitionskosten hatte der Stromverbrauch den größten Einfluss auf die Kosten für die Vorbehandlung. Diese variierten in Abhängigkeit der gewählten Einstellungen am Prallreaktor deutlich. Mit Hilfe der ermittelten optimalen Einstellungen ließen sich Stromverbräuche von 12,9 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> für Triticale- und Maisstroh, 2,6 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> für Hafer-GPS, 10,8 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> für Pferdemist und 6,1 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> für die Substratmischung ermitteln. Nach Zusammenführung der Ergebnisse zum Stromverbrauch und Mehrertrag an Methan ergab sich für Triticalestroh, Pferdemist und die Substratmischung nach energetischer Bilanzierung ein Gewinn durch die mechanische Vorbehandlung.

Eine weitere wichtige Komponente für die Wirtschaftlichkeit waren die Kosten für die Verschleißteile. Um die Kosten dafür niedrig zu halten, sollte eine einfache Konstruktion mit schnell zu wechselnden Verschleißteilen vorgesehen werden. Darüber hinaus ist für einen langfristig zuverlässigen Betrieb der Anlage bei der konstruktiven Gestaltung auch auf den Korrosionsschutz sowie Beeinträchtigungen durch Staub und Silagesäfte zu achten.

Unter wirtschaftlichen Aspekten zeigten vor allem Pferdemist und Maisstroh im Vergleich zu Silomais ihr Potenzial als Alternativsubstrat. Durch ihren Reststoffcharakter und dem damit verbundenen fehlenden Marktwert sind diese beiden Substrate wirtschaftlich interessant. Demgegenüber stellt sich die Wirtschaftlichkeit für Triticalestroh gegenüber Silomais aufgrund des Marktwertes für Getreidestroh geringer dar. Die Ergebnisse können jedoch in Abhängigkeit von Substratqualität und Biogasanlage schwanken, weshalb eine individuelle Betrachtung für jedes Projekt erforderlich ist.

Der Prallreaktor als Verfahren der mechanischen Vorbehandlung ist grundsätzlich für verschiedene Substrate geeignet. Durch den Aufschluss können die Gasausbeute gesteigert und bisher ungenutzte Nebenprodukte für den Biogasprozess erschlossen werden, wodurch sich auch die Wirtschaftlichkeit verbessert.

## 9 SUMMARY

There are various approaches for the optimization in biogas technology. One possibility is the pretreatment of the used substrates in order to achieve higher biogas yields, open up new substrates and increase the overall economic viability of biogas plants. For this pretreatment, mechanical treatment technologies are used, which are very different in construction. Therefore, a systematic investigation of the mechanical pretreatment by means of impact with regard to particle size distribution, biogas yield and power consumption for different substrates was carried out for the first time. The aim of this thesis was thus to optimize and evaluate the technology “impact reactor” for pretreatment of lignocellulosic substrates for use in an agricultural biogas plant.

Substrates with a model character were selected for the experiments, which allow the results to be transferred to comparable substrates. These were triticale straw, oat whole crop silage, maize straw and horse manure. In addition, the substrate mixture of a biogas plant, in which an impact reactor is also used for pretreatment, with a high proportion of grass silage (53 % grass silage, 40 % maize silage and 7 % cattle and horse manure) was examined.

Pretreatment of all substrates showed a reduction in particle size. As expected, finer particle sizes also required more effort and therefore higher power consumption. However, no direct correlation could be established between a finer particle size and an increased methane yield. Therefore, an increase in the processing intensity does not necessarily lead to an increase in microbial degradation.

In addition to the use of alternative substrates, the main objective of substrate pretreatment was to increase biogas yields. Mechanical pretreatment of triticale straw made it possible to increase methane yield by up to 16 %, horse manure by up to 14 % and substrate mixture by up to 10 %. In contrast, no additional methane yields were recorded for oat whole crop silage and maize straw. Apparently short chopped silages are already sufficiently broken down by the silage. To avoid possible losses due to aerobic degradation, the pretreated substrates must be fed directly into the fermenter. Therefore, the pretreatment should ideally be integrated into the process engineering of the biogas plant between storage and the feed system.

In order to classify the results with the impact reactor, additional treatment experiments were carried out with an extruder on a laboratory scale. In principle, the extruder was also suitable for all substrates examined, but liquid had to be added to substrates with a high dry substance content (straw). The results for increasing methane yields were comparable.

Besides the investment costs, power consumption had the greatest influence on the costs of pretreatment. These varied significantly depending on the selected settings at the impact reactor. With the help of the determined optimal settings, power consumption of 12.9 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> for triticale and maize straw, 2.6 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> for oat whole crop silage, 10.8 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> for horse manure and 6.1 kWh<sub>el</sub>/t<sub>FM</sub> for the substrate mixture could be determined. After combining the results on power consumption and additional methane yield, the mechanical pretreatment of triticale straw, horse manure and the substrate mixture resulted in a gain after energetic balancing.

Wear parts were another important cost factor. In order to keep the costs low, a simple design with wear parts that can be changed quickly should be provided. In addition, corrosion protection and impairments caused by dust and silage juices must also be taken into account in the design of the plant to ensure long-term reliable operation.

From an economic point of view, horse manure and maize straw showed their potential as an alternative substrate compared to silage maize. Due to their residual material character and the associated lack of market value, these two substrates are economically interesting. By contrast, the market value of cereal straw makes triticale straw more economical than silage maize. However, the results may vary depending on substrate quality and biogas plant, which is why an individual consideration is required for each project.

The impact reactor as a method of mechanical pretreatment is basically suitable for various substrates. The pretreatment process increases the biogas yield and opens up previously unused residues for the biogas process, which also improves economic efficiency.

## 10 VERZEICHNISSE

### 10.1 Literatur- und Quellenverzeichnis

- Agbor, V.B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A., Levin, D.B. (2011):** Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. *Biotechnology Advances* 29 (2011), S. 675-685
- Alex, W. (2008):** Krümelkunde (Skriptum). Ausgabedatum: 19. November 2008.  
<http://www.alex-weingarten.de/skripten/kruemel.pdf> (04.06.2018)
- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., Negro, M.J. (2010):** Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology* 101 (2010), S. 4851-4861
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Hopfner-Sixt, K., Bodiroza, V., Hrbek, R., Friedel, J., Pötsch, E., Wagentristl, H., Schreiner, M., Zollitsch, W. (2007):** Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology* 98 (2007), S. 3204 – 3212
- Apfelbeck, R. (1989):** Raps als Energiepflanze – Verwertung von Rapsöl und Rapsstroh zur Energiegewinnung. Dissertation. Forschungsbericht Agrartechnik Nr. 171 des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG). Technische Universität München-Weihenstephan. 1989
- Appels, L., Lauwers, J., Degrève, J., Helsen, L., Lievens, B., Willems, K., Van Impe, J., Dewil, R. (2011):** Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), S. 4295-4301
- Atchley, A.A. and Crum, L.A. (1988):** Acoustic cavitation and bubble dynamics. In: Suslick, K.S.. *Ultrasound – its chemical, physical and biological effects*, S. 1-64. VCH Publishers, Weinheim. 1988
- Ballesteros, I., Oliva, J.M., Negro, M.J., Manzanares, P., Ballesteros, M. (2002):** Enzymic hydrolysis of steam exploded herbaceous agricultural waste (*Brassica carinata*) at different particule sizes. *Process Biochemistry* 38 (2002), S. 187-192

**Ballesteros, I., Negro, J., Oliva, J.M., Cabanas, A., Manzanares, P., Ballesteros, M.**

(2006): Ethanol production from steam-explosion pretreated wheat straw. Applied Biochemistry and Biotechnology 129-132 (2006), S. 496-508

**Baserga, U. (1998):** Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen - Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras. FAT-Berichte Nr. 512. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik. Tänikon (Schweiz). 1998

**Baserga, U. (2000):** Vergärung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen – Stoffdaten, Gärtechnik und gesetzliche Grundlagen. FAT-Berichte Nr. 546. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik. Tänikon (Schweiz). 2000

**BHS-Sonthofen (2014a):** RBG Biogrinder. Prospekt. BHS-Sonthofen GmbH. 2014

**BHS-Sonthofen (2014b):** Premiere auf der BIOGAS 2014 – Neuer, kleiner Biogrinder. BHS-Sonthofen GmbH. Pressemeldung vom 13.01.2014.

<http://www.bhs-sonthofen.de/de/aktuelles/news/detail-news/article/premiere-auf-der-biogas-2014-neuer-kleiner-biogrinder.html> (04.06.2018)

**Börger (o.J.a):** Multichopper. Börger GmbH.

[http://www.boerger.com/de\\_DE/produkte/zerkleinerungsgeraete/multichopper/uebersicht.html](http://www.boerger.com/de_DE/produkte/zerkleinerungsgeraete/multichopper/uebersicht.html) (04.06.2018)

**Börger (o.J.b):** Unihacker. Börger GmbH.

[http://www.boerger.com/de\\_DE/produkte/zerkleinerungsgeraete/unihacker/uebersicht.html](http://www.boerger.com/de_DE/produkte/zerkleinerungsgeraete/unihacker/uebersicht.html) (04.06.2018)

**Börger (o.J.c):** Rotorrechen. Börger GmbH.

[http://www.boerger.com/de\\_DE/produkte/zerkleinerungsgeraete/rotorrechen/uebersicht.html](http://www.boerger.com/de_DE/produkte/zerkleinerungsgeraete/rotorrechen/uebersicht.html) (04.06.2018)

**Böyer, S. und Sander, A. (2011):** Sinn und Unsinn von Aufschlusssystemen. PlanET Biogastechnik GmbH. Effizienzsteigerung von Biogasanlagen, Fachtagung am 10.11.2011 in Haus Düsse.

<https://www.landwirtschaftskammer.de/duesse/znr/pdfs/2011/2011-11-10-biogas-08.pdf> (04.06.2018)

**Bomatic (o.J.):** Großartig im Aufschließen und Zerkleinern: Vertikal-Shredder der Rotacrex-Serie. Bomatic Umwelt- und Verfahrenstechnik GmbH. Prospekt.

<https://bomatic.de/wp-content/uploads/2016/04/R1200.pdf> (04.06.2018)

- Bougrier, C., Albasi, C., Delgenès, J.P., Carrère, H. (2006):** Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability. *Chemical Engineering and Processing* 45 (2006), S. 711-718
- Brosowski, A., Adler, P., Erdmann, G., Stinner, W., Thrän, D., Mantau, U., Blanke, C., Mahro, B., Hering, T., Reinholdt, G. (2015):** Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen – Status quo in Deutschland. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ). Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe 36. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe. ISBN 978-3942147-29-3. Leipzig. 2015
- Brownell, H.H., Saddler, J.N. (1987):** Steam pretreatment of lignocellulosic material for enhanced enzymatic hydrolysis. *Biotechnology and Bioengineering* 29 (1987), S. 228-235
- Brückner, C. und Sawatzki, T. (2011):** Effizienzsteigerung in Biogasanlagen durch Verbesserung des Substratabbaus. Schriftenreihe des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 35/2011
- Brulé, M., Vogtherr, J., Lemmer, A., Oechsner, H., Jungbluth, T. (2011):** Einfluss einer Enzymzugabe auf die Methanerträge von Gärsubstraten einer Praxis-Biogasanlage. *Landtechnik* Bd. 66 Nr. 1 (2011), S. 50-52
- Bruni, E., Jensen, A.P., Angelidaki I. (2010a):** Comparative study of mechanical, hydrothermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production. *Bioresource Technology* 101 (2010), S. 8713-8717
- Bruni, E., Jensen, A.P., Pedersen, E.S., Angelidaki I. (2010b):** Anaerobic digestion of maize focusing on variety, harvest time and pretreatment. *Applied Energy* 87 (2010), S. 2212-2217
- BTS Biogas (o.J.a):** BIOaccelerator. BTS Biogas GmbH. Prospekt. [http://www.bts-biogas.com/fileadmin/flipbooks/bts\\_bioaccelerator\\_de/index.html#p=1](http://www.bts-biogas.com/fileadmin/flipbooks/bts_bioaccelerator_de/index.html#p=1) (04.06.2018)
- BTS Biogas (o.J.b):** Biogasanlagen Repowering. BTS Biogas GmbH. Prospekt. [http://www.bts-biogas.com/fileadmin/flipbooks/bts\\_repowering\\_de/index.html#p=1](http://www.bts-biogas.com/fileadmin/flipbooks/bts_repowering_de/index.html#p=1) (04.06.2018)
- Cambi (o.J.):** Thermal Hydrolysis Process (CambiTHP). Cambi Group AS. <https://www.cambi.com/what-we-do/thermal-hydrolysis/> (04.06.2018)

- Camire, M.E. (1998):** Chemical changes during extrusion cooking. In: Shahidi, F., Ho, C.-T., van Chuyen, N.. Process-Induced Chemical Changes in Food. S. 109-121. ISBN 978-1-4899-1925-0. Springer Science+Business Media. New York. 1998
- Carlsson, M., Lagerkvist, A., Morgan-Sagastume, F. (2012):** The effects of substrate pretreatment on anaerobic digestion systems: A review. Waste Management 32 (2012), S. 1634-1650
- Chen, H., Liu, L., Yang, X., Li, Z. (2005):** New process of maize stalk amination treatment by steam explosion. Biomass and Bioenergy 28 (2005), S. 411-417
- Climent, M., Ferrer, I., del Mar Baeza, M., Artola, A., Vázquez, F., Font, X. (2007):** Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. Chemical Engineering Journal, 133 (2007), S. 335-342
- Dandikas, V., Heuwinkel, H., Lichti, F., Drewes, J.E., Koch, K. (2014):** Correlation between biogas yield and chemical composition of energy crops. Bioresource Technology 174 (2014), S. 316 – 320
- Datar, R., Huang, J., Maness, P.C., Mohagheghi, A., Czernik, S., Chornet, E. (2007):** Hydrogen production from the fermentation of corn stover biomass pretreated with a steam-explosion process. International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007), S. 932–939
- Demel, M., Kirchmeier, H., Uppenkamp, N. (2011):** Mulchen nach Mais: Wie arbeiten die Systeme? Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.  
<https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/aussenwirtschaft/mulchen-maisstoppeln.htm> (04.06.2018)
- Deutsche Reiterliche Vereinigung e.V. (2018):** Zahlen, Daten, Fakten 2018. FN aktuell, Offizielle Pressemitteilung der Deutsche Reiterliche Vereinigung e.V. (FN) von April 2018  
[https://www.pferd-aktuell.de/shop/index.php/cat/c106\\_Verband.html#22600](https://www.pferd-aktuell.de/shop/index.php/cat/c106_Verband.html#22600) (04.06.2018)
- Deutsches Institut für Normung e.V. (1974a): DIN 66143:** Darstellung von Korn- (Teilchen-)größenverteilungen, Potenznetz. Beuth Verlag. Berlin. 1974

- Deutsches Institut für Normung e.V. (1974b): DIN 66144:** Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen, Logarithmisches Normalverteilungsnetz. Beuth Verlag. Berlin. 1974
- Deutsches Institut für Normung e.V. (1976): DIN 66145:** Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen, RRSB-Netz. Beuth Verlag. Berlin. 1976
- Deutsches Institut für Normung e.V. (1987): DIN 66165:** Partikelgrößenanalyse, Siebanalyse. Teil 1 & 2. Beuth Verlag. Berlin. 1987
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2000a): DIN EN 12880:** Charakterisierung von Schlämmen – Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts. Beuth Verlag. Berlin. 2000
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2000b): DIN EN 12879:** Charakterisierung von Schlämmen – Bestimmung des Glühverlustes der Trockenmasse. Beuth Verlag. Berlin. 2000
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2004): DIN ISO 9276-1:** Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen. Teil 1. Beuth Verlag. Berlin. 2004
- Dietz, H. und Boles, E. (2013):** Etablierung neuer Hefen zur vollständigen Vergärung von Biomassehydrolysaten. Goethe-Universität Frankfurt. Fachtagung - Regionale Bioalkoholherstellung aus biogenen Reststoffen. Stuttgart-Hohenheim
- Doppstadt (o.J.):** AK 510 Biopower. Doppstadt Calbe GmbH.  
<https://doppstadt.de/produkte/smart-shredding/grinder-line/produkt-details/product/ak-510-k-biopower/> (04.06.2018)
- Düngeverordnung (DüV) (2017):** Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen. In der Fassung der Bekanntmachung vom 26.05.2017 (BGBl. I, S. 1305)
- Duff, S.J.B. and Murray, W.D. (1998):** Bioconversion of forest products industry waste cellulose to fuel ethanol: a review. *Bioresource Technology* 55 (1998), S. 631-636
- Eder, J. und Fleischhut, M. (2014):** Verwertung von Körnermaisstroh für die Biogaserzeugung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Freising  
<http://www.lfl.bayern.de/ipz/mais/076707/index.php> (04.06.2018)

- Effenberger, M. und Lebuhn, M. (2011):** Repowering von Biogasanlagen zur Steigerung der Prozesseffizienz. In: Biogas in der Landwirtschaft: Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Kongress vom 20. bis 21.09.2011 in Göttingen. Tagungsband, S. 268-280
- EnviTec (o.J.):** Neue Anmischtechnik – der Kreis-Dissolver. EnviTec Biogas AG. Prospekt. [https://www.envitec-biogas.de/fileadmin/media/pdf\\_downloads/subpage\\_info-center/brochures/Kreis\\_Biogas\\_Dissolver\\_DE.pdf](https://www.envitec-biogas.de/fileadmin/media/pdf_downloads/subpage_info-center/brochures/Kreis_Biogas_Dissolver_DE.pdf) (04.06.2018)
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) (2004):** Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien vom 21. Juli 2004. BGBl. Jahrgang 2004, Teil I, Nr. 40, S. 1918
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) (2009):** Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien vom 25. Oktober 2008. BGBl. Jahrgang 2008, Teil I, Nr. 49, S. 2074
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) (2012):** Gesetz für den Vorrang Erneuerbare Energien, Konsolidierte (unverbindliche) Fassung des Gesetzestextes in der ab 01. Januar 2012 geltenden Fassung  
[https://www.bundesanzeiger-verlag.de/fileadmin/BIV-Portal/Dokumente/eeg\\_2012\\_bf.pdf](https://www.bundesanzeiger-verlag.de/fileadmin/BIV-Portal/Dokumente/eeg_2012_bf.pdf) (04.06.2018)
- Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) (2017):** Gesetz für den Ausbau Erneuerbarer Energien vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066, das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2532) geändert worden ist. BGBl. Jahrgang 2017, Teil I, Nr. 49, S. 2532
- Fachverband Biogas e.V. (2018):** Branchenzahlen 2017 und Prognose der Branchenentwicklung 2018. Stand: Mai 2018  
[https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE\\_Branchenzahlen/\\$file/18-05-25\\_Biogas\\_Branchenzahlen-2017\\_Prognose-2018\\_end.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/18-05-25_Biogas_Branchenzahlen-2017_Prognose-2018_end.pdf) (04.06.2018)
- Fischer, E., Powrosnik, A.M., Beil C. (2013):** Assessment of process stability and biogas yield for the anaerobic digestion of horse dung in lab-scale. Landtechnik 68 (4), S. 248-251
- Fleischhut, M. (2015):** Doppelernte beim Körnermais – Korn und Maisstroh. Innovation 4/2015, S. 4-5. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Freising  
[https://www.magazin-innovation.de/ausgaben/2015/innovation\\_4\\_2015/doppelernte-beim-koernermais.html](https://www.magazin-innovation.de/ausgaben/2015/innovation_4_2015/doppelernte-beim-koernermais.html) (04.06.2018)

- Fleischhut, M. und Strobl, M. (2017):** Körnermaisstroh – ein Substrat, das Hoffnungen weckt. *Biogas Journal* 2/2017, S. 26-33
- Geisberger (2013):** Kugelmühle Pürotor 1.0. Geisberger Gesellschaft für Energieoptimierung mbH. Technische Daten. 2013  
<https://www.geisberger-gmbh.de/produkte/kugelmuehle> (04.06.2018)
- Gerhardt, M., Pelenc, V., Bäuml, M. (2007):** Application of hydrolytic enzymes in the agricultural biogas production: Results from practical applications in Germany. *Biotechnology Journal* 2/2007, S. 1481-1484
- Greif, H., Limpert, A., Fattmann, G., Seibel, S. (2004):** Technologie der Extrusion: Lern- und Arbeitsbuch für die Aus- und Weiterbildung. ISBN 3-446-22669-9. Carl Hanser Verlag. München Wien. 2004
- Gregg, D., Saddler, J.N. (1996):** A techno-economic assessment of the pretreatment and fractionation steps of a biomass-to-ethanol process. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 57/58 (1996), S. 711-727
- Hartmann, H., Angelidaki, I., Ahring, B.K. (2000):** Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. *Water Science and Technology* 41, No.3, S. 145-153
- Haeffner, B., Nied, C., Voigt, J., Sommer, K. (2010):** Verweilzeitverkürzung bei der Biogasentstehung durch Zerkleinerung von lignocellulosehaltigen Substraten. *Chemie Ingenieur Technik* 2010, 82, No.8, S. 1261-1264
- Häußermann, A., Beck, J., Jungbluth, T. (2002):** Einstreumaterialien in der Pferdehaltung. *Landtechnik* Bd. 57 Nr. 1 (2002), S. 50-51
- Hashimoto, A.G. (1983):** Conversion of straw-manure mixtures to methane at mesophilic and thermophilic temperatures. *Biotechnology and Bioengineering*, 25 (1983), S. 185-200
- Heiermann, M., Theobald, A., Suárez Quiñones, T., Kausmann, R., Budde, J., Eschenbacher, S., Rottmann, N., Wawra, M., Nacke, O., Cordes, A., Müller, L., Kretschmar, J., Dröge, S. (2014):** Untersuchungen und Bewertung zum Einsatz von Enzymen in Biogasanlagen auf deren Wirksamkeit und deren Wirkungsweise sowie zur Veränderung des Verfahrensablaufs im Labor-, Technikum- und Praxisanlagen-Maßstab; Kurztitel: BiogasEnzyme. Schlussbericht zum Verbundvorhaben. Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Biogas Nord Anlagenbau GmbH,

Archea Service GmbH, ASA Spezialenzyme GmbH, Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V. Im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft. 2014

- Helfrich, D. und Oechsner, H. (2003):** Hohenheimer Biogasertragstest - Vergleich verschiedener Laborverfahren zur Vergärung von Biomasse. Landtechnik Bd. 58 Nr. 3 (2003), S. 148–149
- Hendricks, A.T.W.M., Zeeman, G. (2009):** Pretreatment to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology 100 (2009), S. 10-18
- Herrmann, C., Heiermann, M., Idler, C. (2011):** Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops. Bioresource Technology 102 (2011), S. 5153 – 5161
- Heydemann, F. (2011):** Agrargasanlagen und Maisanbau – Eine kritische Umweltbilanz. NABU Schleswig-Holstein. 2011  
<https://schleswig-holstein.nabu.de/imperia/md/content/schleswigholstein/gutachten-stellungnahmen/gutachten/agrogasanlagen-nabu-gutachten.pdf> (04.06.2018)
- Hjorth, M., Gränitz, K., Adamsen, A.P.S., Møller, H.B. (2011):** Extrusion as a pretreatment to increase biogas production. Bioresource Technology 102 (2011), S. 4989-4994
- Hauptverband der landwirtschaftlichen Buchstellen und Sachverständigen e.V. (HLBS) (2010):** Verlautbarung des HLBS-Steuer Ausschusses 1/2010. St. Augustin.  
<https://www.hlbs.de/ca/c/mwl/> (04.06.2018)
- Hoelschertechnik (2016):** Gorator. hoelschertechnik-gorator GmbH & Co. KG. Prospekt. 2016  
[https://www.himmelfo.de/wp-includes/images/content/download/de/gorator/nass-zerkleinerungssysteme/broschuere\\_gorator\\_hoelscher\\_12seiter\\_digital\\_20160620.pdf](https://www.himmelfo.de/wp-includes/images/content/download/de/gorator/nass-zerkleinerungssysteme/broschuere_gorator_hoelscher_12seiter_digital_20160620.pdf) (04.06.2018)
- Hongzhang, C. and Liying, L. (2007):** Unpolluted fractionation of wheat straw by steam explosion and ethanol extraction. Bioresource Technology 98 (2007), S. 666–676
- Höfl, K. (1986):** Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. ISBN 3-540-16232-1. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo. 1986

- Hötte, S., Stemann, G., Lütke Entrup, N. (2009):** Zwischenfrüchte in die Biogasanlage? - Energetische Leistung je Hektar steigt. Mais 3/2009, S. 106 – 109. Soest
- HoSt (o.J.):** Thermodruckhydrolyse. HoSt Bio-Energie.  
<http://www.host.nl/de/biogasanlagen/thermodruckhydrolyse/> (04.06.2018)
- Huning (o.J.a):** Prallzerkleinerer. Huning Maschinenbau GmbH.  
<http://www.huning-anlagenbau.de/40-0-Prallzerkleinerer.html> (04.06.2018)
- Huning (o.J.b):** Optimatic Hammermühle. Huning Maschinenbau GmbH.  
<http://huning-anlagenbau.de/38-0-Hammermuehle.html> (04.06.2018)
- Huning (2011):** Biocutter HZ 460 Zerkleinerer. Huning Maschinenbau GmbH. Prospekt. 2011  
[http://www.huning-maschinenbau.de/files/flyer\\_biocutter.pdf](http://www.huning-maschinenbau.de/files/flyer_biocutter.pdf) (04.06.2018)
- Ignatowitz, E. (1997):** Chemietechnik. Europa Lehrmittel. ISBN 3-8085-7046-6. Wuppertal. 1997
- Innovum (o.J.):** BioCrack Produktinfo. Innovum GmbH.  
[http://www.innovum.at/innvum\\_bewegung\\_002.htm](http://www.innovum.at/innvum_bewegung_002.htm) (04.06.2018)
- Jensen, D. (2012):** Prallen und Impfen. Biogas Journal 1\_2012, S. 48-52
- Jenz (2012):** Eberhard Hälbich schreddert Pferdemist für Biogasanlagen. Kundenstatement vom 02.04.2012. Jenz GmbH.  
<https://www.jenz.de/kundenstatements/kundenstatement-ansicht/eberhard-haelbich-schreddert-pferdemist-fuer-biogasanlagen/3/Biomasseaufbereiter/> (04.06.2018)
- Jorgensen, H., Kristensen, J.B., Felby, C. (2007):** Enzymatic conversion of lignocellulose into fermentable sugars: challenges and opportunities. Biofuels Bioproducts and Bio-refining 1 (2007), S. 119-134
- Kaar, W.E., Gutierrez, C.V., Kinoshita, C.M. (1998):** Steam explosion of sugarcane bagasse as a pretreatment for conversion to ethanol. Biomass and Bioenergy Vol. 14 No. 3, S. 277-287
- Kalia, A.K. and Singh, S. P. (1998):** Horse dung as a partial substitute for cattle dung for operating family-size biogas plants in a hilly region. Bioresource Technology 64 (1998), S. 63-66
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (Hrsg.), u.a. (2009):** Energie aus Biomasse. 2. Auflage. ISBN 978-3-540-85095-3. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 2009

- Karbach-Nölke, K. (2017):** Biogas in Nordrhein-Westfalen – Auswertung der Biogasanlagen-Betreiberdatenbank der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. Stand: 27.07.2017. Zentrum für nachwachsende Rohstoffe (ZNR). Haus Düsse  
<https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/biogas/veroeffentlichungen/biogas-in-nrw.htm> (04.06.2018)
- Kerkering, M. (2015):** Entwicklung eines anaeroben Verfahrens mit dem Ziel der Biogasgewinnung aus schlichtehaltigen Textilabwässern. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal. Wuppertaler Reihe zur Umweltsicherheit. ISBN 978-3-8440-3510-0. 2015
- Kim, S. and Holtzaple, M.T. (2005):** Lime pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover. *Bioresource Technology* 96 (2005), S. 1994-2006
- Kopplow, O., Barjenbruch, M., Heinz, V. (2004):** Vorbehandlung von Überschussschlamm durch Elektroporation. *Chemie Ingenieur Technik* 76 (2004) No. 3, S. 317-321
- Kratky, L. und Jirout, T. (2011):** Biomass Size Reduction Machines for Enhancing Biogas Production. *Chemical Engineering Technology* 2011, 34, No.3, S. 391-399
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (2013):** Faustzahlen Biogas. 3. Ausgabe. ISBN 978-3-941583-85-6. Darmstadt. 2013
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (2015):** Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. KTBL-Heft 107. 3. Auflage. ISBN 978-3-945088-03-6. Darmstadt. 2015
- Kusch, S., Oechsner, H., Jungbluth, T. (2008):** Biogas production with horse dung in solid-phase digestion systems. *Bioresource Technology*, 99 (2008), S. 1280-1292
- Laser, M., Schulman, D., Allen, S.G., Lichwa, J., Antal, M.J.J., Lynd, L.R. (2002):** A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol. *Bioresource Technology* 81 (2002), S. 33-44
- Laurenz, L. (2012):** Sommergetreide für die Biogasanlage. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen  
<http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/biogas/veroeffentlichungen/sg-zwischenfrucht-biogas.htm> (04.06.2018)

**Lehmann (o.J.):** Bio-Extrudiertechnik. Lehmann UMT GmbH.

<http://www.lehmann-maschinenbau.de/biogastechnik/bio-extrudiertechnik.html>

(04.06.2018)

**Lehmann, T. und Friedrich, E. (2012):** Stroh statt Feldfrüchte. Landtechnik Bd. 67, Nr. 5, S. 358-360

**Lemmer, A. (2005):** Kofermentation von Grüngut in landwirtschaftlichen Biogasanlagen.

Dissertation. Forschungsbericht Agrartechnik der VDI-MEG Nr. 435. Hohenheim. 2005

**Leopoldina (2013):** Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen. Stellungnahme. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina. Halle (Saale). 2013

[https://www.leopoldina.org/uploads/tx\\_leopublication/2013\\_06\\_Stellungnahme\\_Bioenergie\\_DE.pdf](https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2013_06_Stellungnahme_Bioenergie_DE.pdf) (04.06.2018)

**Liebich (2015):** Voraufschluss und Anlagenflexibilisierung. Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH. Biogasseminar am 06.03.2015, Höxter.

<https://www.kreis->

[hoexter.de/media/downloads/2015\\_03\\_06\\_Vogelsang\\_BioCrack.pdf](https://www.kreis-hoexter.de/media/downloads/2015_03_06_Vogelsang_BioCrack.pdf) (04.06.2018)

**Lindmark, J., Leksell, N., Schnürer, A., Thorin, E. (2012):** Effects of mechanical pre-treatment on the biogas yield from ley crop silage. Applied Energy 97 (2012), S. 498-502

**Lindner (o.J.):** Limator – Prallbrecher zur Substrataufbereitung für Biogasanlagen. Lindner-Recyclingtech GmbH.

<http://www.l-rt.com/de/produkte/prallbrecher/limator/limator.html> (27.04.2016)

**Lindner, J., Miroshnichenko, I., Zielonka, S., Oechsner, H., Lemmer, A. (2015):** Effects of mechanical and enzymatic treatment of digestates after anaerobic digestion on the degree of degradation. 23rd European Biomass Conference and Exhibition, 1-4 June 2015, Vienna, Austria

**Lindner, J. (2016):** Optimierung der primären Gärung bei zweistufigen Biogasanlagen.

Dissertation. Forschungsbericht Agrartechnik der VDI-MEG Nr. 552. Hohenheim. 2016

**Lindorfer, J., Steinmüller, H., Jäger, A., Auer, W., Eder, A. (2010):** Untersuchung der Vorhydrolyse von Lignocellulose Rohstoffen mittels Steam Explosion. Chemie Ingenieur Technik 2010, 82, No. 8, S. 1169-1176

- Lora, J.H. and Wayman, M. (1978):** Delignification of hardwoods by autohydrolysis and extraction. *Tappi* 61 (1978), S. 47-50
- Meder, M. (2014):** Effizienzsteigerung durch Aufbereitung „Limator“. Lindner-Recyclingtech GmbH. DELaND-Tagung „Sind „schwierige“ Substrate wirklich schwierig?“. Papenburg. 23.06.2014.  
<http://groengasproject.eu/Agenda.html?cId=Agenda&rId=3> (04.06.2018)
- Møller, H.B., Sommer, S.G., Ahring, B.K. (2004):** Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy* 26 (2004), S. 485 – 495
- Mönch-Tegeder, M., Lemmer, A., Oechsner, H., Jungbluth, T. (2013):** Investigation of the methane potential of horse manure. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, Vol. 15, No.2 (2013), S. 161-172
- Mönch-Tegeder, M., Lemmer, A., Jungbluth, T., Oechsner, H. (2014):** Effect of full-scale substrate pretreatment with the cross-flow grinder on biogas production. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, Vol. 16, No.3 (2014), S. 138-147
- Mönch-Tegeder, M., Lemmer, A., Oechsner, H., (2014):** Enhancement of methane production with horse manure supplement and pretreatment in a full-scale biogas process. *Energy* 73 (2014), S. 523-530
- Mönch-Tegeder, M., Lemmer, A., Hinrichs, J., Oechsner, H., (2015):** Development of an inline process viscometer for the full-scale biogas process. *Bioresource Technology* 178 (2015), S. 278-284
- Mönch-Tegeder, M. (2014):** Untersuchungen zur Verwertbarkeit von Pferdemist im Biogasprozess. Dissertation. Universität Hohenheim. Stuttgart-Hohenheim. 2014
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapple, M., Ladisch, M. (2005):** Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Biomass Technology* 96, S. 673-686
- Müller, J., Thiem, A., Eder, B., Günthert, W., Hruschka, H., Kopp, J., Kunz, P.M., Otte-Witte, R., Schmelz, K.-G., Seiler, K. (2000):** Verfahren und Anwendungsgebiete der mechanischen Klärschlammdeintegration. *Korrespondenz Abwasser* 47 (2000) Nr. 4, S. 570-576
- Naegele, H.-J., Mönch-Tegeder, M., Haag, N.L., Oechsner, H., (2014):** Effect of substrate pretreatment on particle size distribution in a full-scale research biogas plant. *Bioresource Technology* 172 (2014), S. 396-402

- Neis, U., Nickel, K., Tiehm, A. (1997):** Intensivierung der Schlammfäulung durch Klärschlammaufschluss mit Ultraschall. Korrespondenz Abwasser 44 (1997) Nr. 10, S. 1850-1855
- Nest (o.J.):** Kugelmühle. N·E·S·T Anlagenbau GmbH. Prospekt.  
[http://biogas-kugelmuehle.de/assets/faltblatt\\_kugelmuehle.pdf](http://biogas-kugelmuehle.de/assets/faltblatt_kugelmuehle.pdf) (04.06.2018)
- Netzsch (o.J.):** Grobstoffzerkleinerer M-Ovas. NETZSCH Pumpen & Systeme GmbH.  
<https://pumpen.netzsch.com/de/produkte-zubehoer/zerkleinerungssysteme/grobstoffzerkleinerer-m-ovas/> (04.06.2018)
- Neumann, H. (2012):** Zeigen Sie dem Substrat die Zähne. TopAgrar Energiemagazin 3/2012, S. 18-23
- Neumann, H. (2015a):** Maisstroh: Ein günstiges Biogassubstrat. TopAgrar Energiemagazin 1/2015, S. 26-28
- Neumann, H. (2015b):** Repowering: In kleinen Schritten zum Erfolg. TopAgrar Energie Magazin 4/2015, S. 24-27
- Niemann (o.J.):** Kreis-Biogas-Dissolver. Wilhelm Niemann GmbH & Co.  
<http://www.niemann.de/kreis-biogas-dissolvert/biogas.html> (29.04.2016)
- Oechsner, H., Mönch-Tegeder, M., Leible, L., Kälber, S., Kappler, G., Streitferdt, C. (2014):** Möglichkeiten und Grenzen der Verwendung von Landschaftspflegegras in Biogasanlagen. Endbericht. Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie und Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS). Im Auftrag des Landes Baden-Württemberg und des Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR). 2014
- Pahl, M.H. (Hrsg.), u.a. (1993):** Zerkleinerungstechnik. 2. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig / Verlag TÜV Rheinland. ISBN 3-343-00843-5. Köln. 1993
- Pan, X., Xie, D., Kang, K.-Y., Yoon, S.-L., Saddler, J.N. (2007):** Effect of organosolv ethanol pretreatment variables on physical characteristics of hybrid poplar substrates. Applied Biochemistry and Biotechnology 136-140 (2007), S. 367-378
- PlanET (o.J.):** PlanET Gorator. PlanET Biogastechnik GmbH.  
<http://www.planet-biogas.com/produkte/gorator/> (29.04.2016)

- Rauh, S. und Strippel, F.:** Erstmals sinkende Substratpreise!. Biogas Journal 2/2015, S. 78-81. Fachverband Biogas e.V. Freising
- Reinhold, F. und Noack, W. (1956):** Laboratoriumsversuche über die Gasgewinnung aus landwirtschaftlichen Stoffen. In : Liebmann, H. : Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist. R. Oldenbourg Verlag. München
- Röring (o.J.):** PlurryMaxx – Der Nasszerkleinerer. Energie-Anlagen Röring GmbH.  
<https://guelleruehrwerke.com/images/upload/pdf/Roering-Plurry-Maxx-D.pdf>  
(04.06.2018)
- Rubin, E.M. (2008):** Genomics of cellulosic biofuels. Nature 454 (2008). S. 841-845
- Rudolph, W. (2012):** Gas geben mit dem Gorator. Biogas Journal 4/2012, S. 60-66
- Rudolph, W. (2013):** Forschung trifft Praxis. Biogas Journal 2/2013, S. 82-87
- Ruiz, E., Cara, C., Manzanares, P., Ballesteros, M., Castro, E. (2008):** Evaluation of steam explosion pre-treatment for enzymatic hydrolysis of sunflower stalks. Enzyme and Microbial Technology 42 (2008), S. 160-166
- Rumpf, H. (1975):** Mechanische Verfahrenstechnik. Monographie aus Winnacker-Küchler, Chemische Technologie Band 7. 3. Auflage. ISBN 3-46-11987-6. Carl Hanser Verlag München. 1975
- Sapci, Z. (2013):** The effect of microwave pretreatment on biogas production from agricultural straws. Bioresource Technology 128 (2013), S. 487-494
- Schäfer, R. (2014):** Persönliche Mitteilung. Schäfer Elektrotechnik und Sondermaschinen GmbH. 07.05.2014
- Schattauer, A., Wilfert, R. (2003):** Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und aus angebaute Biomasse – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse. Institut für Energetik und Umwelt. Leipzig. 2003
- Scheftelowitz, M., Daniel-Gromke, J., Denysenko, V., Sauter, P., Naumann, K., Krautz, A., Beil, M., Beyrich, W., Peters, W., Schicketanz, S., Schultze, C., Deumelandt, P., Reinicke, F. (2013):** Stromerzeugung aus Biomasse. Zwischenbericht Juni 2013. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ). Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Leipzig. 2013
- Scheftelowitz, M., Rensberg, N., Denysenko, V., Daniel-Gromke, J., Stinner, W., Hillebrand, K., Naumann, K., Peetz, D., Hennig, C., Thrän, D., Beil, M., Kasten, J.,**

- Vogel, L. (2015):** Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben IIa Biomasse). Zwischenbericht Mai 2015, geändert am 17.08.2015. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ). Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Leipzig. 2015
- Schell, D. and Harwood, C. (1994):** Milling of lignocellulosic biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 45/46 (1994), S. 159-168
- Scheuchl (o.J.):** Firmenbroschüre. R. Scheuchl GmbH.  
[https://www.baymevbm.de/media/fp/13da8499106\\_Firmenbroschuere\\_deutsch.pdf](https://www.baymevbm.de/media/fp/13da8499106_Firmenbroschuere_deutsch.pdf)  
(04.06.2018)
- Schimpf, U. (2014):** Enzymatischer Abbau des Lignocellulosekomplexes in Energiepflanzen unter besonderer Berücksichtigung der Silierung und der Biogasproduktion. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin. Berlin. 2014  
<http://edoc.hu-berlin.de/dissertationen/schimpf-ulrike-2014-01-31/PDF/schimpf.pdf>  
(04.06.2018)
- Schirmacher-Rohleder, S. (2016):** Persönliche Mitteilung. ODAS GmbH. 10.03.2016
- Schober, G. and Trösch, W. (2000):** Degradation of digestion residues by lignolytic fungi. *Water Research* 34 (2000), S. 3424-3430
- Schubert, I. (2014):** Persönliche Mitteilung. Heinrich Grotemeier GmbH & Co. KG.  
18.06.2014
- Schuh, H. (2011):** Biostrom, nein danke! *DIE ZEIT* Nr. 29/2011.  
<http://www.zeit.de/2011/29/Biogas> (04.06.2018)
- Schumacher, B., Oechsner, H., Senn, T., Jungbluth, T. (2007):** Aufbereitung von nachwachsenden Rohstoffen zur Optimierung der Biogasausbeute. *Biogas 2007 - Energieträger der Zukunft. VDI-Berichte* 1983, S. 157-168
- Schumacher, B. (2008):** Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol. Dissertation. ISBN 978-3-86664-492-2. Universität Hohenheim. 2008
- Schumacher, B., Hofmann, J., Pröter, J. (2012):** Verfahrensüberblick zur Desintegration von Biomasse. *Biogas Journal* 1/2012, S. 88-94

- Schumacher, B., Wedwitschka, H., Hofmann, J., Denysenko, V., Lorenz, H., Liebetrau, J. (2014):** Disintegration in the biogas sector – Technologies and effects. *Bioresource Technology* 168 (2014), S. 2-6
- Schultheiß, U., Döhler, H., Schwab, M. (2010):** Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft – jährliche Anfallmengen in der Bundesrepublik Deutschland. *Landtechnik* Bd. 65 Nr. 5 (2010), S. 354-356
- Schwarz, B. (2011):** Stand und neueste Entwicklungen der Substratvorbehandlung für den Biomasseinsatz in Biogasanlagen. Fraunhofer IKTS. Vortrag bei der Biogas - Fachtagung der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft in Dermbach 2011  
<http://www.thueringen.de/th9/tll/veranstaltungen/materialien/biogas/index.aspx>  
(04.06.2018)
- Segger-Harbers, J. (2015):** Persönliche Mitteilung. Sehan Bioenergie GmbH & Co. KG.  
21.07.2015
- Sharma, S.K., Mishra, I.M., Sharma, M.P., Saini, J.S. (1988):** *Biomass* 17 (1988), S. 251-263
- Shevchenko, S.M., Beatson, R.P., Saddler, J.N. (1999):** The nature of lignin from steam explosion / enzymatic hydrolysis of softwood. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 77-79 (1999), S. 867-876
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2014):** Land- und Forstwirtschaft, Fischerei – Landwirtschaftliche Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung. Fachserie 3, Reihe 3. Artikelnummer 2030300147005. Erschienen am 26.08.2015. Wiesbaden
- Stieß, M. (2009):** Mechanische Verfahrenstechnik – Partikeltechnologie 1. 3. Auflage. ISBN 978-3-540-32551-2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009
- Steffler, K. (2011):** Neues Verfahren zur Lignin-Extraktion. *ew-Magazin für die Energiewirtschaft* Jg. 110 (2011) Heft 10, S. 28-30
- Strong, P.J., McDonald, B., Gapes, D.J. (2011):** Combined thermochemical and fermentative destruction of municipal biosolids: A comparison between thermal hydrolysis and wet oxidative pre-treatment. *Bioresource Technology* 102 (2011), S. 5520-5527
- Sun, X.F., Xu, F., Sun, R.C., Wang, Y.X., Fowler, P., Baird, M.S. (2004):** Characteristics of degraded lignins obtained from steam exploded wheat straw. *Polymer Degradation and Stability* 86 (2004), S. 245-256

- Taherzadeh, M.J. and Karimi, K. (2008):** Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review. *International Journal of Molecular Sciences* 9 (2008), S. 1621-1651
- Telschow, D. und Gatz, S. (2015):** Hydrolytische Enzyme – was können sie leisten?. *Biogas Journal* 5/2015, S. 88-93
- Thoss, C. und Menzel, N. (2012):** Zwischenbericht über die Verwertung von Landschaftspflegematerial (LAPF). Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V. (DVL). C.A.R.M.E.N.-Symposium 2012. Würzburg  
[http://mulle.lpv.de/fileadmin/user\\_upload\\_biogas/data\\_files/fachinformation/120703\\_sym\\_carmen.pdf](http://mulle.lpv.de/fileadmin/user_upload_biogas/data_files/fachinformation/120703_sym_carmen.pdf) (04.06.2018)
- Tietjen (o.J.):** Imprasyn: Der Substrataufschluss, der wirkt. Tietjen Verfahrenstechnik GmbH. Datenblatt.  
<http://www.tietjen-original.com/de/produkte/imprasyn.html> (04.06.2018)
- Triolo, J.M., Sommer, S.G., Møller, H.B., Weisbjerg, M.R., Jiang, X.Y. (2011):** A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresource Technology* 102 (2011), S. 9395 – 9402
- Ultrawaves (o.J.):** Biosonator. Ultrawaves Wasser & Umwelttechnologien GmbH.  
<http://www.ultrawaves.de/biogasanlagen/biosonator> (04.06.2018)
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2015):** Adoption of the Paris Agreement. Twenty-first session of the Conference of the Parties (COP 21). FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. Paris. 2015  
<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf> (04.06.2018)
- Vauck, W.R.A. und Müller, H.A. (2000):** Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik. 11. überarbeitete und erweiterte Ausgabe. ISBN 978-3-527-30964-1. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Stuttgart. 2000
- VDI-Gesellschaft Energietechnik (2016): VDI 4630 :** Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. In *VDI-Handbuch Energietechnik*. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (Hrsg.). Beuth Verlag. Düsseldorf. 2016

- Vetter, A. (Hrsg.) u.a. (2010):** Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen. 3. Auflage. ISBN 978-3-942147-02-6. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Gülzow. 2010
- Vidal, P.F., Molinier, J. (1988):** Ozonolysis of lignin - Improvement of in vitro digestibility of poplar sawdust. *Biomass* 16 (1988), S. 1-17
- Viola, E., Zimbardi, F., Cardinale, M., Cardinale, G., Braccio, G., Gambacorta, E. (2008):** Processing cereal straws by steam explosion in a pilot plant to enhance digestibility in ruminants. *Bioresource Technology* 99 (2008), S. 681-689
- Vogelsang (o.J.a):** RotaCut. Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH.  
<https://www.vogelsang.info/de/produkte/zerkleinerer-und-separatoren/zerkleinerer/rotacut/> (04.06.2018)
- Vogelsang (o.J.b):** Elektrokinetische Desintegration mit BioCrack. Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH.  
<https://www.vogelsang.info/de/produkte/desintegration/biocrack/> (04.06.2018)
- Vogelsang (2014):** Zukunftsweisende Biogas-Produktion – Maschinen und Systeme für die Pump-, Zerkleinerungs- und Einbringtechnik. Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH. Prospekt. 2014  
[https://www.vogelsang.info/fileadmin/Cumulus/products/all\\_brochures/market-brochure-biogas-de-3761.pdf](https://www.vogelsang.info/fileadmin/Cumulus/products/all_brochures/market-brochure-biogas-de-3761.pdf) (04.06.2018)
- Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J., Jones, D.L. (2008):** Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology* 99 (2008), S. 7928-7940
- Wartell, B.A., Krumins, V., Alt, J., Kang, K., Schwab, B.J., Fennell, D.E. (2012):** Methane production from horse manure and stall waste with softwood bedding. *Bioresource Technology*, 112 (2012), S. 42-50
- Weber, A. (2012):** Gas geben in Biogasanlagen. *Schüttgut* Nr. 2-2012, S. 46-47
- Weber Entec (o.J.):** Ultraschall-desintegration. Weber Entec GmbH & Co. KG.  
<https://www.weber-entec.com/ueber-ultraschall/> (04.06.2018)
- Weißbach, F. (2008):** Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. *Landtechnik* Bd. 63 Nr.6 (2008), S. 356-358
- Wetter, C., Brüggling, E., Kerkerling, M. (2012):** Energieland BIORES - Projektteil IIA. Schlussbericht. INTERREG-Programm Deutschland-Niederland. 2012

- Wetter, C., Brüggling, E., Baumkötter, D., Boles, E., Dietz, H., Senn, T., Buck, M. (2013):** Optimierung der regionalen Bioalkoholherstellung aus biogenen Reststoffen (RE<sub>2</sub>ALKO). Schlussbericht. FKZ: 03KB025. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Münster, Frankfurt, Stuttgart. 2013
- Wetter, C., Brüggling, E., Baumkötter, D., Laan, H., Wanink, F. (2015):** Mechanische und enzymatische Vorbehandlung von organischen Reststoffen zur Optimierung der Gasausbeute. Schlussbericht. GreenGas-Teilprojekt. INTERREG-Programm Deutschland-Niederland. 2015
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2008):** Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung. ISBN 978-3-936191-21-9. Berlin. 2008
- Xergi (o.J.):** X-chopper. Xergi A/S. Prospekt
- Xergi (2015):** X-chopper presentation. Xergi A/S. veröffentlicht am 17.03.2015.  
<https://www.youtube.com/watch?v=tVd9LG8P-RM&feature=youtu.be> (04.06.2018)
- Zauner, E. und Küntzel, U. (1986):** Methane production from ensiled plant material. Biomass 10 (1986), S. 207-223.
- Zeller, V., Weiser, C., Hennenberg, K., Reinicke, F., Schaubach, K., Thrän, D., Vetter, A., Wagner, B. . (2011):** Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiegewinnung. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms Energetische Biomassenutzung. Band 02. ISSN 2192-1806. Deutsches BiomasseForschungszentrum (DBFZ). Leipzig. 2011
- Zeyn (o.J.):** Doppstadt AK 430 im Einsatz. Lohnunternehmen Zeyn.  
[http://www.zeyn.de/downloads/ZEYN\\_KG\\_Biogas-Substrat-Zerkleinerung.pdf](http://www.zeyn.de/downloads/ZEYN_KG_Biogas-Substrat-Zerkleinerung.pdf) (04.06.2018)
- Zhang, Y. and Banks, C.J. (2013):** Impact of different particle size distributions on anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. Waste Management 33 (2013), S. 297-307
- Zimbardi, F., Viola, E., Nanna, F., Larocca, E., Cardinale, M., Barisano, D. (2007):** Acid impregnation and steam explosion of corn stover in batch processes. Industrial Crops and Products 26 (2007), S. 195-206

## 10.2 Abbildungsverzeichnis

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 2-1:  | Struktur von Lignocellulose [RUBIN 2008]  | 5  |
| Abbildung 2-2:  | Übersicht von Techniken zur Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Substrate [nach SCHUMACHER ET AL. 2012]  | 10 |
| Abbildung 2-3:  | Schematische Darstellung einer Schneidmühle [IGNATOWITZ 1997]   | 12 |
| Abbildung 2-4:  | Schematische Darstellung einer Prallmühle [IGNATOWITZ 1997]   | 13 |
| Abbildung 2-5:  | Rotacrex von PlanET   | 16 |
| Abbildung 2-6:  | Limator der Fa. Lindner [LINDNER O.J.]  | 18 |
| Abbildung 2-7:  | Querstromzerspaner der Fa. MeWa (links) und der Fa. Xergi (rechts) [XERGI 2015]   | 19 |
| Abbildung 2-8:  | Prallzerkleinerer HPZ 1200 (links) und HPZ 900 (rechts) der Fa. Huning [HUNING O.J.a]   | 19 |
| Abbildung 2-9:  | Biogrinder der Fa. BHS Sonthofen [BHS-SONTHOFEN 2014b]  | 21 |
| Abbildung 2-10: | Mobile Hammermühle AK 510 BioPower der Fa. Doppstadt [DOPPSTADT O.J.]   | 22 |
| Abbildung 2-11: | Blick auf die Schnecken des Laborextruders der FH Münster von der Fa. Lehmann UMT GmbH  | 24 |
| Abbildung 2-12: | RotaCut der Fa. Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH als Beispiel für einen Mazerator [VOGELSANG O.J.a]   | 26 |
| Abbildung 2-13: | Unihacker (links) und Rotorrechen (rechts) der Fa. Börger GmbH [BÖRGER O.J.b, BÖRGER O.J.c]   | 27 |
| Abbildung 2-14: | Gorator der Fa. hoelschertechnik-gorator GmbH & Co. KG (links) [PLANET O.J.] und Kreis-Dissolver der Fa. Wilhelm Niemann GmbH & Co. (rechts) [NIEMANN O.J.] | 28 |
| Abbildung 2-15: | Kugelmühle der Fa. Geisberger Gesellschaft für Energieoptimierung mbH   | 30 |
| Abbildung 2-16: | Maissilagehydrolysat nach Dampfvorbehandlung [DIETZ UND BOLES 2013]   | 32 |
| Abbildung 2-17: | Effekte der Behandlung von Biomasse bei unterschiedlichen Temperaturen [SCHWARZ 2011]   | 32 |
| Abbildung 2-18: | Weizenstrohydrolysat nach Vorbehandlung mit konzentrierter Salzsäure [DIETZ UND BOLES 2013]   | 35 |
| Abbildung 2-19: | BioCrack der Fa. Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH [VOGELSANG O.J.b]   | 38 |

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 3-1:  | Schlegelmulcher Biochipper der Fa. BioG Biogastechnik GmbH<br>[EDER UND FLESCHHUT 2014]   | 51 |
| Abbildung 4-1:  | Außenansicht des Prallreaktors  | 58 |
| Abbildung 4-2:  | Innenansicht des Prallraums   | 58 |
| Abbildung 4-3:  | Darstellung der drei Rotoren 60°, 75° und 90° (von links nach rechts)<br>mit den passenden Prallelementen   | 59 |
| Abbildung 4-4:  | Draufsicht des Prallraums   | 60 |
| Abbildung 4-5:  | Genutete Prallelemente für 60°-Rotor  | 60 |
| Abbildung 4-6:  | Siebe mit rechteckigen Öffnungen: 20 mm Höhe (links) und 50 mm<br>(rechts)  | 61 |
| Abbildung 4-7:  | Prallreaktor mit installierter Umluft   | 63 |
| Abbildung 4-8:  | Förderbandgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Frequenz  | 65 |
| Abbildung 4-9:  | Aufgabemenge in Abhängigkeit von Durchsatz und<br>Bandgeschwindigkeit   | 66 |
| Abbildung 4-10: | Versuchsaufbau für einen Zerkleinerungsversuch mit Maisstroh  | 66 |
| Abbildung 4-11: | Teilweise mit Triticalestroh verstopftes rechteckiges Sieb (links) und<br>mit Hafer-Ganzpflanzensilage verstopftes quadratisches 20 mm Sieb<br>(rechts)           | 67 |
| Abbildung 5-1:  | Mit der Substratmischung verstopfte Siebe   | 70 |
| Abbildung 5-2:  | Untersuchte Substrate vor und nach der Zerkleinerung mit dem<br>Prallreaktor  | 71 |
| Abbildung 5-3:  | Verwendete Vibrationssiebmaschine AS 200 Control der Fa. Retsch   | 73 |
| Abbildung 5-4:  | Ergebnis einer Siebanalyse von gepralltem Triticalestroh anhand der<br>beladenen Siebböden  | 76 |
| Abbildung 5-5:  | Beispieldiagramm einer geprallten Triticalestrohprobe zur<br>Ergebnisdarstellung einer Analysensiebung (Trockensiebung) als<br>Kornverteilung und Durchgangssumme | 76 |
| Abbildung 5-6:  | Beispieldiagramm für eine modale Verteilung einer geprallten<br>Triticalestrohprobe (Trockensiebung)  | 77 |
| Abbildung 5-7:  | Kornverteilungs- und Durchgangssummendiagramm für<br>unbehandeltes Triticalestroh (Trockensiebung)  | 78 |
| Abbildung 5-8:  | Kornverteilungsdiagramm für über 5, 10 und 20 mm Sieb<br>zerkleinertes Triticalestroh (Trockensiebung)  | 79 |

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 5-9:  | Kornverteilungsdiagramm für Triticalestroh bei verschiedenen Durchsätzen (Trockensiebung)  | 79 |
| Abbildung 5-10: | Auswertung der mittleren Partikelgröße aus den Siebanalysen für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz (Trockensiebung)  | 80 |
| Abbildung 5-11: | Auswertung der mittleren Partikelgröße aus den Siebanalysen für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz (Einstellung: 20 mm Sieb - Erläuterung Legende: Anstellwinkel Rotor, Abstand Rotor zu Siebmitte, Drehzahl - Trockensiebung) | 81 |
| Abbildung 5-12: | Auswertung der mittleren Partikelgröße aus den Siebanalysen für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Siebabstand (Einstellung: 100 kg/h Durchsatz - Trockensiebung)  | 82 |
| Abbildung 5-13: | Vergleich der drei genormten Verteilungsfunktionen (nach STIEB 2009)   | 83 |
| Abbildung 5-14: | Beispiel einer RRSB-Verteilungsfunktion für gepralltes Triticalestroh (Trockensiebung)   | 84 |
| Abbildung 5-15: | Ergebnis der Siebanalysen (Trockensiebung) für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz hinsichtlich der Steigung $n$  | 85 |
| Abbildung 5-16: | Ergebnis der Siebanalysen (Trockensiebung) für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz hinsichtlich dem Lageparameter $x'$  | 85 |
| Abbildung 5-17: | Ergebnis der Siebanalysen (Trockensiebung) für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz hinsichtlich dem Lageparameter $x'$ beim 20 mm Sieb (Erläuterung Legende: Anstellwinkel Rotor, Abstand Rotor zu Siebmitte, Drehzahl)         | 86 |
| Abbildung 5-18: | Ergebnis der Siebanalysen (Trockensiebung) für Triticalestroh in Abhängigkeit vom Siebabstand hinsichtlich dem Lageparameter $x'$ bei einem Durchsatz von 100 kg/h   | 87 |
| Abbildung 5-19: | Ergebnis der Siebanalysen (Trockensiebung) für Triticalestroh aus der zweiten Versuchsreihe  | 88 |
| Abbildung 5-20: | Ergebnis der Siebanalysen (Trockensiebung) für Maisstroh (Drehzahl: 1.500 U/min)   | 89 |
| Abbildung 5-21: | Ergebnis der Siebanalysen (Nasssiebung) für Hafer-Ganzpflanzensilage   | 90 |
| Abbildung 5-22: | Ergebnis der Siebanalysen (Nasssiebung) für Pferdemist   | 90 |
| Abbildung 5-23: | Eudiometer-Versuchsstand zur Biogaspotenzialbestimmung   | 92 |

|                 |  |     |
|-----------------|--|-----|
| Abbildung 5-24: | Gasbildungskurven für den oTR-spezifischen Methanertrag von unbehandeltem und gepralltem Triticalestroh                                      | 93  |
| Abbildung 5-25: | oTR-spezifischer Methanertrag von gepralltem Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz (Einstellungen: 60°-Rotor, 53 mm Siebabstand)      | 94  |
| Abbildung 5-26: | oTR-spezifischer Methanertrag von gepralltem Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz (Einstellungen: 20 mm Sieb, 2.000 U/min)           | 95  |
| Abbildung 5-27: | oTR-spezifischer Methanertrag von gepralltem Triticalestroh in Abhängigkeit vom Siebabstand (Einstellung: 100 kg/h Durchsatz)                | 96  |
| Abbildung 5-28: | oTR-spezifischer Methanertrag von gepralltem Triticalestroh der zweiten Versuchsreihe  | 96  |
| Abbildung 5-29: | Gasbildungskurven für den oTR-spezifischen Methanertrag von unbehandelter und geprallter Hafer-Ganzpflanzensilage                            | 97  |
| Abbildung 5-30: | oTR-spezifischer Methanertrag von gepralltem Hafer-GPS in Abhängigkeit vom Durchsatz (Einstellung: rechteckiges Sieb mit 50 mm Maschenweite) | 98  |
| Abbildung 5-31: | oTR-spezifischer Methanertrag von geprallter Hafer-Ganzpflanzensilage (Einstellung: rechteckiges Sieb mit 50 mm Maschenweite)                | 99  |
| Abbildung 5-32: | Gasbildungskurven für den oTR-spezifischen Methanertrag von unbehandeltem und gepralltem Maisstroh   | 99  |
| Abbildung 5-33: | oTR-spezifischer Methanertrag von gepralltem Maisstroh (Einstellung: 1.500 U/min)  | 100 |
| Abbildung 5-34: | oTR-spezifischer Methanertrag von gepralltem Pferdemist (Einstellung: rechteckiges Sieb mit 50 mm Maschenweite)                              | 101 |
| Abbildung 5-35: | Mobiles Strommessgerät Fluke 435 Power Quality Analyzer (links) und Messpunkt Frequenzumrichter (rechts)                                     | 102 |
| Abbildung 5-36: | Beispiel-Diagramm zur Bestimmung des spezifischen Stromverbrauchs  | 103 |
| Abbildung 5-37: | Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 90°-Rotor, 2 mm Siebabstand)                  | 104 |
| Abbildung 5-38: | Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 10 mm Sieb, 2.500 U/min)                      | 105 |

|                 |  |     |
|-----------------|--|-----|
| Abbildung 5-39: | Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 1.500 U/min)  | 106 |
| Abbildung 5-40: | Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Siebabstand bei Triticalestroh (Einstellungen: 100 kg/h Durchsatz)   | 107 |
| Abbildung 5-41: | Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Siebabstand bei Triticalestroh (Einstellungen: 5 mm Sieb)  | 107 |
| Abbildung 5-42: | Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Hafer-GPS (Einstellungen: 1.500 U/min)   | 109 |
| Abbildung 5-43: | Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Siebabstand bei Hafer-GPS für ausgewählte Durchsätze   | 110 |
| Abbildung 5-44: | Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch für Triticalestroh  | 112 |
| Abbildung 5-45: | Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch für Hafer-Ganzpflanzensilage  | 113 |
| Abbildung 5-46: | Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch für Maisstroh (Einstellung: 1.500 U/min)  | 114 |
| Abbildung 5-47: | Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch für Pferdemist (Einstellung: 50 mm RE Sieb)   | 115 |
| Abbildung 5-48: | Prallreaktor an der Biogasanlage Sehanö  | 117 |
| Abbildung 5-49: | Siebplatten des Prallreaktors der Biogasanlage Sehanö  | 117 |
| Abbildung 5-50: | Prallraum des Prallreaktors der Biogasanlage Sehanö  | 118 |
| Abbildung 5-51: | Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch für eine Substratmischung (53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist)  | 120 |
| Abbildung 5-52: | Ergebnis der Siebanalysen für eine Substratmischung (53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist)   | 121 |
| Abbildung 5-53: | oTR-spezifischer Biogas- und Methanertrag der gepralltem Substratmischung (53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist)   | 122 |
| Abbildung 5-54: | Versuchsaufbau Extruder  | 123 |
| Abbildung 5-55: | Pferdemist vor (links) und nach (rechts) Extrusion   | 123 |
| Abbildung 5-56: | Ergebnisse zum spezifischen Stromverbrauch bei der Vorbehandlung mit dem Extruder (ohne Berücksichtigung der Wasserzugabe; Substratmischung: 53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist) | 125 |

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| Abbildung 5-57: | Spezifischer Stromverbrauch Extruder in Abhängigkeit vom Durchsatz (ohne Berücksichtigung der Wasserzugabe; Substratmischung: 53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist) | 127 |
| Abbildung 5-58: | Logarithmische Darstellung mit Trendlinie des spezifischen Stromverbrauchs in Abhängigkeit vom Durchsatz beim Extruder (ohne Berücksichtigung der Wasserzugabe)                           | 127 |
| Abbildung 5-59: | Ergebnis der Siebanalysen der extrudierten Proben (Substratmischung: 53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist)  | 128 |
| Abbildung 5-60: | oTR-spezifischer Methanertrag der extrudierten Proben (Substratmischung: 53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist)  | 129 |
| Abbildung 6-1:  | Energiebilanz für Triticalestroh  | 131 |
| Abbildung 6-2:  | Energiebilanz für Hafer-Ganzpflanzensilage  | 131 |
| Abbildung 6-3:  | Energiebilanz für Maisstroh (Drehzahl: 1.500 U/min)   | 132 |
| Abbildung 6-4:  | Energiebilanz für Pferdemist  | 133 |
| Abbildung 6-5:  | Energiebilanz für eine Substratmischung (53 % Grassilage, 40 % Silomais, 7 % Rinder- und Pferdemist; Drehzahl: 1.500 U/min)   | 134 |
| Abbildung 6-6:  | Vergleich von mittlerer Partikelgröße und spezifischem Stromverbrauch für Triticalestroh  | 135 |
| Abbildung 6-7:  | Vergleich von mittlerer Partikelgröße und oTR-spezifischem Methanertrag für Triticalestroh  | 136 |
| Abbildung 6-8:  | Vergleich von mittlerer Partikelgröße und oTR-spezifischem Methanertrag für Pferdemist  | 136 |
| Abbildung 6-9:  | Spezifische Kosten der Vorbehandlung in Abhängigkeit der täglich zerkleinerten Substratmenge am Beispiel der Biogasanlage Sehan   | 139 |
| Abbildung 6-10: | Jährlichen Kosten der Vorbehandlung für die untersuchten Substrate  | 143 |
| Abbildung 6-11: | Spezifische Kosten der Vorbehandlung in Abhängigkeit der täglich zerkleinerten Substratmenge  | 143 |

### 10.3 Tabellenverzeichnis

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Tabelle 2-1: | Überblick der von Firmen angegebenen Effekte von Desintegrationsverfahren für den Substrataufschluss bei Biogasanlagen [SCHEFTELOWITZ ET AL. 2013] | 7   |
| Tabelle 2-2: | Prallmühlen zur Vorbehandlung fester Substrate   | 15  |
| Tabelle 2-3: | Prozessbedingungen bei thermodruckmechanischen Vorbehandlungsversuchen aus der Literatur [nach LINDORFER ET. AL 2010]                              | 33  |
| Tabelle 2-4: | Vor- und Nachteile verschiedener Methoden zur Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Biomasse [nach ALVIRA ET AL. 2010]                              | 41  |
| Tabelle 2-5: | Kenndaten der betrachteten stationären Prallmühlen   | 42  |
| Tabelle 2-6: | Bandbreite der konstruktiven Gestaltungsmerkmale der Prallmühlen für Biogassubstrate und Vergleich mit der Versuchsanlage Prallreaktor             | 44  |
| Tabelle 3-1: | Landwirtschaftliche Flächennutzung und Anfall von Ernterestmengen in Deutschland für das Jahr 2014 [DESTATIS 2014, DÜV 2017]                       | 47  |
| Tabelle 3-2: | Anfall und technisches Potenzial von Festmist in Deutschland   | 54  |
| Tabelle 3-3: | Zusammenfassung der technischen Reststoffpotenziale und Methanerträge sowie daraus resultierende Potenziale an installierter elektrischer Leistung | 55  |
| Tabelle 4-1: | Übersicht der Einstellungsvarianten beim Rotor   | 59  |
| Tabelle 5-1: | Gehalte an Trockenrückstand und organischem Anteil des Trockenrückstandes der untersuchten Substrate   | 72  |
| Tabelle 5-2: | Übersicht Siebbodenkonfiguration für Analysensiebung   | 75  |
| Tabelle 5-3: | Vergleich der Ergebnisse aus den Zerkleinerungsversuchen von zwei Stroharten anhand einer Einstellung am Prallreaktor                              | 108 |
| Tabelle 5-4: | Einstellungen für die Zerkleinerung von Triticalestroh   | 112 |
| Tabelle 5-5: | Ergebnisse der Untersuchungen am Prallreaktor der Biogasanlage Sehan   | 119 |
| Tabelle 5-6: | Eingewogene Mengen und Trockenrückstandsgehalte  | 124 |
| Tabelle 5-7: | Ergebnisse der Versuche mit dem Extruder (bezogen auf die Substratmenge ohne Wasserzugabe)   | 124 |
| Tabelle 5-8: | oTR-spezifischer Durchsatz und Stromverbrauch der Versuche mit dem Extruder  | 126 |

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Tabelle 6-1: | Kosten der Vorbehandlung am Beispiel der Biogasanlage Sehan  | 138 |
| Tabelle 6-2: | Spezifische Kosten der Vorbehandlung am Beispiel der Biogasanlage Sehan  | 138 |
| Tabelle 6-3: | Ökonomische Bilanzierung der mechanischen Vorbehandlung mit dem Ziel der Steigerung des Biogasertrags                      | 140 |
| Tabelle 6-4: | Übersicht der optimalen Einstellungen, Stromverbrauch und Methanertrag   | 141 |
| Tabelle 6-5: | Berechnung der Substratmengen für eine 500 kW <sub>el</sub> Biogasanlage [KTBL 2013]                                       | 141 |
| Tabelle 6-6: | Berechnung der jeweiligen Substratmengen zum Ersatz der Hälfte des bisher nötigen Silomaisanteils von 12,3 t <sub>FM</sub> | 141 |
| Tabelle 6-7: | Spezifische Kosten der Vorbehandlung für die untersuchten Substrate  | 142 |
| Tabelle 6-8: | Maximale Bereitstellungskosten für die Alternativsubstrate zum Ersatz von Silomais (frei Fermenter)                        | 144 |

#### 10.4 Formelverzeichnis

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Formel 5-1: | Beschränkung der Nennöffnungsweite des obersten Siebes [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1987] | 74 |
| Formel 5-2: | RRSB-Verteilungsfunktion der Durchgangssumme [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1976]           | 83 |
| Formel 5-3: | Umgeformte RRSB-Verteilungsfunktion [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1976]                    | 83 |

## 10.5 Abkürzungsverzeichnis

|            |   |
|------------|---|
| BHKW       | Blockheizkraftwerk  |
| CCM        | Corn-Cob-Mix (Mais Korn-Spindel-Gemisch)  |
| DBFZ       | Deutsches Biomasseforschungszentrum   |
| DIN        | Deutsches Institut für Normung  |
| DüV        | Düngeverordnung   |
| EEG        | Erneuerbare-Energien-Gesetz   |
| el         | elektrisch  |
| EN         | Europäische Norm  |
| FM         | Frischmasse   |
| GPS        | Ganzpflanzensilage  |
| HBT        | Hohenheimer Biogasertragstest   |
| HNV        | Haupternteprodukt-Nebenernteprodukt-Verhältnis  |
| ISO        | Internationale Organisation für Normung   |
| KTBL       | Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft   |
| LfL        | Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft   |
| oTM        | organischer Anteil der Trockenmasse   |
| oTR        | organischer Anteil des Trockenrückstands  |
| oTS        | organischer Anteil der Trockensubstanz  |
| RRSB       | Rosin, Rammler, Sperling, Bennet  |
| Sehano-Mix | Substratmischung der Biogasanlage Sehano (53 % Grassilage, 40 % Maissilage und 7 % Rinder- und Pferdemit) |
| SPS        | Speicherprogrammierbare Steuerung   |
| TM         | Trockenmasse  |
| TR         | Trockenrückstand  |
| TS         | Trockensubstanz   |
| UN         | United Nations  |
| UNFCCC     | United Nations Framework Convention on Climate Change   |
| VDI        | Verein Deutscher Ingenieure   |
| VDLUFA     | Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V.                        |
| WBGU       | Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen                                 |

---

## ANHANG

---

## **VERZEICHNIS DER ANHÄNGE**

Anhang 1: Mittlere Partikelgröße von gepalltem Triticalestroh

Anhang 2: Lageparameter  $x'$  von gepalltem Triticalestroh

Anhang 3: Ergebnisse zum Methanertrag von Triticalestroh

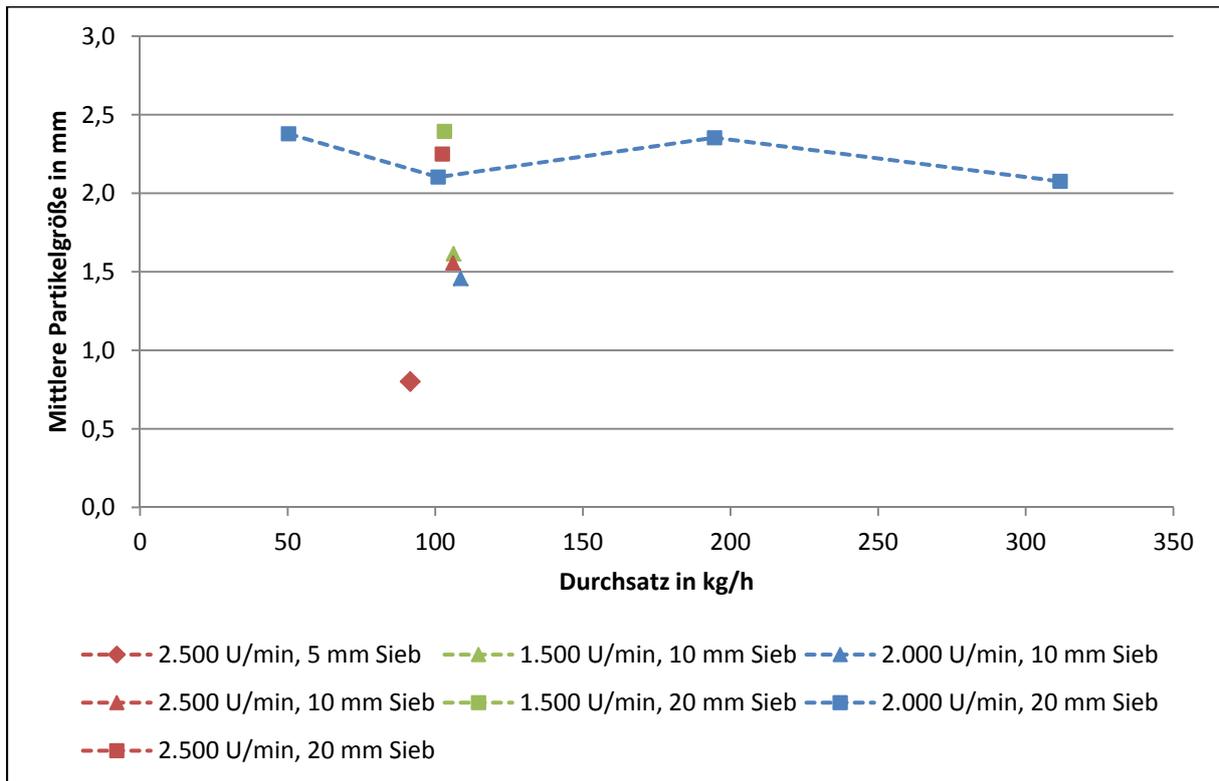
Anhang 4: Ergebnisse zum Stromverbrauch bei Triticalestroh

Anhang 5: Ergebnisse zum Stromverbrauch bei Hafer-GPS

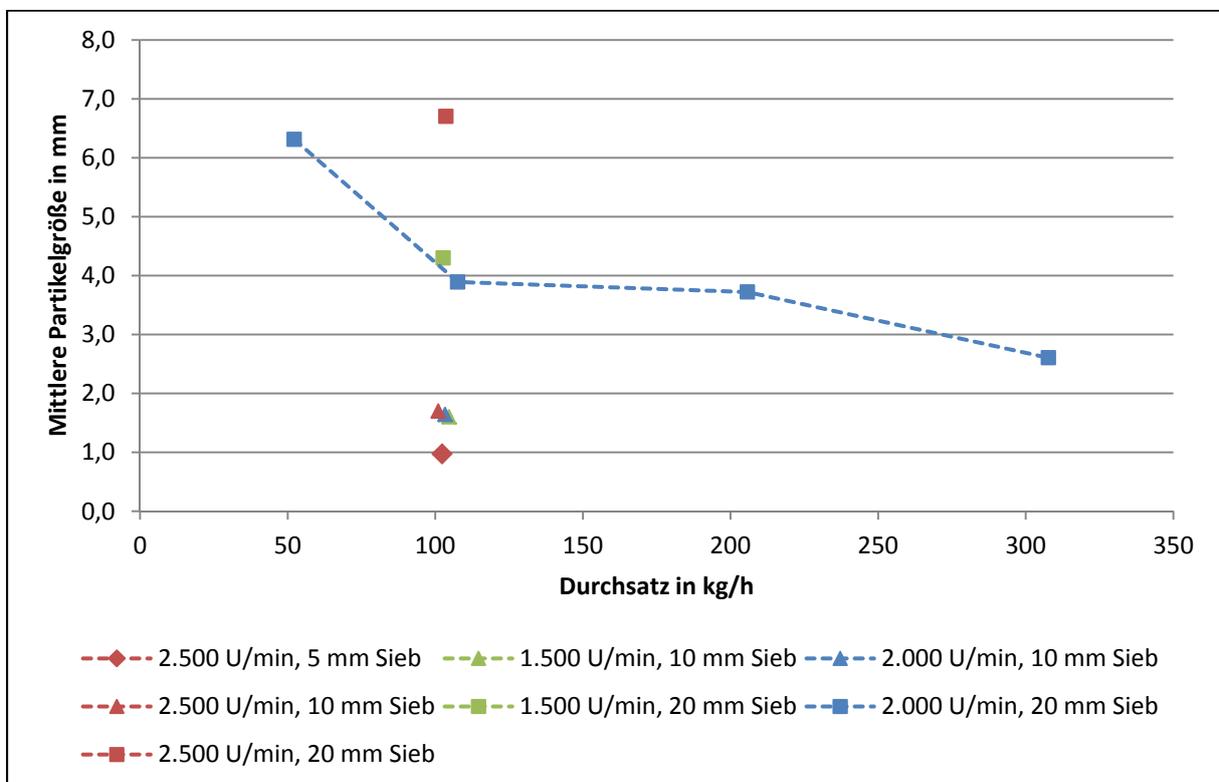
Anhang 6: Vergleich Partikelgröße und Stromverbrauch

Anhang 7: Vergleich Partikelgröße zu Methanertrag

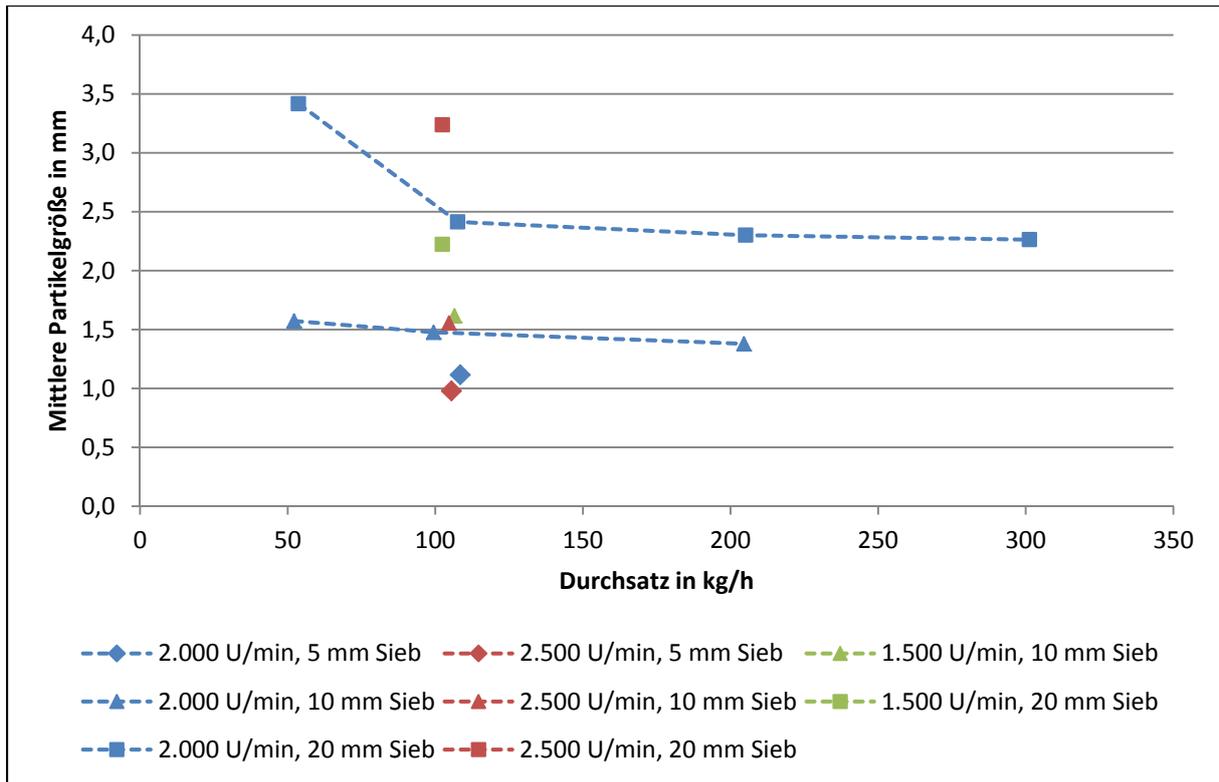
## ANHANG 1: MITTLERE PARTIKELGRÖÖE VON GEPRALLTEM TRITICALESTROH



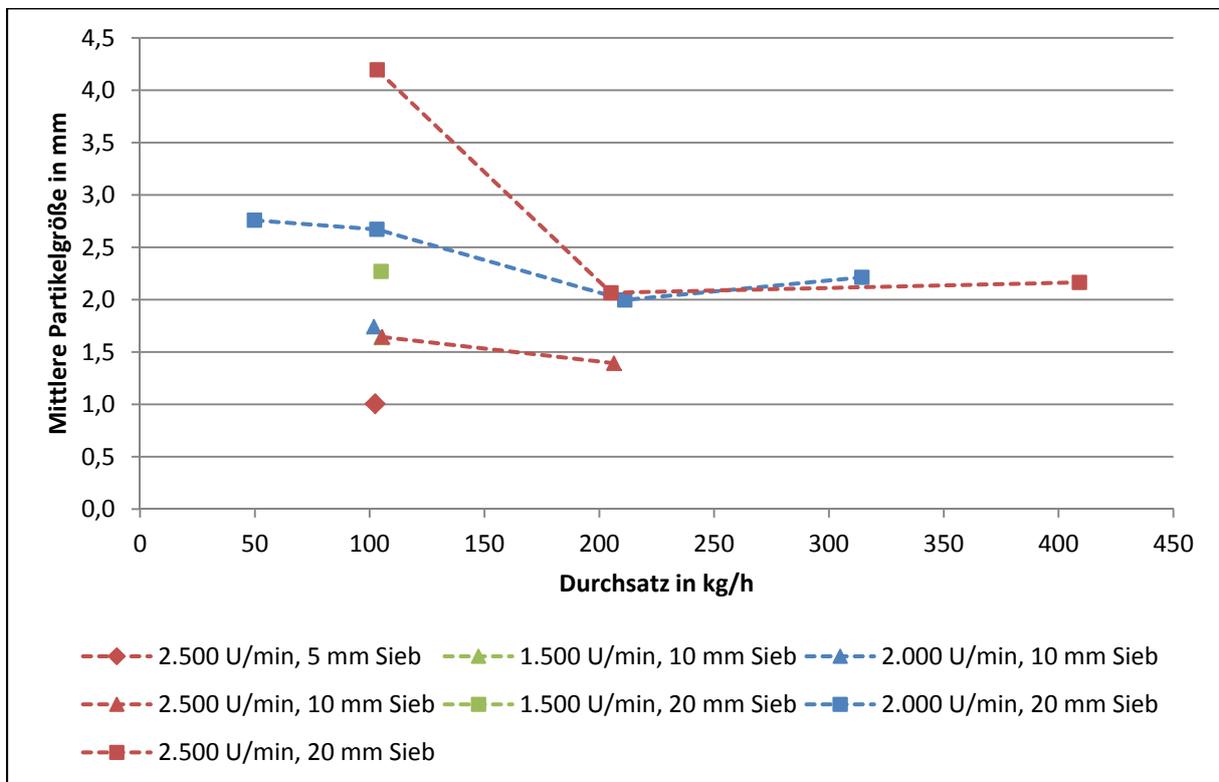
Anhang 1-1: Mittlere Partikelgröße in Abhängigkeit vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 90° Rotor, 2 mm Siebabstand; Trockensiebung)



Anhang 1-2: Mittlere Partikelgröße in Abhängigkeit vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 60° Rotor, 8 mm Siebabstand; Trockensiebung)

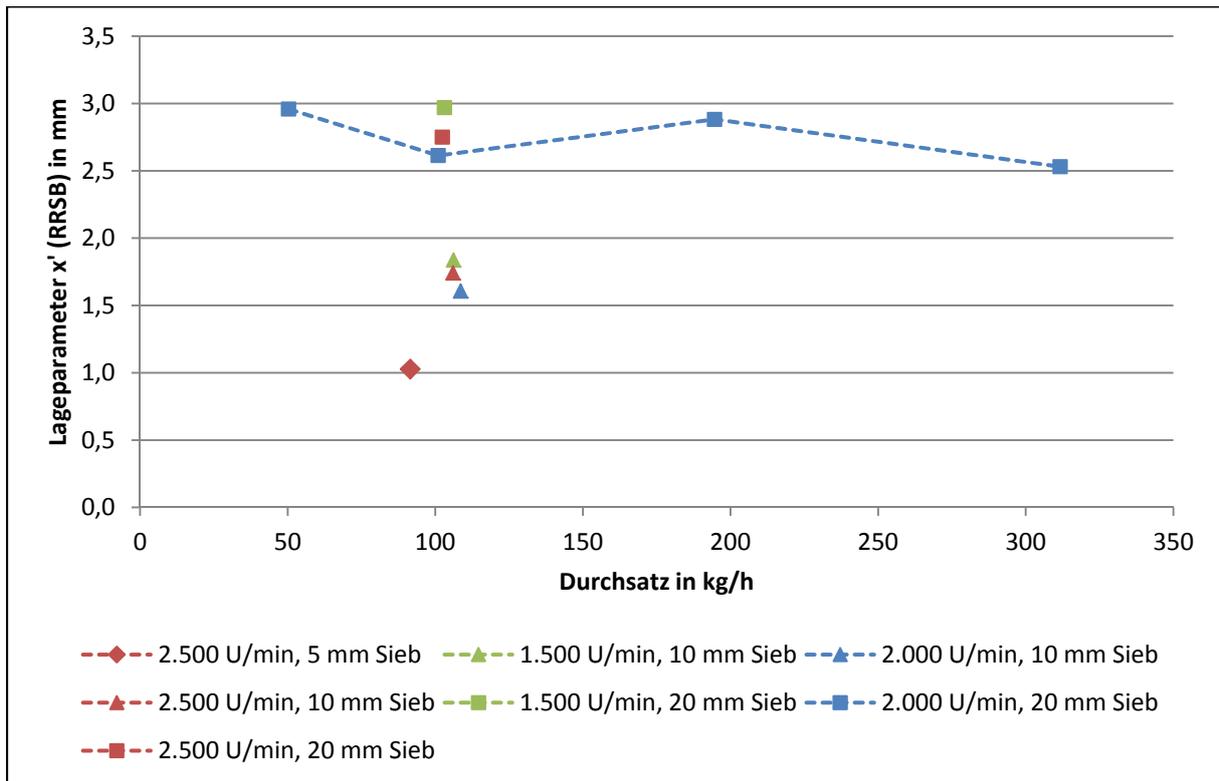


Anhang 1-3: Mittlere Partikelgröße in Abhängigkeit vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 90° Rotor, 32 mm Siebabstand; Trockensiebung)

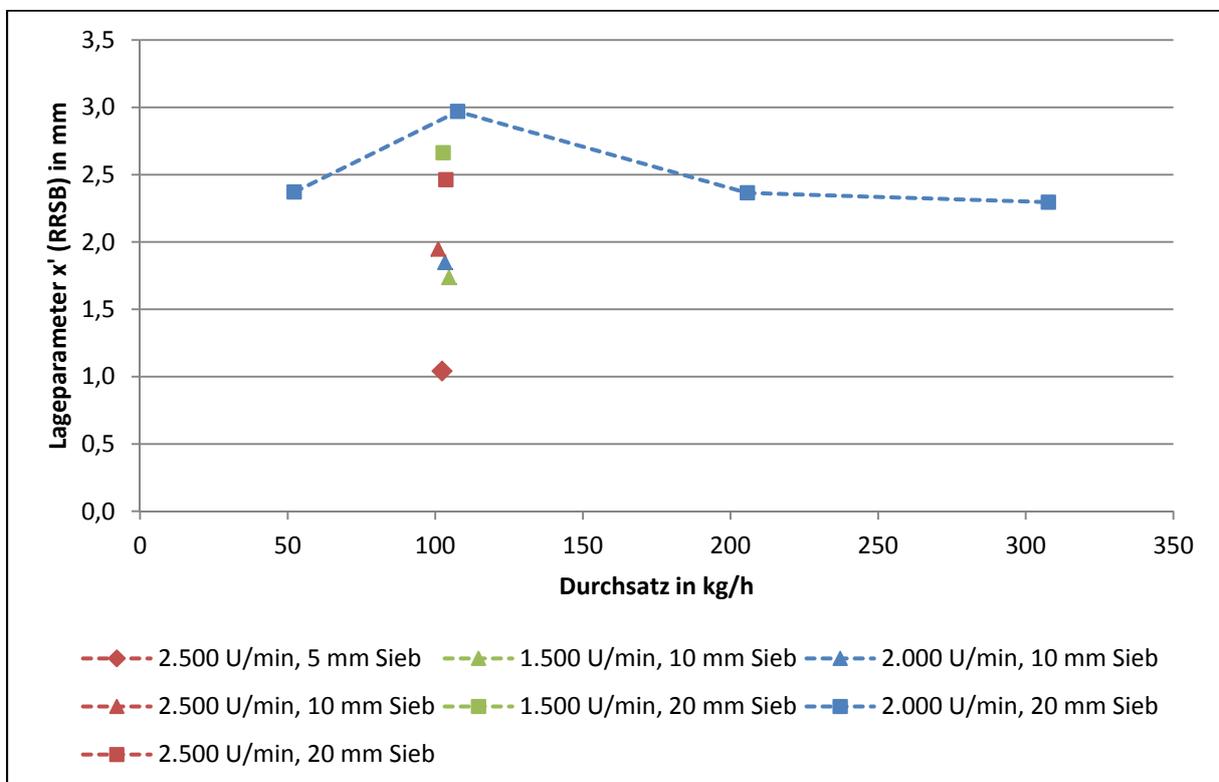


Anhang 1-4: Mittlere Partikelgröße in Abhängigkeit vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 60° Rotor, 53 mm Siebabstand; Trockensiebung)

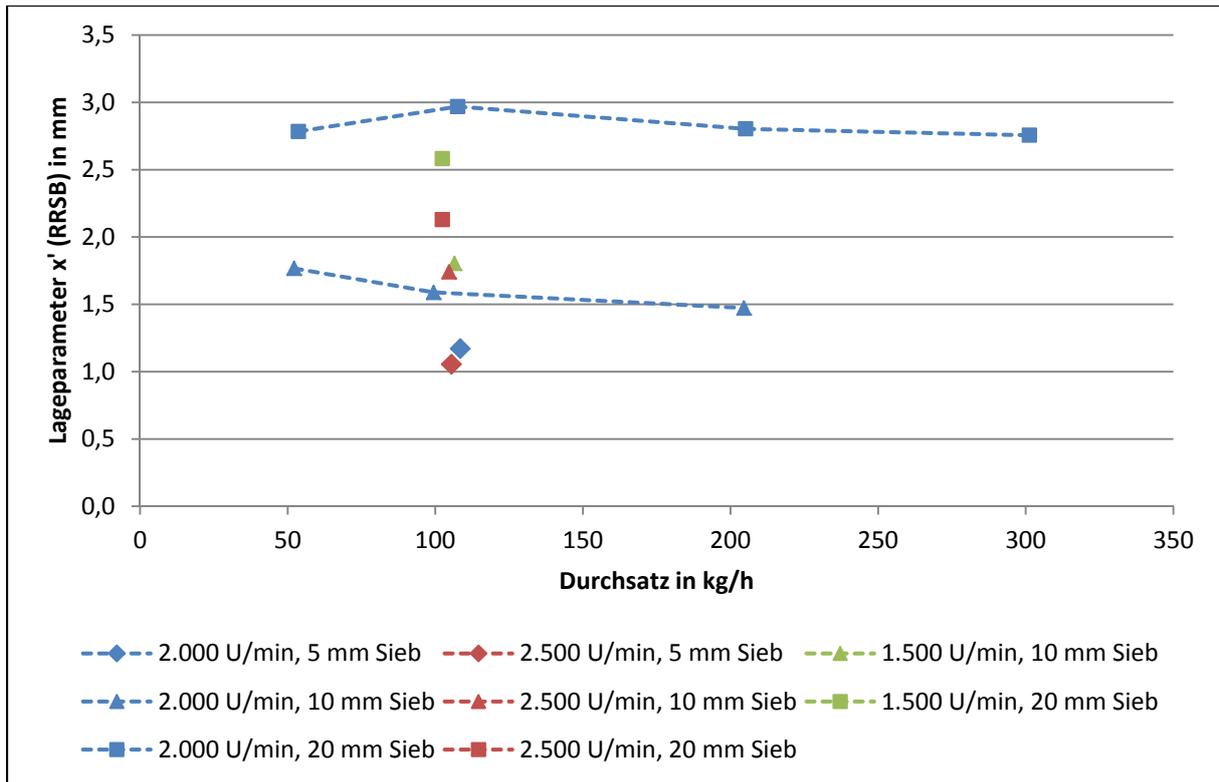
## ANHANG 2: LAGEPARAMETER $x'$ VON GEPRALLTEM TRITICALESTROH



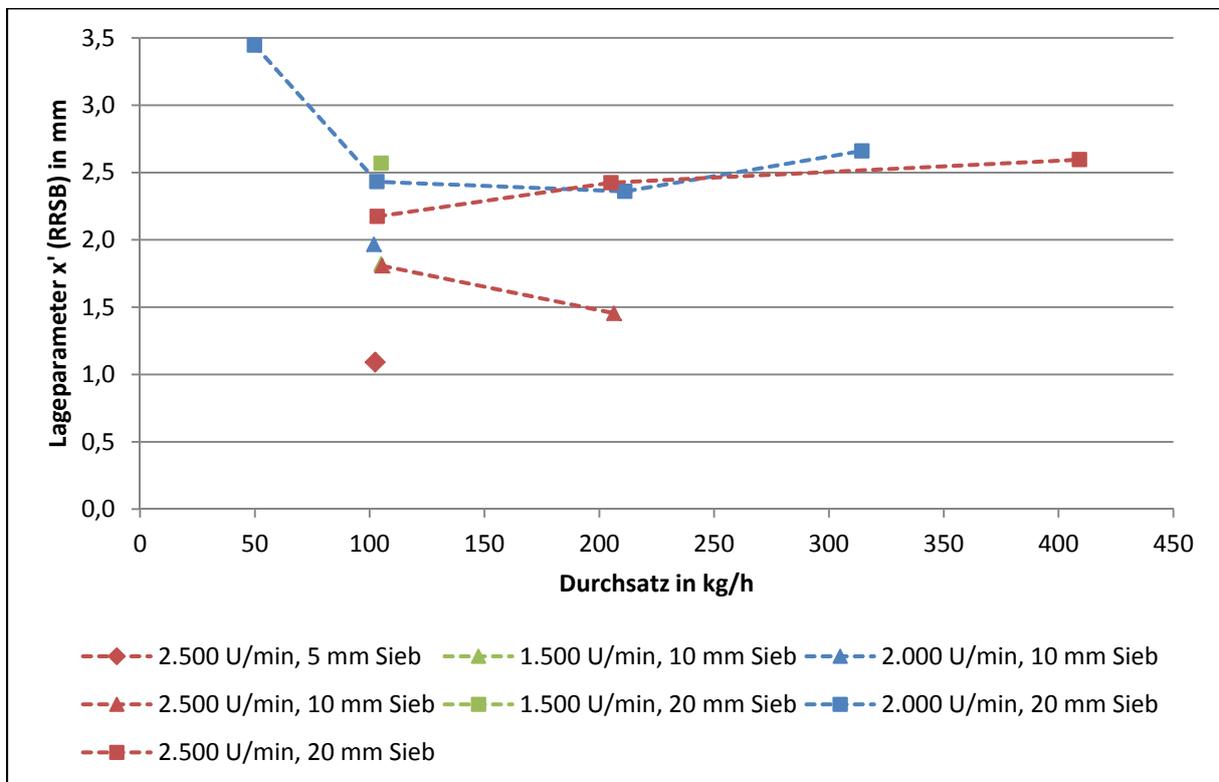
Anhang 2-1: Lageparameter  $x'$  in Abhängigkeit vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 90° Rotor, 2 mm Siebabstand; Trockensiebung)



Anhang 2-2: Lageparameter  $x'$  in Abhängigkeit vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 60° Rotor, 8 mm Siebabstand; Trockensiebung)

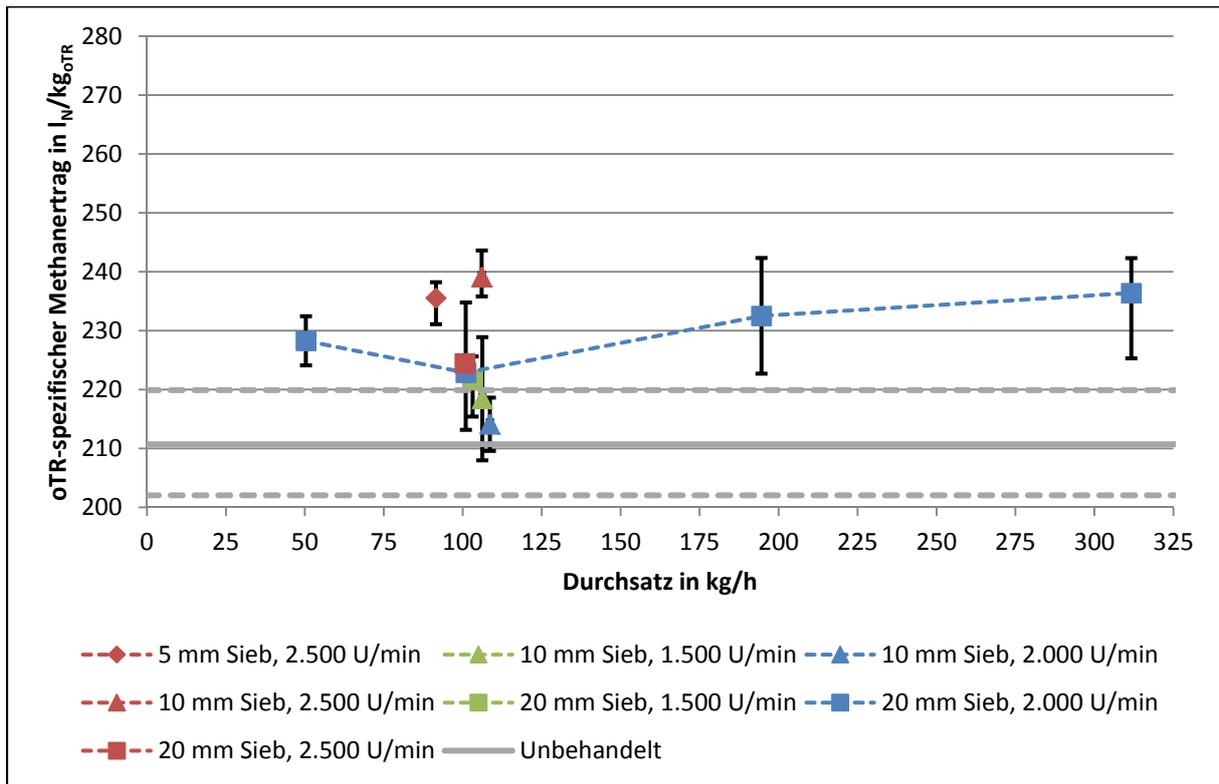


Anhang 2-3: Lageparameter  $x'$  in Abhängigkeit vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 90° Rotor, 32 mm Siebabstand; Trockensiebung)

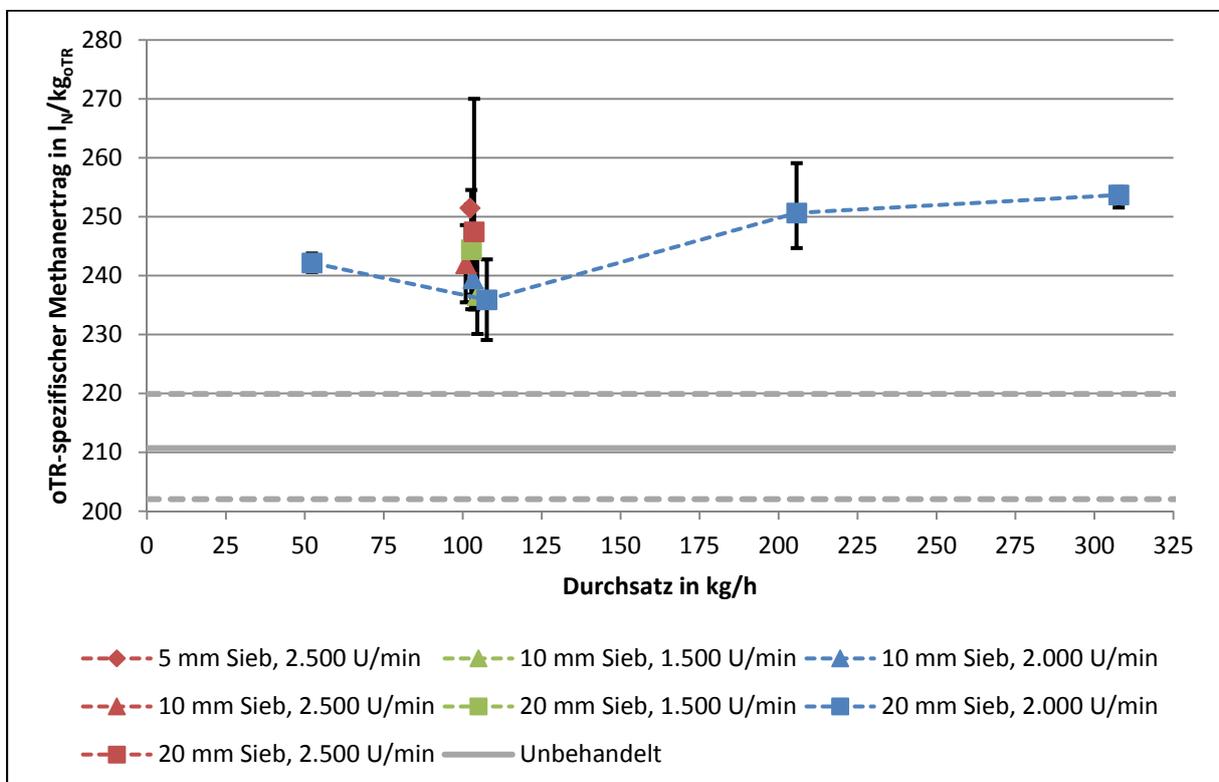


Anhang 2-4: Lageparameter  $x'$  in Abhängigkeit vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 60° Rotor, 53 mm Siebabstand; Trockensiebung)

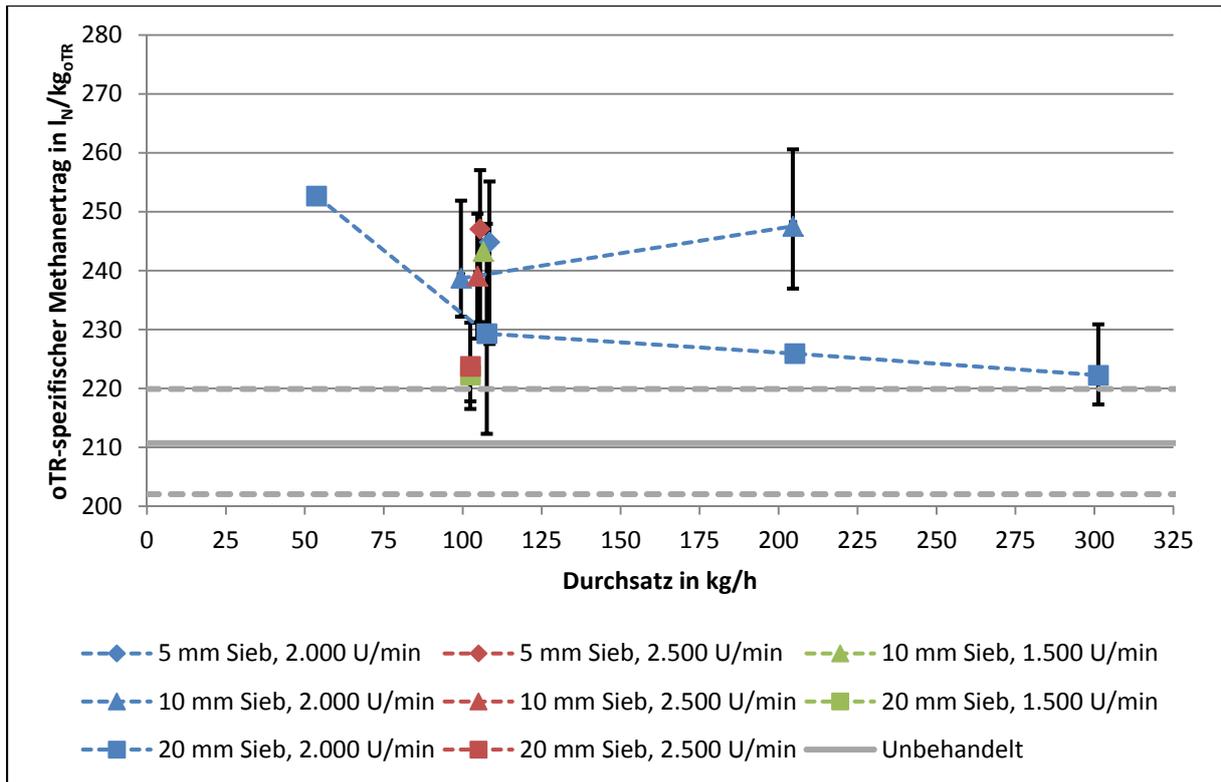
### ANHANG 3: ERGEBNISSE ZUM METHANERTRAG VON TRITICALESTROH



Anhang 3-1: oTR-spezifischer Methanertrag von gepalltem Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz (Einstellungen: 90° Rotor, 2 mm Siebabstand)

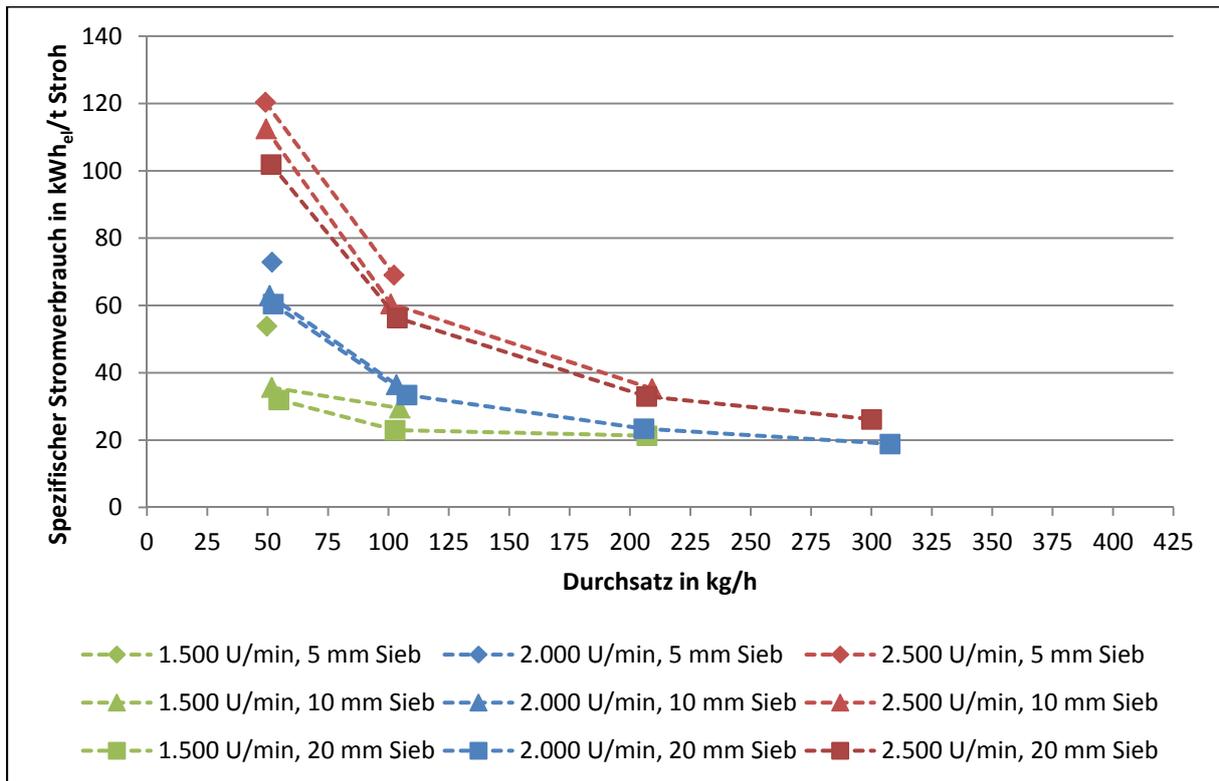


Anhang 3-2: oTR-spezifischer Methanertrag von gepalltem Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz (Einstellungen: 60° Rotor, 8 mm Siebabstand)

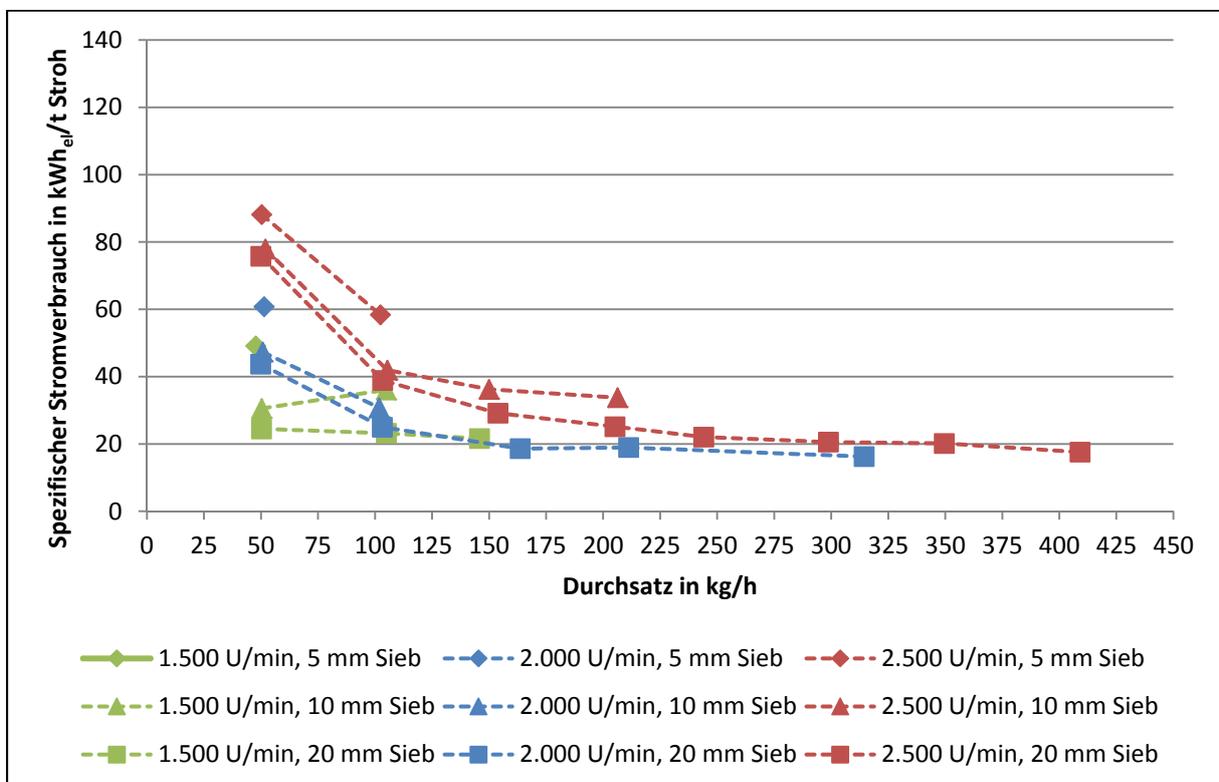


Anhang 3-3: oTR-spezifischer Methanertrag von gepralltem Triticalestroh in Abhängigkeit vom Durchsatz (Einstellungen: 90° Rotor, 32 mm Siebabstand)

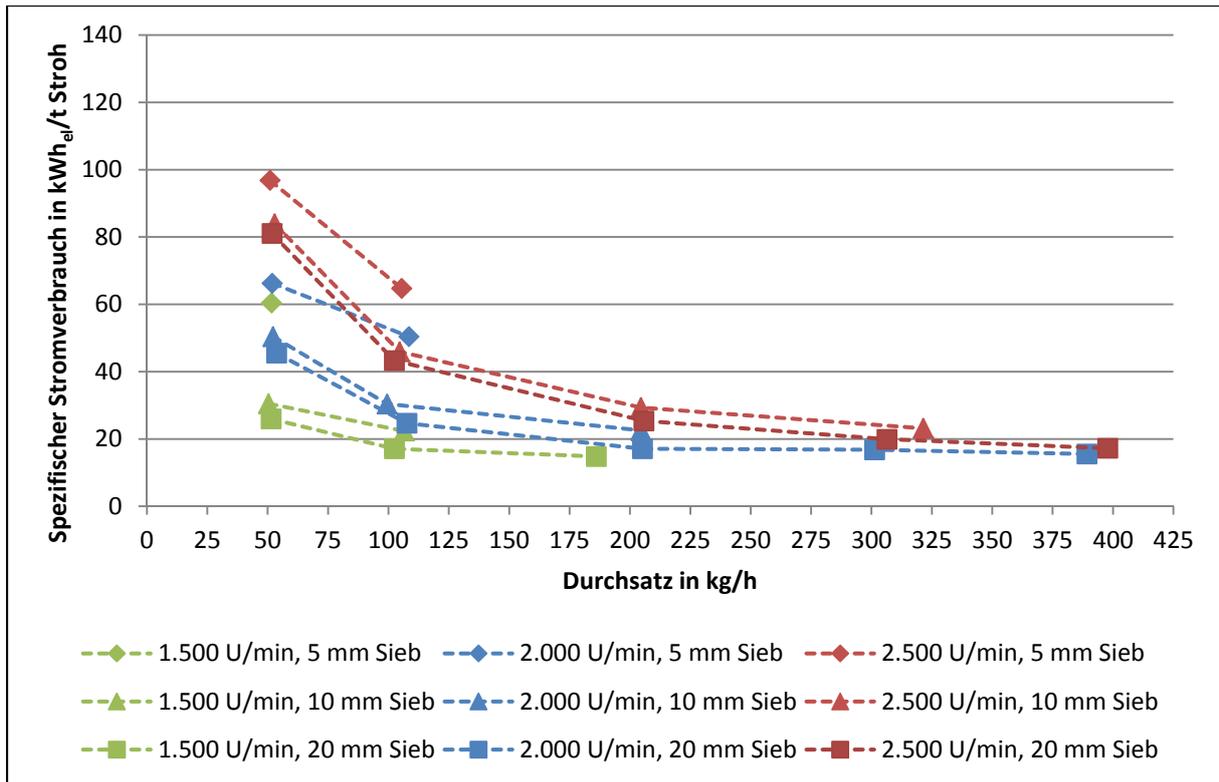
## ANHANG 4: ERGEBNISSE ZUM STROMVERBRAUCH BEI TRITICALESTROH



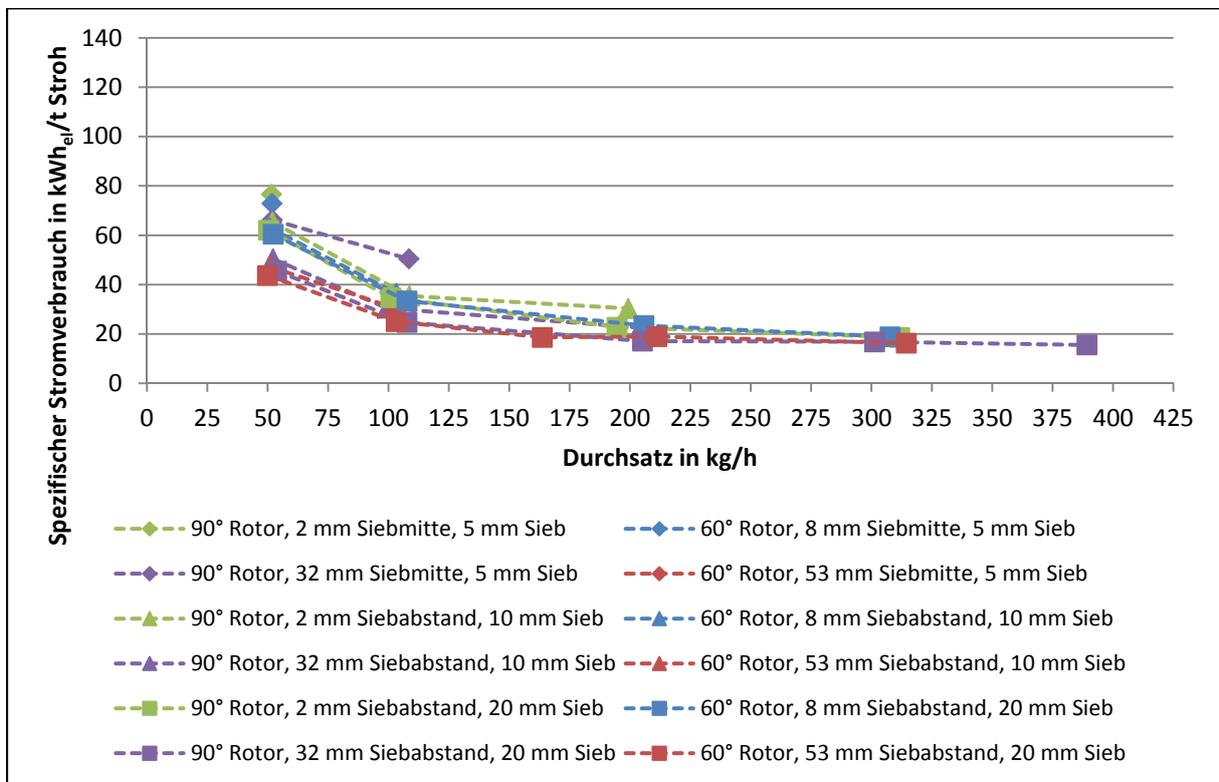
Anhang 4-1: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 60° Rotor, 8 mm Siebabstand)



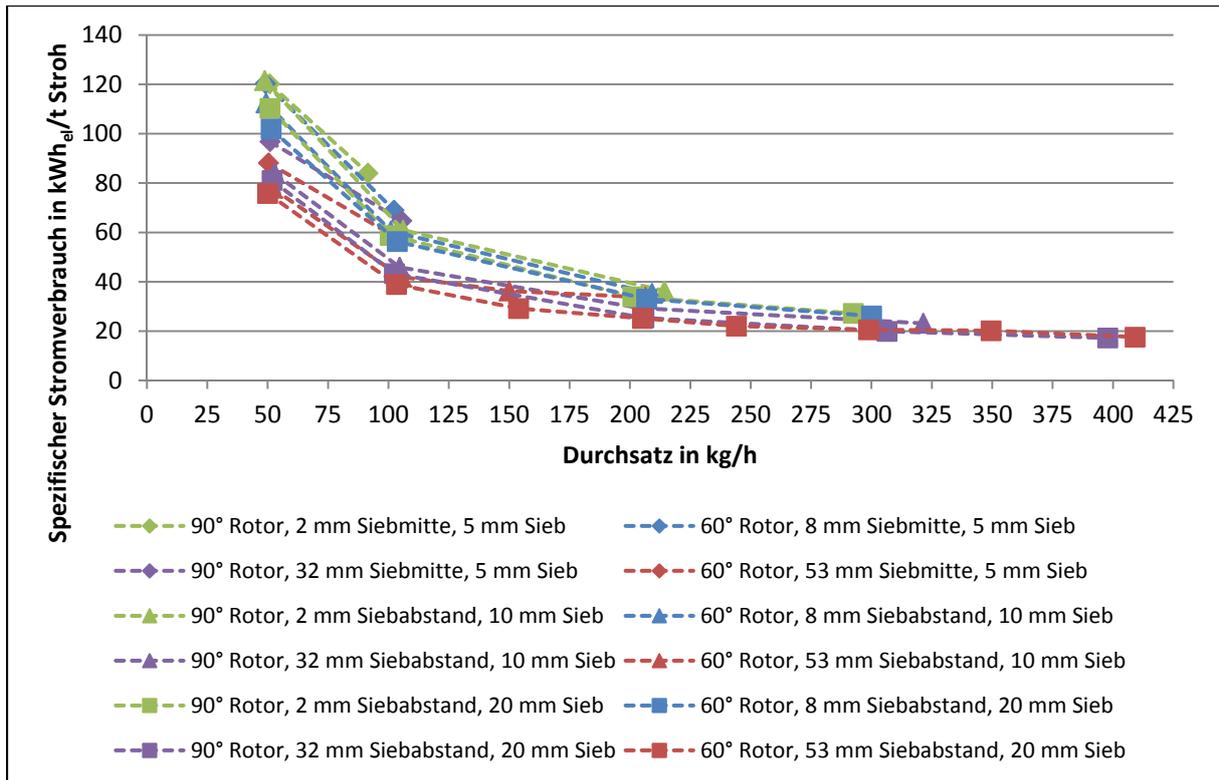
Anhang 4-2: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 60° Rotor, 53 mm Siebabstand)



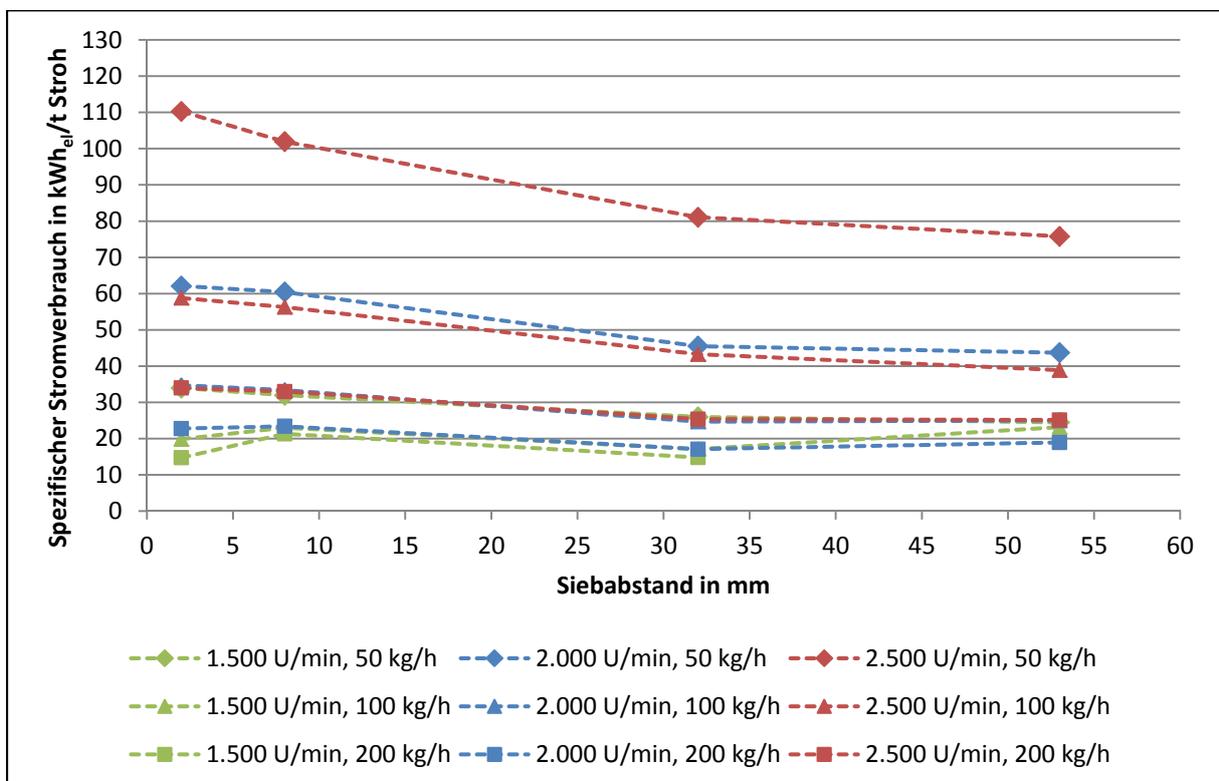
Anhang 4-3: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 90° Rotor, 32 mm Siebabstand)



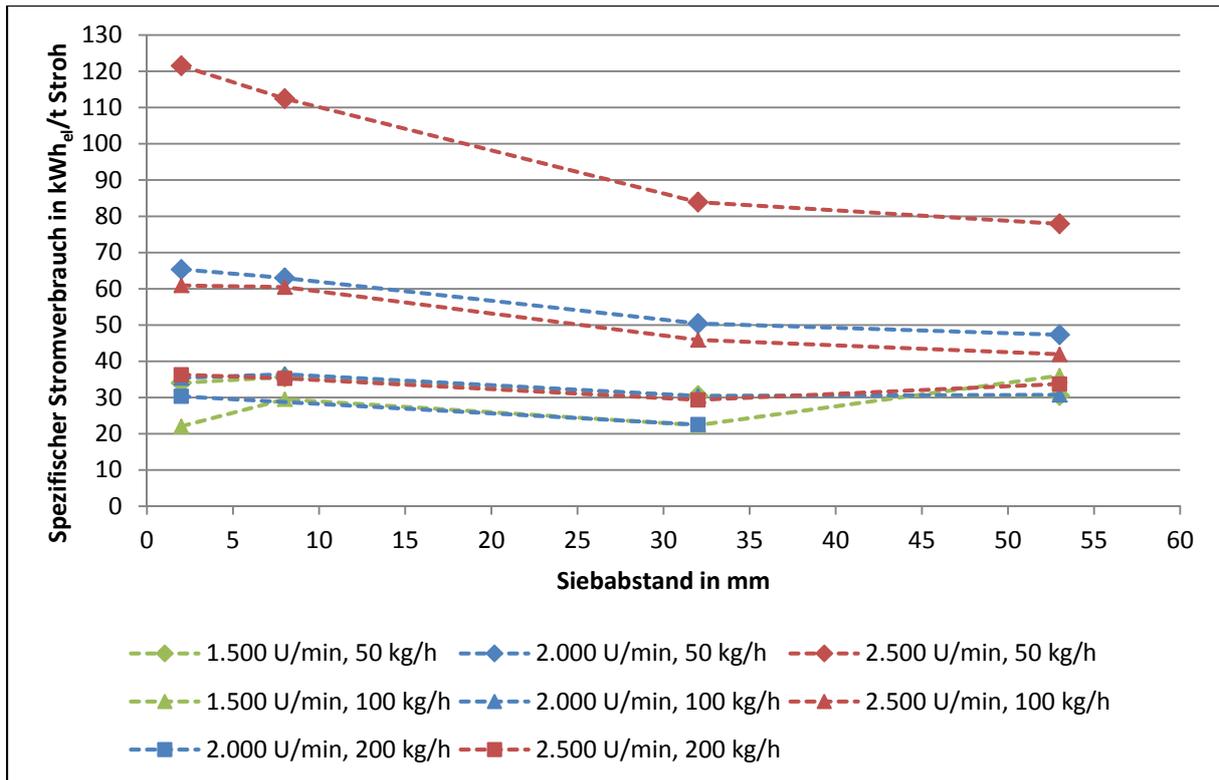
Anhang 4-4: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 2.000 U/min)



Anhang 4-5: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Triticalestroh (Einstellungen: 2.500 U/min)

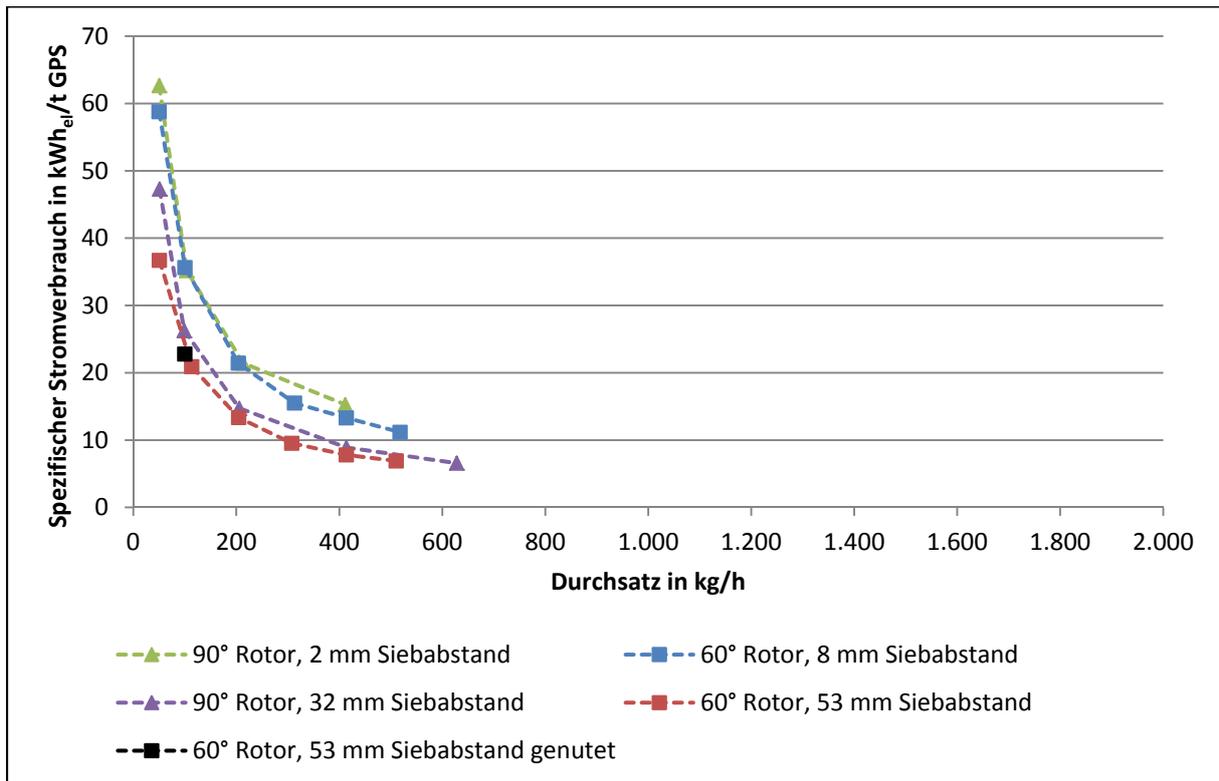


Anhang 4-6: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Siebabstand bei Triticalestroh (Einstellungen: 20 mm Sieb)

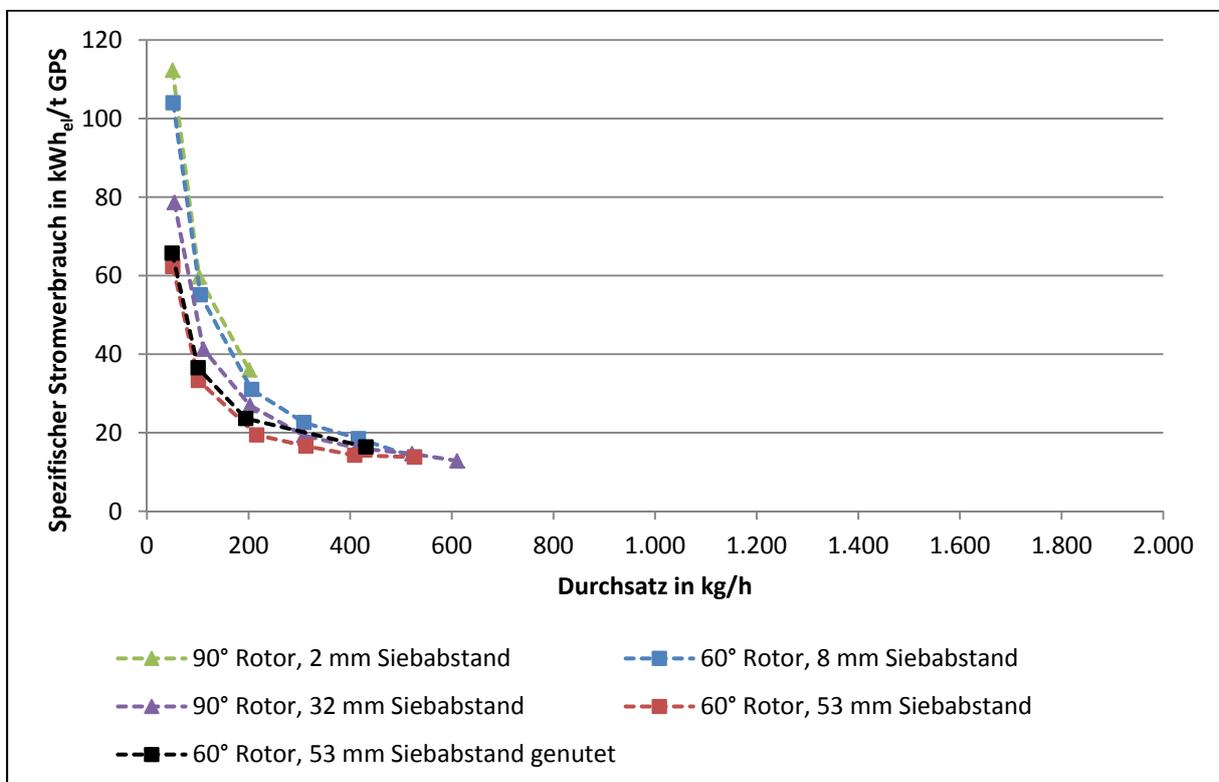


Anhang 4-7: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Siebabstand bei Triticalestroh (Einstellungen: 10 mm Sieb)

## ANHANG 5: ERGEBNISSE ZUM STROMVERBRAUCH BEI HAFER-GPS

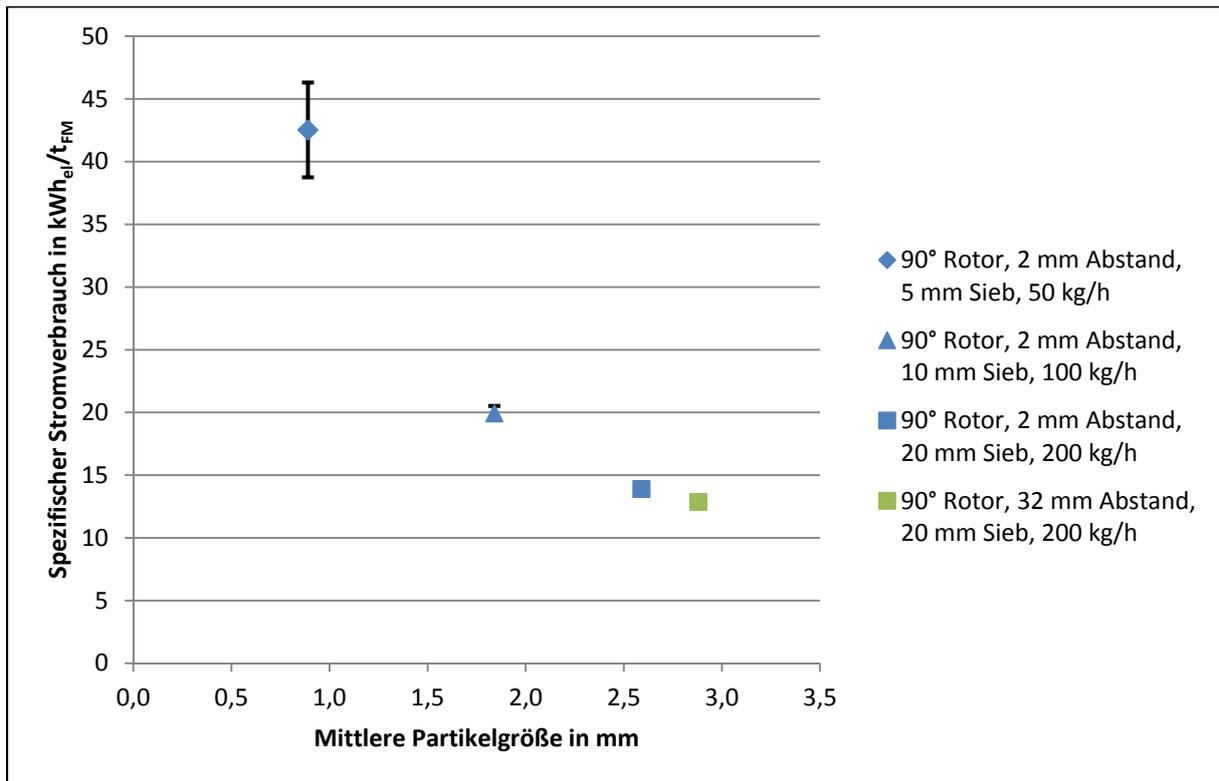


Anhang 5-1: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Hafer-GPS (Einstellungen: 2.000 U/min)

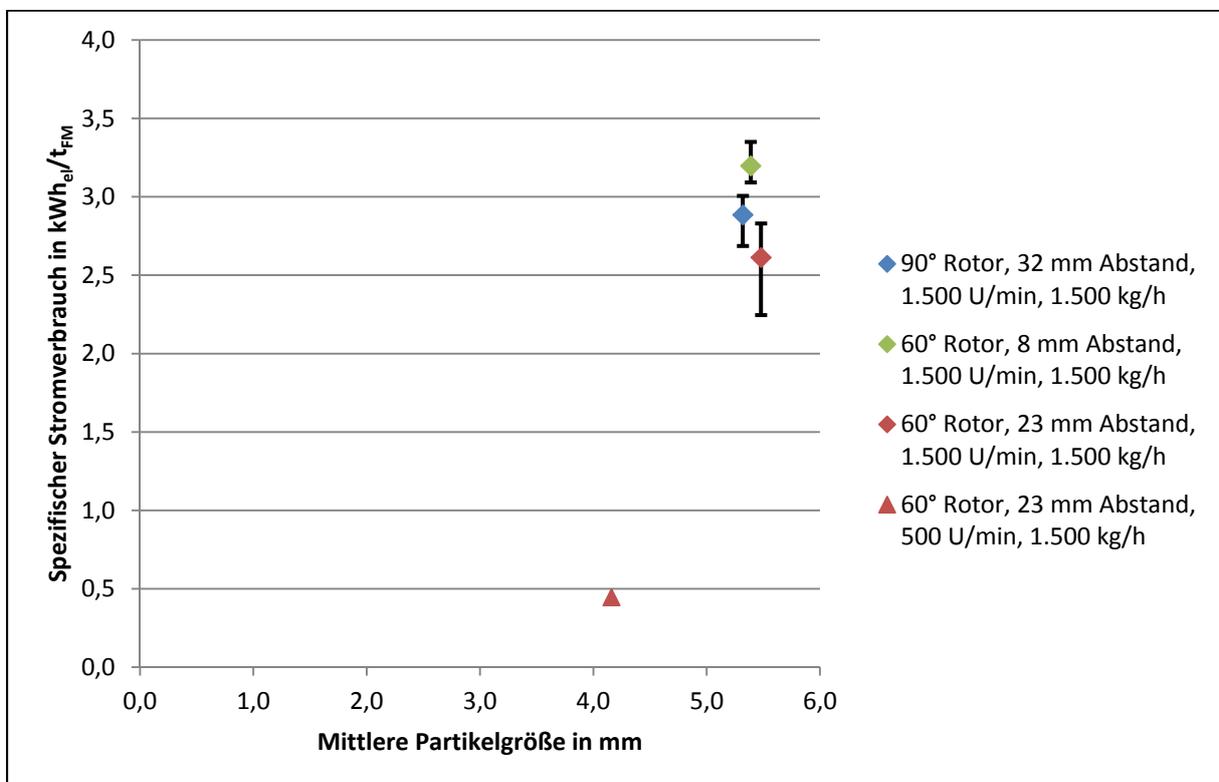


Anhang 5-2: Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs vom Durchsatz bei Hafer-GPS (Einstellungen: 2.500 U/min)

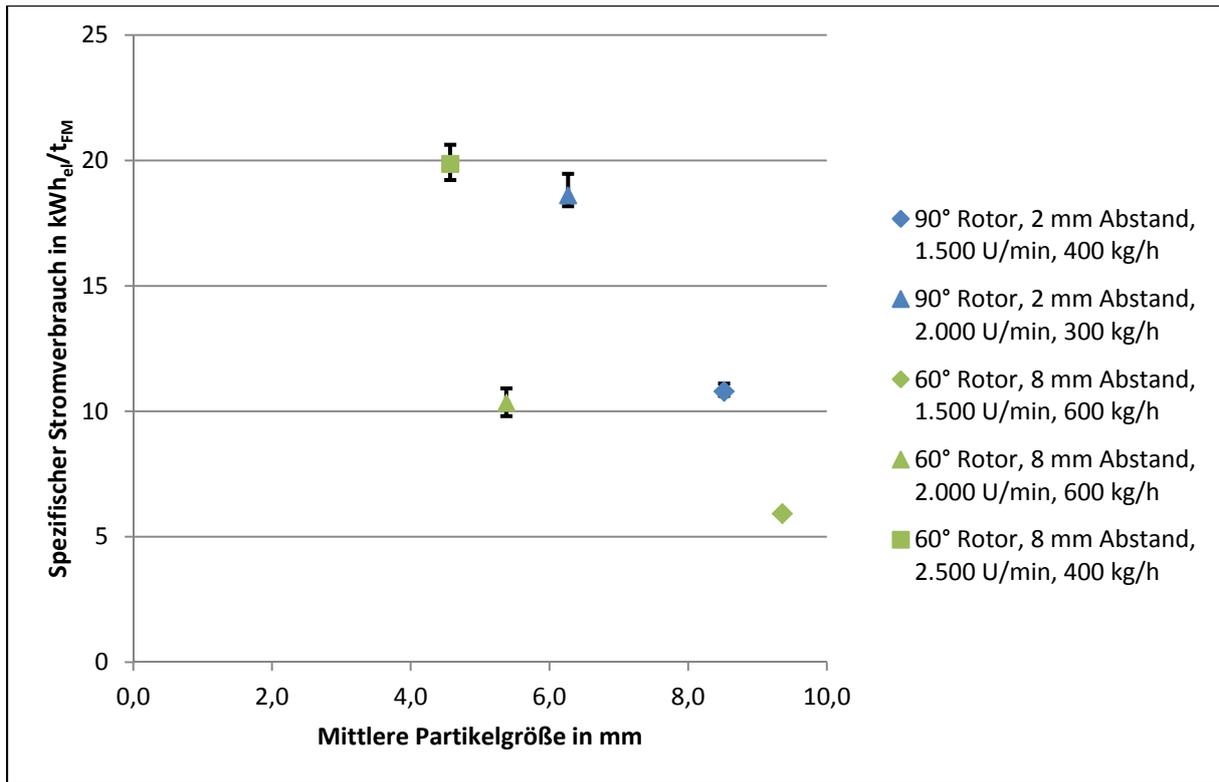
## ANHANG 6: VERGLEICH PARTIKELGRÖÖE UND STROMVERBRAUCH



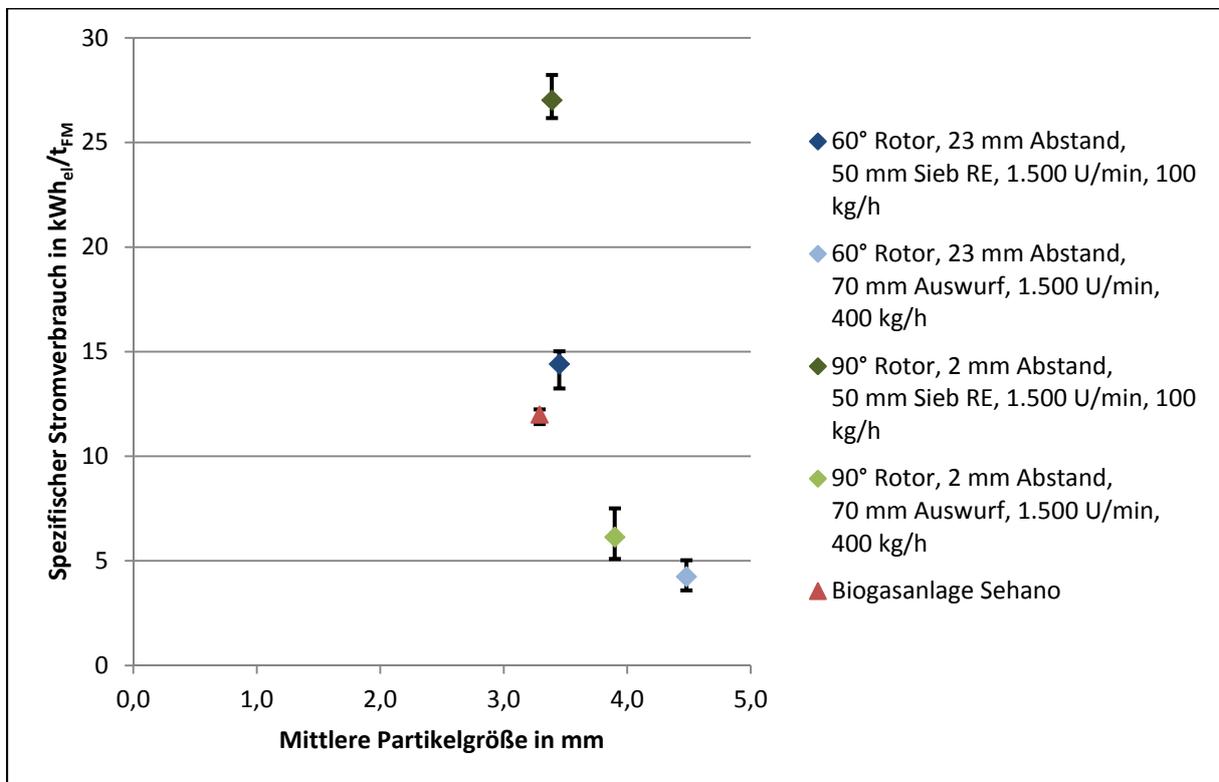
Anhang 6-1: Vergleich von mittlerer Partikelgröße und spezifischem Stromverbrauch für Maisstroh (Einstellung: 1.500 U/min)



Anhang 6-2: Vergleich von mittlerer Partikelgröße und spezifischem Stromverbrauch für Hafer-GPS

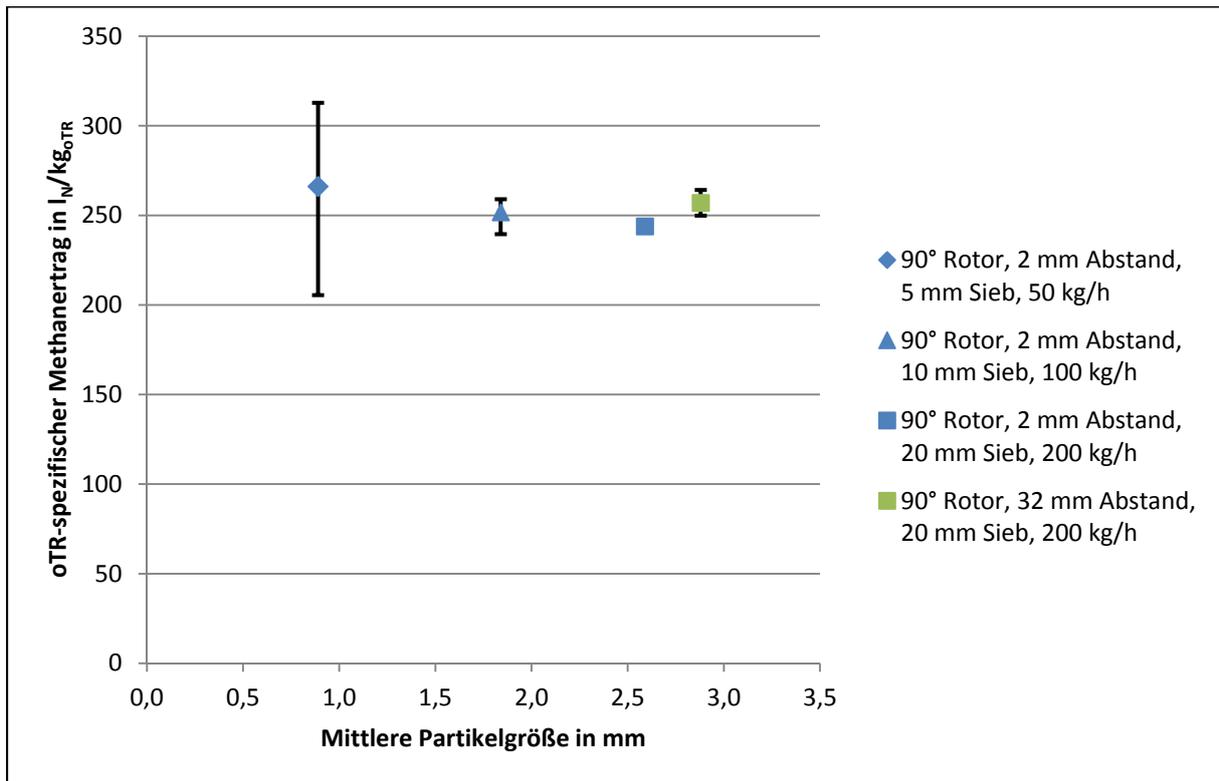


Anhang 6-3: Vergleich von mittlerer Partikelgröße und spezifischem Stromverbrauch für Pferdemist

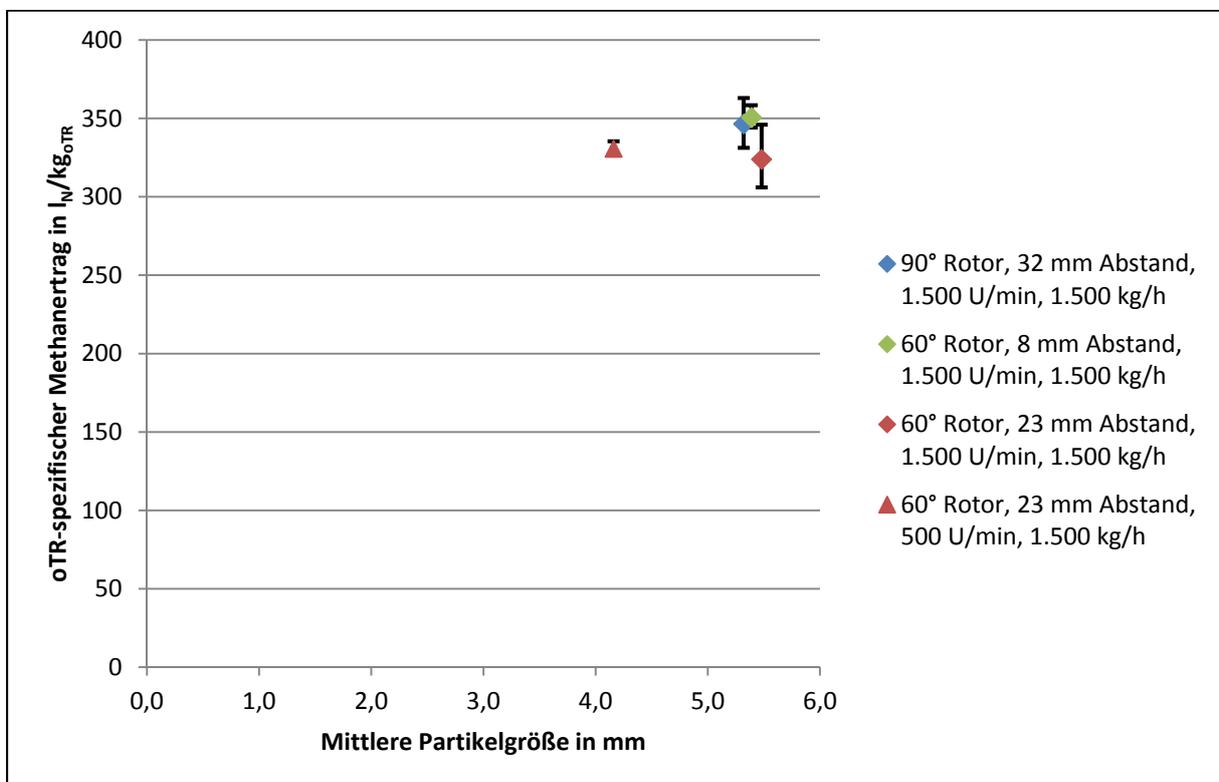


Anhang 6-4: Vergleich von mittlerer Partikelgröße und spezifischem Stromverbrauch für die Substratmischung (53 % Grassilage, 40 % Maissilage und 7 % Rinder- und Pferdemist)

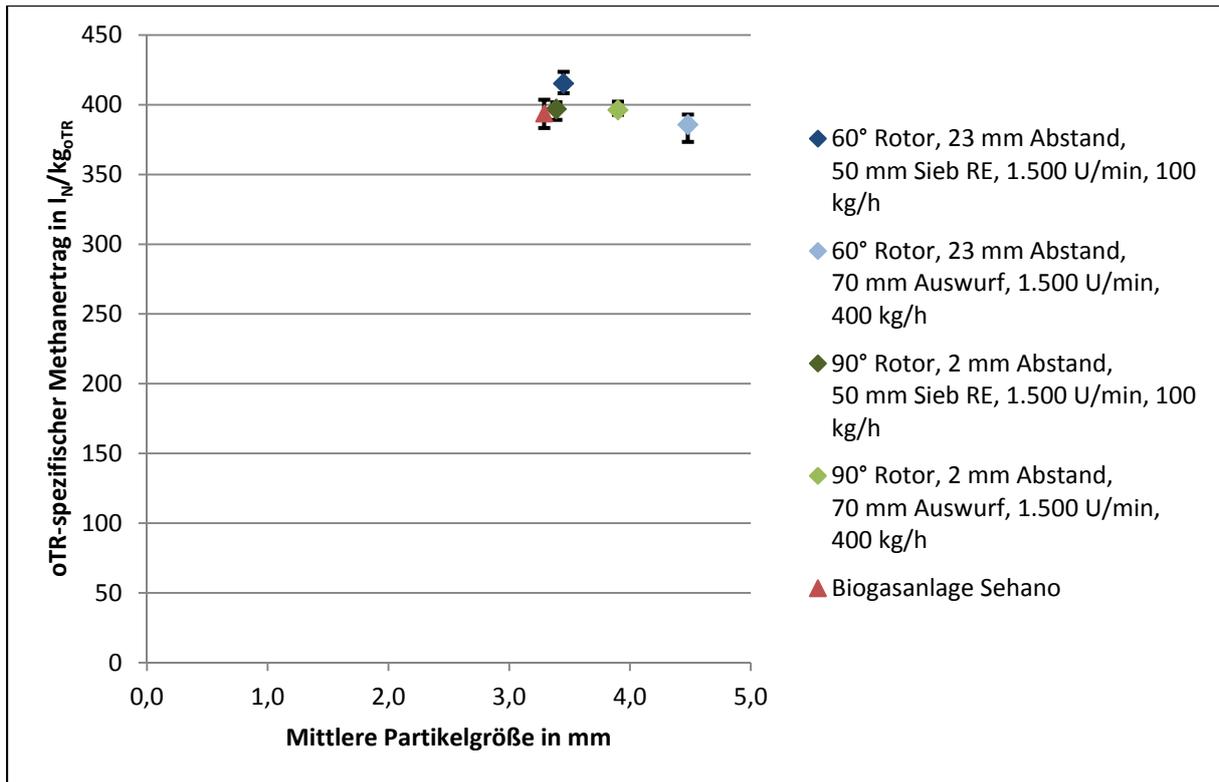
## ANHANG 7: VERGLEICH PARTIKELGRÖÖE ZU METHANERTRAG



Anhang 7-1: Vergleich von mittlerer Partikelgröße und oTR-spezifischem Methanertrag für Maisstroh (Einstellung: 1.500 U/min)



Anhang 7-2: Vergleich von mittlerer Partikelgröße und oTR-spezifischem Methanertrag für Hafer-GPS



Anhang 7-3: Vergleich von mittlerer Partikelgröße und oTR-spezifischem Methanertrag für die Substratmischung (53 % Grassilage, 40 % Maissilage und 7 % Rinder- und Pferdemist)



ISSN 0931-6264